الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصيـــة ITU-R F.1096-1

(2011/04)

طرائق حساب التداخل في خط البصر داخل أنظمة ثابتة لا سلكية مع مراعاة الانتشار بالتضاريس الأرضية

السلسلة F

الخدمة الثابتة

الاتحاد الدولي للاتصالات ITU

تمهيـــد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستمارات 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)

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2011

© ITU 2011

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

التوصيـــة ITU-R F.1096-1

طرائق حساب التداخل في خط البصر داخل أنظمة ثابتة لا سلكية مع مراعاة الانتشار بالتضاريس الأرضية[1]

(2011-1994)

مجال التطبيق

تتعلق هذه التوصية بحساب تأثير الأنظمة عند سطح الأرض على التداخلات التي تتعرض لها أنظمة ثابتة لا سلكية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن التداخل الذي تسببه أنظمة ثابتة لا سلكية أخرى وخدمات أخرى يمكن أن يؤثر في أداء نظام ثابت لا سلكي في خط البصر؛

ب) أن قدرة الإشارة الصادرة عن هوائي الإرسال في النظام يمكن أن ينتشر مسبباً تداخلاً في هوائي استقبال نظام آخر عبر مسير في خط البصر على طول الدائرة العظمى؛

ج) أن قدرة الإشارة الصادرة عن هوائي الإرسال في النظام يمكن أن ينتشر مسبباً تداخلاً في هوائي استقبال نظام آخر وذلك عبر آلية الانتشار بظواهر طبيعية واصطناعية على سطح الأرض؛

د) أن المناطق ذات التضاريس الأرضية التي تنتج اقتران هذا التداخل قد لا تكون قريبة من المسير على طول الدائرة العظمى لكن يجب أن تكون مرئية لهوائي الإرسال المسبب للتداخل وهوائي الاستقبال للنظام المعرض للتداخل؛

هـ) أن من الممكن أن تتجاوز مكونة قدرة التداخل التي تنتج عن الانتشار بالتضاريس الأرضية قدرة التداخل الذي يسببه المسير على طول الدائرة العظمى بين الهوائيات تجاوزاً ملموساً؛

و) أن تقنيات فعالة قد أُعدت لحساب قدرة التداخل المنتشر بالتضاريس الأرضية،

توصي

1 أن تشمل حسابات قدرة التداخل تأثيرات الانتشار بالتضاريس الأرضية، وفقاً للحاجة، عندما يعود التداخل إلى إشارات صادرة عن هوائي إرسال نظام معين تسبب التداخل في هوائي استقبال نظام آخر، وعندما يطبق أحد الشرطين التاليين أو كلاهما (راجع الملاحظة 1):

1.1 وجود مسير انتشار في خط البصر بين هوائي إرسال النظام المسبب للتداخل وهوائي استقبال النظام الذي يتعرض للتداخل؛

2.1 وجود ظواهر طبيعية أو اصطناعية على سطح الأرض مرئية من هوائي الإرسال المسبب للتداخل ومن هوائي الاستقبال المعرض للتداخل؛

2 أن تستعمل الطرائق الموضحة في الملحق 1 من أجل حساب مساهمة التداخل العائدة إلى الانتشار بالتضاريس الأرضية.

الملاحظة 1 – لا تعالج الانعكاسات المآوية أو الانتشار بالتناثر بواسطة طرائق الحساب الموضحة في التوصية.

[1] تتناول التوصية ITU-R P.452 (إجراء التنبؤ لتقدير التداخل بالموجات الصغرية بين محطات على سطح الأرض عند ترددات فوق 0,1 GHz) التي وضعتها لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية آليات انتشار أخرى.

الملحق 1

التداخل الذي يسببه الانتشار بالتضاريس الأرضية لأنظمة ثابتة لا سلكية

1 مقدمة

لقد تبين أن الانتشار بالتضاريس الأرضية هو آلية فعالة جداً لاقتران التداخلات بين أنظمة المرحلات الراديوية في الحالات التي يتقاطع فيها مسيران والتي تكون فيها التضاريس الأرضية عند التقاطع مرئية من هوائي إرسال إحدى القفزات ومن هوائي استقبال القفزة الأخرى. وتقترن الفصوص الرئيسية للهوائيين، في هذه الحالة، في منطقة مشتركة من الأرض ويصبح التداخل مماثلاً للجلبة الأرضية التي يستقبلها نظام رادار ساكن.

وكان يتحدد، في الماضي، التداخل بين أنظمة ثابتة لا سلكية بواسطة حسابات مبنية على آلية انتشار قرب الدائرة العظمى تتضمن المسيرات في خط البصر، وتأثيرات الانكسار الجوي، والانتشار على سطح الأرض والانتشار التروبوسفيري نحو الأمام. وقد استعملت أيضاً تلك التقنيات للدائرة العظمى مع اقتران الفصوص الجانبية للهوائي، خلال سنين طويلة وسمحت لبعض الإدارات بتحديد التداخلات داخل أنظمة ثابتة لا سلكية للأرض وفيما بينها. وأظهرت قياسات المجال في السنوات الأخيرة أن الانتشار على الدائرة العظمى يشكل عادة مساهمة ثانوية بالنسبة إلى الانتشار بالتضاريس الأرضية.

وعلى عكس حالة التداخل فيما بين الأنظمة، تصبح الاختلافات بين التنبؤات على الدائرة العظمى والقياسات أدنى بالنسبة إلى التداخل داخل النظام، حيث كانت الحالات الرئيسية تتعلق في العادة بالتداخل بين قفزتين مجاورتين على الطريق نفسها.

ويمكن أيضاً، في حالة التداخل بين محطة أرضية ومحطة للأرض، أن يحدث الاقتران عبر الحزمة الرئيسية لهوائي الأرض، والمنطقة حول المحطة الأرضية، والفصوص الجانبية لهوائي المحطة الأرضية. ووفقاً للتركيبة الهندسية، يمكن أن يكون الانتشار بالأرض أو الاقتران على الدائرة العظمى هو آلية التداخل السائدة.

2 النموذج الرياضي للانتشار بالتضاريس الأرضية

يمكن أن تحدد قدرة التداخل P_r، المستقبلة عبر آلية الانتشار بالأرض من هوائي إرسال بقدرة مشعة P_t، من خلال المعادلة الخاصة بالرادار الساكن التالية:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{\Omega} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma \, d \, A_e \qquad (1)$$

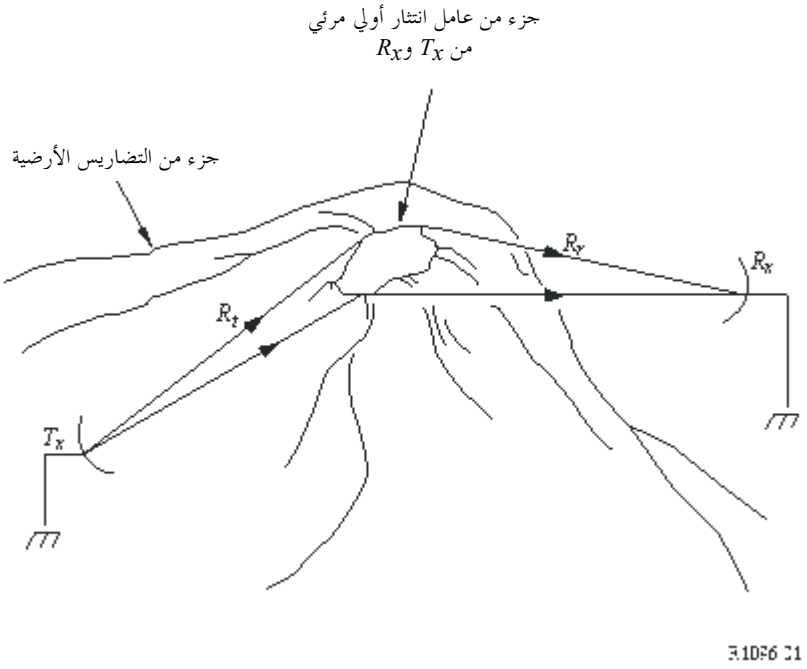
حيث يمثل t وr المرسل والمستقبِل، على التوالي، و$G(\theta, \varphi)$ قيمتي كسب قدر الهوائي المقابلتين في اتجاه عوامل الانتشار داخل منطقة الانتشار الأولية $d\,A_e$، ويمثل θ السمت وφ الارتفاع من محور الهوائي (راجع الشكل 1)، ويمثل R_t وR_r المسيرين المائلين المقابلين من الهوائيات إلى عنصر الانتشار، وλ طول الموجة، وγ معامل الانتشار المعدل الذي يصف الطاقة غير المتماسكة التي تنتشر في المنطقة الأولية، وتعرف المنطقة الأولية $\mathrm{d}\,A_e$ بأنها أدنى منطقة من الانتشار المتعامدة على المتجهات المائلة التي تذهب من المرسل ومن المستقبِل.

وتفترض المعادلة (1) أن المجالات المتناثرة من المناطق أو الأشياء المختلفة هي غير متماسكة، وأن المنطقة Ω تشمل كل المناطق الأولية التي تساهم في استقبال الطاقة المتناثرة. ويجب، في تقدير التكامل لجزء من سطح الأرض، أن يؤخذ في الاعتبار حجب المناطق الأولية الفردية. ولا تساهم في ذلك إلا المناطق غير المحجوبة التي تكون مرئية من هوائيي الإرسال والاستقبال.

وقد أظهرت المقارنة بين قيم التداخل المعنية والمحسوبة أن من الممكن افتراض قيمة معامل الانتشار المعدل γ، ثابتة على مناطق واسعة نسبياً. ويعطي الجدول 1 قيماً مميزة من γ حددتها إحدى الإدارات فيما يتعلق بتغطيات برية مختلفة.

الشـــكل 1

الانتشار بالتضاريس الأرضية



الجـــدول 1

نمط عامل الانتشار	γ (dB)
أنماط التغطيات البرية (من قاعدة بيانات الولايات المتحدة الأمريكية)	
– حي سكني في المدينة	8–
– منطقة للتجارة والخدمات	7–
– غابة بأشجار معبلة	16–
– غابة مختلطة	20–
بُنى اصطناعية من قاعدة بيانات إدارة الطيران الاتحادية	10,4

ويمكن التعبير عن المعادلة التكاملية لتحديد قدرة التداخل (1) على شكل مجموع محدود:

$$P_r = C_t \sum_{\Omega} \frac{Gt\,(pi)\;Gr\,(pi)}{R_t^2\,(pi)\,R_r^2\,(pi)}\;\gamma_i\;Ae,i \qquad (2)$$

$$C_t = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \qquad (3)$$

حيث:

γ_i: معامل الخلية من الرتبة i

p_i: نقطة وسط الخلية

$A_{e,i}$: المساحة الفعالة من الخلية من الرتبة i المتضمنة في مجموعة الخلايا، Ω.

تظهر قياسات التداخل عند تردد ثابت، بصورة عامة، تراوحات زمنية حول القيمة المتوسطة المحسوبة بواسطة المعادلة (2). ويعود ذلك إلى حركة الأشياء المسببة للانتشار مثل الأشجار والنبات أو إلى التغيرات في الظروف الجوية التي قد تسبب تغيرات في الاتساع والطور بين إشارات الانتشار الصادرة عن مناطق الانتشار المختلفة. وتلاحظ، بصورة مماثلة، تراوحات حول نفس القيمة المتوسطة عندما يتغير تردد الموجة الحاملة في التجربة، ولحسن الحظ أن وحدها القيمة المتوسطة التي تعطيها المعادلة (2) تعتبر ذات أهمية في حالة التداخل بين الأنظمة الراديوية الرقمية. ومن ناحية أخرى، إذا كانت الموجة الحاملة الشديدة لإشارة FM ذات دليل منخفض هي مصدر التداخل، فيجب أن تؤخذ في الاعتبار التراوحات فوق القيمة المتوسطة (الخبو الصاعد) لهذه الموجة الحاملة.

1.2 تطبيق النموذج

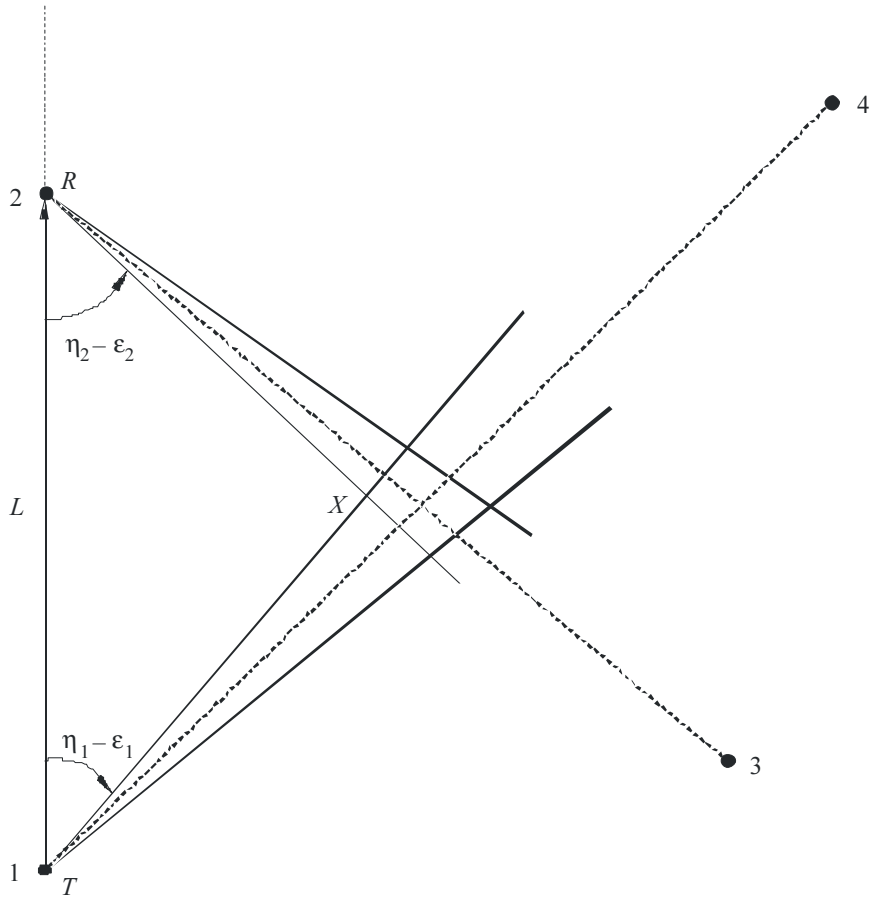
تفرض اعتبارات عملية تتعلق بإمكانات الحاسوب حدوداً على أبعاد جزء المنطقة Ω التي تقدر عليها المعادلة التكاملية. وتكمن إحدى الطرائق في أن تؤخذ منطقة للتكامل منطقة رباعية على سطح الأرض يحددها التقاطع بين قطاع سمتي مركز على محور هوائي الإرسال المسبب للتداخل وقطاع سمتي مركز على هوائي الاستقبال المعرض للتداخل. ويبين الشكل 2 مثل هذه المنطقة للحالة التي يتقاطع فيها المسير من المحطة 1 إلى المحطة 4 مع المسير من المحطة 3 إلى المحطة 2، ويؤدي إلى تداخل بسبب الانتشار بالتضاريس الأرضية من المحطة 1 إلى المحطة 2. ويجب أن يركز القطاعان المعنيان على سمت الحزمة الرئيسية للهوائيين المقابلين وقد يشملان السموت التي لا يتجاوز فيها الكسب الاتجاهي في الاتجاه السمتي قيمة 30 dB تقريباً تحت الكسب الأقصى. وتصف الفقرة 1.3 تقدير المعادلة الصحيحة للتداخل على مثل هذه المنطقة.

توفر تقنيات تعيين الحدود طريقة أقل اعتباطية وأكثر دقة وفعالية في تقدير قدرة التداخل بالانتشار. ولما كانت أكثرية الطاقة المستقبلة والمنتشرة بالتضاريس الأرضية تأتي عادة من الانتشار انطلاقاً من المناطق القريبة من التقاطع بين الحزم الرئيسية للهوائي المسبب للتداخل والهوائي المعرض للتداخل، فلا يطلب التكامل الدقيق إلا في جوار هذا التقاطع. ويمكن أن تحدد مساهمة المنطقة المتبقية من Ω بواسطة الحدود العليا. وتصف الفقرة 2.3 تقنيات تعيين الحدود.

ويمكن أن يكون لمنطقة أولية من الأرض مساهمة بقيمة غير الصفر في تكاملية التداخل شرط ألا تكون هذه المنطقة محجوبة. أي أنه يجب أن تكون مرئية من هوائيي الإرسال والاستقبال، ومن الضروري أن يعتبر في تقدير حجب المنطقة الأولية الحجب الموسع والحجب الصغري. ولا يكون العنصر مرئياً في الحجب الموسع بسبب حجب التضاريس الأرضية الأعلى التي تكون أقرب إلى أحد الهوائيين. أما في الحجب الصغري فلا يوفر العنصر منطقة فعالة $A_{e,i}$ إلى واحد من الهوائيين بسبب توجهه. وتصف الفقرتان 1.4 و2.4، على التوالي، الشروط اللازمة لتحديد ما إذا كانت منطقة أولية ذات حجب موسع أو حجب صغري.

الشـــكل 2

هندسة التداخل



F.1096-02

ويفترض، في الفقرات اللاحقة، أن خرائط الارتفاع الرقمية الموثوقة هي متيسرة لأرض التكامل. وتأخذ هذه المعطيات شكل قيم الارتفاع لمجموعة من النقاط معرفة على إحداثيات خطوط الطول والعرض للمساحة الأرضية. وبينما تتيسر معطيات من خريطة استبانة عالية مبنية على فترات من 3 ثواني القوس، وأن هذه المعطيات قابلة للاستعمال، يمكن الحصول على دقة ملائمة بواسطة معطيات من 15 ثانية القوس.

وغالباً ما تستند مخططات الهوائيات في الحسابات إلى القياسات المخزنة في جداول بحث حاسوبية، أو يمكن أن تكون تعبيرات تحليلية لمخططات القياس. ويمكن لأسباب تتعلق ببساطة التطبيق، أن يدور مخطط السمت الذي يمكن توفيره بسهولة حول محور التسديد.

3 إجراءات التكامل

1.3 التقدير المباشر

يمكن أن يقدر التكامل على منطقة S_0 مختارة على النحو التالي:

$$P_{r,o} = C_t \sum_{pi \in S_0} \frac{G_t(pi)\, G_r(pi)}{R_t^2(pi)\, R_r^2(pi)} \gamma_i \, Ae,i \qquad (4)$$

حيث تنتمي النقاط p_i إلى المناطق $A_{e,i}$ التي تشكل تقسيماً منتظماً للمنطقة S_0:

$$S_0 = \bigcup_i A_{e,i} \qquad A_{e,i} \bigcap A_{e,j} = \varphi \qquad \text{for} \quad i \neq j \tag{5}$$

ورغم أن التكامليات هي معرفة على شبكة مستطيلة، يستحسن أن تستعمل مجموعات ثلاثية من النقاط من أجل تعريف مناطق العناصر المستوية. وتحدد هذه المناطق المثلثية المستعملة لتحديد المنطقة $A_{e,i}$، أدنى منطقة مرئية من المرسل والمستقبل:

$$A_{e,i} = min\{A_{t,i}, A_{r,i}\} \tag{6}$$

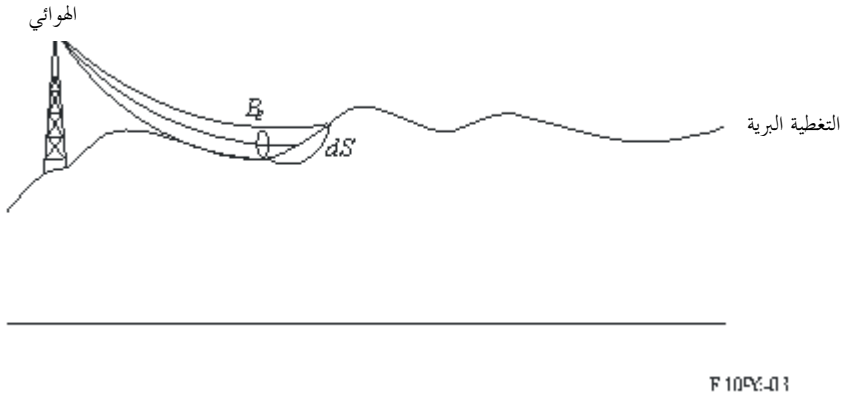
وإذا جرى حجب منطقة معينة، تُستثنى العبارة المقابلة من التكامل.

وتحدد المنطقة الأولية $A_{e,i}$ بالجزء المرئي من إسقاط السطح ΔS_i على المستوي المتعامد على اتجاه الشعاع (راجع الشكل 3):

$$A_{e,i} = min\{B_{t,i}, B_{r,i}\} \tag{7}$$

الشـــكل 3

عنصر الانتشار



F 1096-03

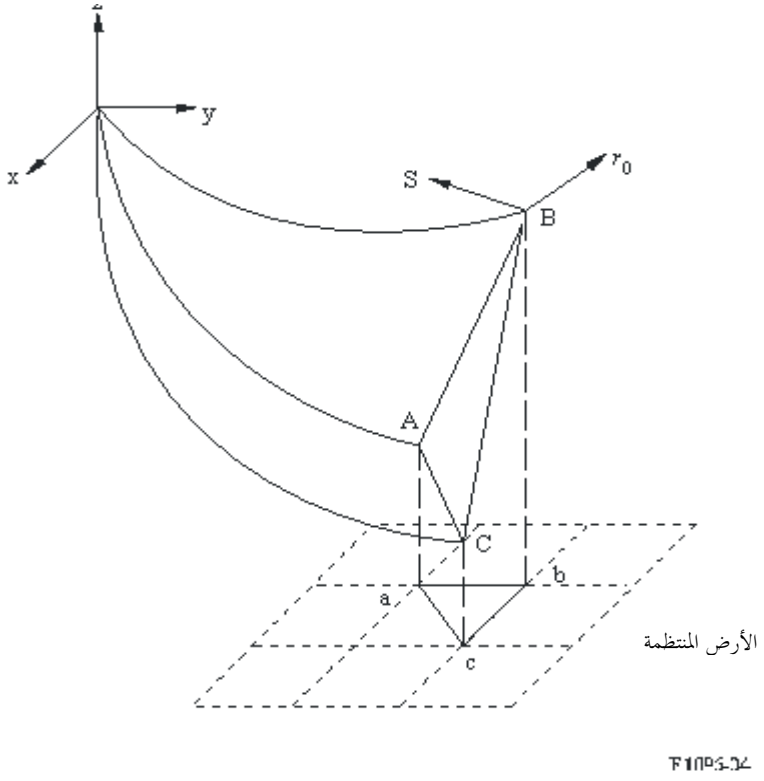
يمكن التعبير عن أقصى قيمة لعنصر المساحة المرئي على النحو التالي:

$$B_e = 0.5 \cdot [h(\sin\theta, \cos\theta) \cdot \cos(\varphi + 2\mu) - \Delta x \Delta y \cdot \sin(\varphi + 2\mu)]$$
$$h(u,v) = u \cdot \Delta y \Delta z_{cb} + v \cdot \Delta x \Delta z_{ab} \tag{8}$$

وتمثل هنا Δz_{ba} وΔz_{bc} زيادتي الارتفاع في نقاط مثلث شبكي بالنسبة إلى ارتفاع الزاوية اليمنى (راجع الشكل 4). ويمثل Δx وΔy أبعاد عين الشبكة، بينما يمثل φ وθ ارتفاع نقطة وسط المثلث وسمتها، وμ الزاوية بين وتر الشعاع المنتشر ومماسه (راجع الشكل 5). وتجدر الإشارة إلى أن $A_{e,i}$ هي المنطقة المسقطة على وحدة المساحة الكروية من التضاريس الأرضية ΔS_i والتي لا تتعلق بظروف الانتشار.

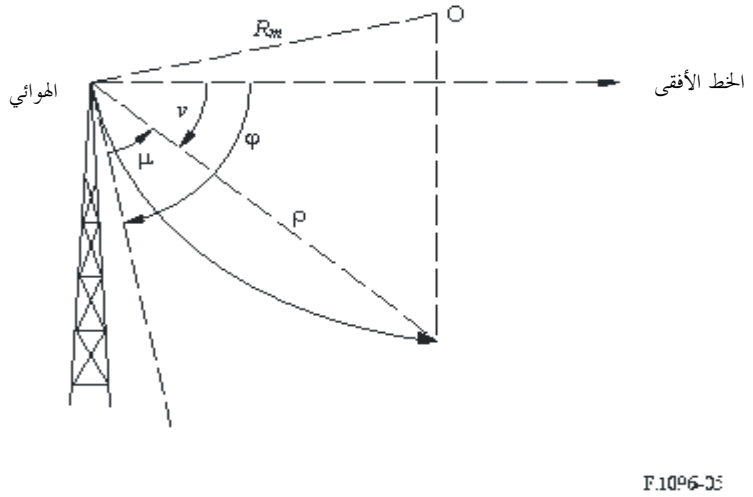
الشـــكل 4

المساحة الفعالة لعنصر الانتشار



الشـــكل 5

زاوية الارتفاع



لا تتطلب هذه المعادلة حساب أية زوايا لأن من الممكن أن تحسب بوضوح كل الوظائف المثلثية في العلاقة (8):

$$\sin\theta = \frac{x}{\left(x^2 + y^2\right)^{1/2}}, \quad \cos = \frac{y}{\left(x^2 + y^2\right)^{1/2}}$$

$$\sin(\varphi + 2\mu) = \frac{z}{\rho}\left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} + \frac{d}{2R_e} \tag{9}$$

$$\cos(\varphi + 2\mu) = \frac{d}{\rho}\left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} - \frac{z}{2R_2}$$

حيث: $\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{½}$ هي المسافة بين الهوائي وعنصر الانتشار، و$d = (x^2 + y^2)^{½}$ هي إسقاطها على المستوي الأفقي، و$R_e = a \cdot k$، حيث a هو نصف قطر الأرض، وk عامل قطر الأرض الذي يتعلق بتدرج الانكسارية في الجو.

وإذا استبدلت المعادلة (9) إلى المعادلة (8)، يكون ما يلي:

$$B_e = 0.5 \cdot \left[h(x,y) \cdot \left(\frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{2R_e}\right)^2} - \frac{z}{2R_e} \right) - \Delta x \Delta y \cdot \left(\frac{z}{\rho} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{2R_e}\right)^2} + \frac{d}{2R_e} \right) \right] \tag{10}$$

حيث (x, y, z) هي إحداثيات نقطة وسط المثلث. ولما كان $(z << R_e)$، يمكن تبسيط المعادلة أعلاه على النحو التالي:

$$B_e = \frac{0.5}{\rho} \cdot [h(x,y) - \Delta x \Delta y \cdot z] - \Delta x \Delta y \frac{d}{4R_e} \tag{11}$$

2.3 تقنيات تعيين الحدود

يمكن أن تحدد تقنية تكرارية لحساب P_r من خلال تقسيم المجموعة Ω إلى مجموعتين فرعيتين تستبعد الواحدة الأخرى، S_0 وQ_0:

$$S_0 \cup Q_0 = \Omega, \qquad S_0 \cap Q_0 = \varphi \tag{12}$$

ومن خلال تمثيل التكاملية (1) كمجموع لتكامليتين:

$$P_r = C_t \int_{S_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma \, dA_e + C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma \, dA_e \tag{13}$$

وتقدر هذه العبارة بواسطة التكامل العددي للعبارة الأولى وتعيين حدود العبارة الثانية. وإذا كانت الحدود أقل بكثير من القيمة المحسوبة للتكاملية الأولى، فيمكن أن تُبدّل التكاملية على المجموعة Ω، ويُستعاض عنها بالتكاملية على S_0. وتحدد الدقة المطلوبة للتقدير أصغر قيمة للحدود التي يجب أن تقارن مع التكاملية. وفي أكثرية التطبيقات، إذا كانت الحدود أقل من 0,1 مرة التكاملية فيمكن أن يُستعاض عن التكاملية على المجموعة Ω بالتكاملية على S_0. ويؤدي ذلك إلى خطأ في تقدير P_r أصغر من 0,41 dB. ويعتبر مثل هذا الخطأ مقبولاً لا سيما نظراً إلى الشكوك التي ترافق تحديد معاملات الانتشار وإحداثيات الخريطة. وبما أن الهوائيات هي، عموماً، ذات اتجاهية عالية فإن المنطقة S_0 ذات التكامل الصحيح هي أصغر بكثير من المنطقة الكاملة.

وإذا لم تكن الحدود بالنسبة إلى Q_0 أصغر بكثير من التكاملية على S_0، يُستعاض عن منطقة التكامل S_0 بمنطقة أكبر $S_0 \cup S_1$ ($S_1 \subset Q_0$).وتعرف Q_1 بأنها القيمة المكملة لـ S_1 بالنسبة إلى Q_0 وبحيث تكون: $S_1 \cup Q_1 = Q_0$ و$S_1 \cap Q_1 = \varphi$. كما تقدر حدود Q_1. وبما أن من غير الممكن أن تكون التكاملية على Q_1 أكبر من التكاملية على Q_0، تكون، عادة، الحدود حول Q_1 أقل من الحدود حول Q_0. ويجب أيضاً أن تكون التكاملية حول $S_1 \cup S_0$ أكبر من التكاملية حول S_0. ومن ثم، إذا تكررت العملية عدداً n من المرات، فتصبح الحدود أقل من التكاملية على $\cup S_i$ وهذا ما يسمح بالاستعاضة عن التكاملية على المجموعة Ω بالتكاملية على المجموعة الفرعية $\cup S_i$. يستحسن في التطبيق العملي أن يكون n صغيراً واحداً أو اثنين، على سبيل المثال. ويمكن أن يتحقق ذلك من خلال اختيار S_0 اختياراً مناسباً وأن تحدد الخوارزمية على نحو تكون فيه الحدود حول Q_0 (وقيم Q_i الأخرى) بأضيق قدر ممكن.

وتجدر الإشارة إلى أن من الممكن أن تضاف S_is إلى مساحة التكامل الفعلية وأن تستعمل النتائج السابقة على نحو لا يحسب فيه التكامل على أية مساحة S_i إلا مرة واحدة. ولما كانت الحدود أسهل للحساب، فيمكن أن تكرر هذه العملية كلما كان ذلك ضرورياً لدقة التقدير.

يستعمل تقدير الحدود العليا Q_0، Q_1، المتباينة التالية: $\gamma\, dA_e \le \gamma\, R_t^2\, d\omega_t$، حيث $d\omega_t$ هي الزاوية المجسمة مركزها هوائي العنصر dS (راجع الملاحظة). وعندما تستعمل الإحداثيات الكروية مع المركز عند المرسل، يحصل على ما يلي:

$$P_{r,e} = C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma\, dA_e \le C_t \max_{Q_0} \left[\frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] D_0 \tag{14}$$

حيث D_0 هي مساحة إسقاط منطقة التكامل Q_0 على وحدة المساحة الكروية مع المركز عند المرسل، وφ_t وθ_t ارتفاع عنصر الانتشار وسمته.

وبما أن:

$$\max_{Q_0} \left[\frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] \le \left[\frac{\gamma_{max} G_{t,max} \cdot G_{r,max}}{R_{r,min}^2} \right] \tag{15}$$

حيث تحدد أقصى قيمة وأدناها على المنطقة Q_0:

$$P_{r,e} \le C_t \frac{G_{t,max} \cdot G_{r,max}}{R_{r,min}^2} \gamma_{max}\, D_0 \tag{16}$$

يعطي استعمال الإحداثيات الكروية مع المركز عند المستقبل النتائج المماثلة التالية:

$$P_{r,e} \le C_t \frac{G_{t,max} \cdot G_{r,max}}{R_{t,min}^2} \gamma_{max}\, D_0 \tag{17}$$

ويكون لأقرب هذين الحدين الشكل التالي:

$$P_{r,e} \le C_t \frac{G_{t,max} G_{r,max}}{R_m^2} \gamma_{max}\, D_0 \tag{18}$$

حيث:

$$R_m = max\ \{R_{r,min}, R_{t,min}\} \tag{19}$$

يؤدي اختيار مناطق مختلفة S_0 إلى حدود مختلفة. ويمثل S_0 في الحالة الأهم منطقة التضاريس الأرضية التي تقع عند تقاطع الزوايا ε_2 | $\theta_{t,0} - \theta_t$ | ,ε_1 > | $\theta_{r,0} - \theta_r$ | حيث $\theta_{r,0}$ و$\theta_{t,0}$ يمثلان قيمتي سمت اتجاه الهوائي (راجع الشكل 2). وإذا كانت قيمتا ε_1 وε_2 على نحو يكون فيه كسب الهوائي داخل الزوايا أكبر من القيم المحلية القصوى عند الفصوص الجانبية، فيمكن إعادة كتابة الحدود العليا على النحو التالي:

$$P_{r,e} \le C_t \frac{G_r(\theta_{r,0}+\varepsilon_1,\varepsilon_2)\cdot G_t(G_{t,0}+\varepsilon_1,\varepsilon_2)}{R_m^2}\gamma_{max} D_0 \quad (20)$$

ويمكن، في هذه الحالة الخاصة، أن تحدد قيم $R_{t,min}$ و$R_{r,min}$ انطلاقاً من المثلث RXT المبين في الشكل 2.

$$R_{t,min} = \frac{L\,sin(\eta_2-\varepsilon_2)}{sin(\eta_1+\eta_2-\varepsilon_1-\varepsilon_2)},$$

$$R_{r,min} = \frac{L\,sin(\eta_1-\varepsilon_1)}{sin(\eta_1+\eta_2-\varepsilon_1-\varepsilon_2)}. \quad (21)$$

ويقدم الملحق 2 طريقة حساب المساحة D_0. غير أن من الممكن تجنب الحسابات المعقدة وتعيين حدود هذه المساحة بواسطة المساحة الكلية للوحدة الكروية التي تساوي 4π.

وكانت الحدود السابقة مبنية على اتجاهية الهوائي. أما الحدود الأخرى فيمكن أن تحدد انطلاقاً من المعادلة (2). فيمكن، على سبيل المثال، أن تستثنى المناطق البعيدة من التكامل. ويكون للحدود المقابلة الشكل التالي:

$$P_{r,x} \le C_t \frac{G_r(\theta_{r,0},0)\cdot G_t(\theta_{t,0},0)}{R^2}\gamma_{max}\overline{D_0} \quad (22)$$

حيث D_0 هي مساحة إسقاط المنطقة S_0 على الوحدة الكروية، ويختار R على نحو يكون فيه $(P_{r,x} + P_{r,e})$ بأقل من الدقة المطلوبة.

ملاحظة من مدير مكتب الاتصالات الراديوية BR – على سبيل الإعلام، يقدم اشتقاق هذا التقدير في المرجع التالي:

SMITH, W.E., SULLIVAN, P.L., GIGER, A.J. and ALLEY. G.D. [June, 1987] Recent advances in microwave interference prediction. IEEE International Conference on Communications (ICC '87), paper 23.2.

4 الحجب

1.4 الحجب الموسع

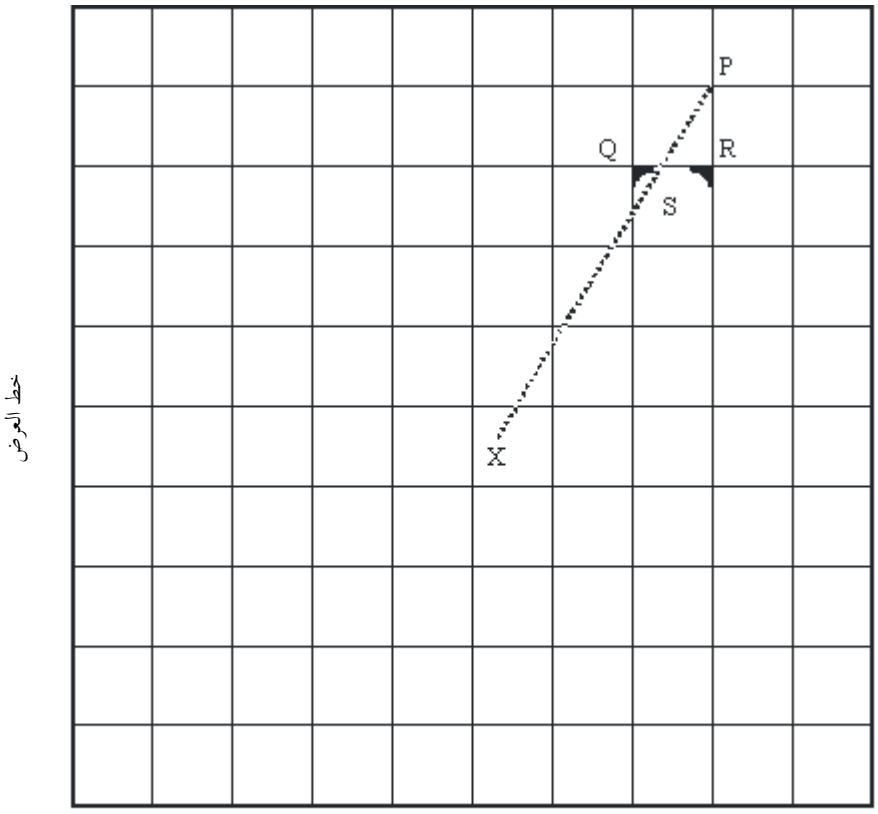
لما كان حجب المساحة الأولية مرتبطاً بحجب نقاطها الفردية، يجب أن يحدد حجب النقاط المكونة. ويستحسن أن تستعمل الإحداثيات الكروية مع المركز عند الهوائي لهذا الغرض. وتهدف الخوارزمية، في حسابات الحجب بواسطة نظام الإحداثيات الكروية، إلى تتبع أكبر زاوية للإطلاق على طول المستوي الشعاعي وتحيين أقصى زاوية إطلاق، وفقاً للحاجة.

ولا تتغير مفاهيم الحجب عندما يستعمل نظام إحداثيات شبكية، لكن من غير الممكن تحديد زاوية أية نقطة من نقاط الشبكة، لأن لا شيء يضمن أن يحصل على نقطة شبكية واحدة أو على عدة نقاط مع السمت نفسه عند نقطة الاختبار. ويجب أن يصار إلى تقريب لأقصى زاوية إطلاق على طول المستوي الشعاعي على نحو يمكن أن تقارن فيه زاوية إطلاق نقطة الاختبار مع هذه القيمة من أجل تحديد رؤيتها. ويجب أن تحدد، أولاً من أجل نقطة اختبار P معينة، النقطتان الشبكيتان Q وR

الأقرب لنقطة الاختبار، ويتابع المستوي الشعاعي من الهوائي إلى نقطة الاختبار، ثم تحدد أدنى قيمة لفرق السمت، وأدنى زوايا إطلاق. ويبين الشكل 6 إسقاط هاتين النقطتين على المستوي الأفقي.

الشـــكل 6

حجب نقطة الاختبار P بواسطة زوايا الإطلاق المرئية عند النقطتين Q وR



يجب أن تقارن زاوية الإطلاق عند نقطة الاختبار P مع زاوية الإطلاق المرئية التي يمكن أن تتصاحب مع نقطة التقاطع S للمستوي الشعاعي مع الخط الذي يصل بين نقطتي الشبكة. ويبين الشكل 7 هذا المستوي الشعاعي. وتسمح مقارنة زاوية الإطلاق φ_S مع الزاوية φ_P بتحديد ما إذا كانت النقطة P مرئية وفقط إذا كانت $\varphi_P \geq \varphi_S$ مع افتراض أن S هي مرئية. وإلا تكون P محجوبة أو غير مرئية.

ويمكن اشتقاق زاوية الإطلاق φ لنقطة ما انطلاقاً من الشكل 5:

$$\varphi = \text{Arc sin}\left[\frac{z}{\rho}\left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} - \frac{d}{2R_e}\right] \quad (23)$$

حيث:

R_e = $a \cdot k$؛

k: عامل نصف قطر الأرض الفعال، الذي يتعلق بتدرج الانكسارية؛

a: نصف قطر الأرض؛

d: المسافة الأفقية بين الهوائي ونقطة الاختبار؛

z: ارتفاع نقطة الاختبار فوق الهوائي؛

$$\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}.$$

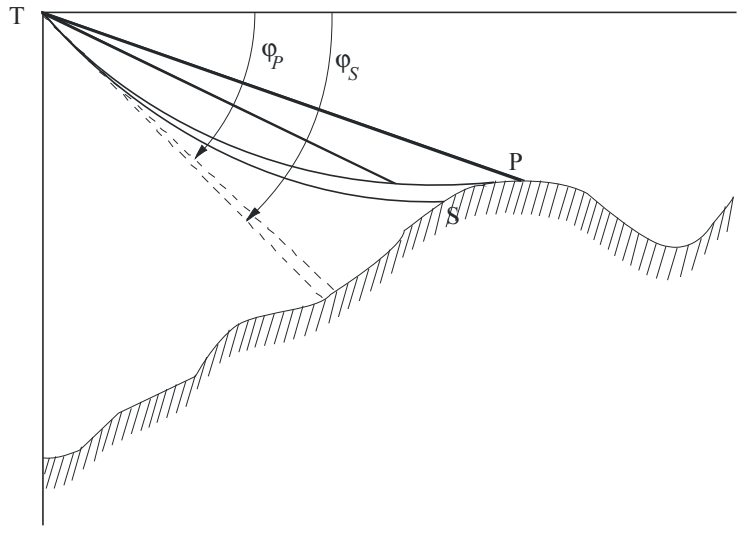
وبما أن $\arcsin(x)$ هي دالة ذات تزايد رتيب، يكفي أن تقارن زوايا القوس للدالة arc sin في تحديد قابلية P للرؤية نظراً إلى أن S هي مرئية: لما كانت ($\rho << R_e$)، فإن المقياس الذي يسمح بتحديد النقطة P التي تحجبها النقطة S يكون على النحو التالي:

$$\frac{z_p}{\rho_p} - \frac{d_p}{2R_e} < \frac{z_s}{\rho_s} - \frac{d_s}{2R_e} \quad (24)$$

ويمكن، في حالة نظام الإحداثيات الشبكية أن تحدد زاوية الإطلاق Q_S عند النقطة S بواسطة الاستكمال الداخلي الخطي:

الشـــكل 7

حجم نقطة الاختبار P



F.1096-07

$$\varphi_S = \frac{d_{QS}}{d_{QR}}\varphi_Q + \frac{d_{RS}}{d_{QR}}\varphi_R \text{ ،} \quad (25)$$

حيث:

d_{QS}: المسافة بين Q وS

d_{QR}: المسافة بين Q وR

d_{RS}: المسافة بين R وS.

وتبدأ حسابات الحجب بنقاط الشبكة الأقرب إلى المرسل ويفترض أن هذه النقاط هي مرئية. ويتم الابتعاد عن هذه النقاط وفقاً لمستطيلات ممركزة على نحو يغطي كامل الشبكة ويسمح بتحديد كل النقاط.

2.4 الحجب الصغري

يحدد الحجب الصغري لمساحة أولية وفقاً لتوجيهها. ويعتبر في الشكل 4 المساحة الأولية المثلثية. ويوجد حجب صغري لهذا المثلث فقط إذا كان الخط المتعامد N للمساحة والمتجه الوحدة r_0 المماس للشعاع المقابل دقيقين. ويمكن التعبير عن ذلك على النحو التالي:

$$N \cdot r_0 \geq 0 \quad (26)$$

إذا كانت z_a وz_b وz_c قيم الارتفاع عند النقاط المجاورة الثلاث على الشبكة (راجع الشكل 4)، وكانت نقطة واحدة على الأقل من هذه النقاط غير محجوبة، يمكن أن تعرف رؤوس المثلث ABC التي تقارب عنصر المساحة من خلال إحداثياتها الديكارتية: $A(x_b, y_b + \Delta y, z_a)$، $B(x_b, y_b, z_b)$، $C(x_b, + \Delta x, y_b, z_c)$. ولنفترض أن $\angle abc = 90°$. فتصبح المتباينة (26) مكافئة لما يلي (راجع الملاحظة):

$$\begin{aligned} &\delta[h(\sin\theta, \cos\theta)\cos(\varphi + 2\mu) - \Delta x \Delta y \sin(\varphi + 2\mu)] \geq 0 \\ &h(u, v) = u \cdot \Delta y \Delta z_{cb} + v \cdot \Delta x \Delta z_{ab} \\ &\delta = \text{sign}(\Delta x \Delta y) \end{aligned} \quad (27)$$

حيث φ هي زاوية الإطلاق، وμ الفرق بين زاوية الإطلاق وزاوية الارتفاع، وθ سمت عنصر الانتشار. وتساوي نصف القيمة المطلقة على الجانب الأيسر من هذه المتباينة مساحة الانتشار الفعالة التي تعطيها المعادلة (8). وبهذا يمكن أن يقدر الجانب الأيسر من العبارة (27) في حساب تداخل عنصر الانتشار وأن يستعمل أيضاً في تحديد الحجب الصغري.

ويقدم الملحق 3 طريقة تقريبية مبسطة لتحديد الحجب الصغري وتقدير B_e أي المساحة الفعالة لمثلث عنصري. وتخفض هذه الطريقة وقت الحساب من خلال استعمال تقريب من الرتبة الأولى لقيمة φ في المعادلتين (11) و(27). ويمكن أن تستعمل عندما تكون زوايا الإطلاق في المنطقة القريبة من تقاطع الحزم الرئيسية للهوائي المسبب للتداخل والهوائي المعرض للتداخل أقل من 5° تقريباً. وتكون الأخطاء التي تدخل عندها بأقل من 10%.

ملاحظة من مدير مكتب الاتصالات الراديوية – على سبيل الإعلام، يقدم اشتقاق هذا التقدير في المرجع التالي:

KAHN, A.L., PRABHU, V.K. and TURIN, W. [1991] Shadowing algorithms in estimating ground scatter interference. Conf. Record, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '91).

الملحق 2

حساب لمساحة رباعي أضلاع على وحدة الكرة

تعطي العبارة التالية مساحة رباعي الأضلاع، D_0

$$D_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - 2\pi \tag{28}$$

حيث A_1 وA_2 وA_3 وA_4 هي زوايا رباعي الأضلاع على وحدة الكرة.

وتساوي الزاوية A_i الزاوية بين المستويين اللذين يتضمنان مركز الكرة والدائرتين العظمتين اللتين تشكلان الزاوية. ويمكن الحصول على الزاوية من خلال المعادلة التالية:

$$\cos A_i = \frac{N_j \cdot N_k}{N_j \cdot N_k} \tag{29}$$

حيث N_j وN_k هما المتجهان المتعامدان للمستويين وN_j وN_k طولهما. ويحدد هذان المتجهان كأنهما الناتج البيني للمتجهين الشعاعيين للنقاط المقابلة على سطح الكرة. فعلى سبيل المثال، إذا كان r_i يمثل المتجه الشعاعي للرأس A_i.

$$\cos A_2 = \frac{(r_2 \times r_1) \cdot (r_3 \times r_2)}{|r_2 \times r_1| \cdot |r_3 \times r_2|} \tag{30}$$

وإذا نظرنا إلى الإحداثيات الديكارتية والكروية التي يكون مصدرها مركز الكرة من أجل اشتقاق معادلات واضحة، فيمكن أن يعبر عن المتجه الشعاعي للنقطة A_i على وحدة الكرة على النحو التالي:

$$r_i = \{\cos \varphi_i \sin \theta_i, \cos \varphi_i \cos \theta_i, \sin \varphi_i\} \tag{31}$$

ويساوي الناتج البيني لهذين المتجهين:

$$r_{ij} = r_i \times r_j = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\} \tag{32}$$

حيث:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j - \cos \varphi_j \cos \theta_j \sin \varphi_i \\ y_{ij} &= \cos \varphi_j \sin \theta_j \sin \varphi_i - \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j \\ z_{ij} &= \cos \varphi_i \sin \theta_i \cos \varphi_j \cos \theta_j - \cos \varphi_j \sin \theta_j \cos \varphi_i \cos \theta_i \end{aligned} \tag{33}$$

وتعطي العلاقة التالية الناتج الداخلي للناتجين البينيين في المعادلة (30):

$$r_{ij} \cdot r_{kl} = x_{ij} x_{kl} + y_{ij} y_{kl} + z_{ij} z_{kl} \tag{34}$$

وطول المتجه:

$$r_{ij} = \left(x_{ij}^2 , + y_{ij}^2 + z_{ij}^2\right)^{1/2} \tag{35}$$

الملحق 3

طريقة بديلة لحساب المساحة الفعالة والحجب الصغري

يمكن، بالنسبة إلى زوايا الإطلاق الصغيرة وإلى التغيرات الصغيرة في السمت داخل منطقة مثلثية مماثلة كما هو مبين في الشكل 4، أن يحدد الحجب الصغري تحديداً تقريبياً عبر فرز لرؤوس المثلث وفقاً للسمت: $P_1(\rho_1, \varphi_1, \theta_1)$، $P_2(\rho_2, \varphi_2, \theta_2)$، $P_3(\rho_3, \varphi_3, \theta_3)$.

$$\theta_1 \le \theta_2 \le \theta_3 \tag{36}$$

ويحدد استعمال الاستكمال الداخلي الخطي إحداثيات النقطة P_x التي تقع عند السمت θ_2 على الخط الذي يوصل P_1 وP_3. وإذا وقعت النقطة P_2 إلى أبعد من النقطة P_x بالنسبة إلى الهوائي وكان ارتفاعها أدنى من ارتفاع النقطة P_x، تكون المساحة محجوبة حجباً صغرياً. وتكون المساحة محجوبة حجباً صغرياً كذلك، إذا وقعت النقطة P_2 إلى أقرب من الهوائي مما هي عليه النقطة P_x وكان ارتفاعاً أعلى من ارتفاع النقطة P_x.

ويعرف ارتفاع النقطة P_2 ناقص ارتفاع النقطة P_x على أنه القيمة $\Delta\varphi$، وتعرف $\Delta\rho$ بأنها القيمة التي تمثل تجاوز مسافة النقطة P_2 بالنسبة إلى الهوائي لمسافة النقطة P_x من الهوائي. ويكون شرط الحجب الصغري للخلية على النحو التالي:

$$\Delta\rho \cdot \Delta\varphi \le 0 \tag{37}$$

حيث:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \frac{\theta_3 \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \rho_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \frac{\theta_3 \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \varphi_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1} \tag{38}$$

ويمكن أن تقدر المساحة الفعالة المسقطة على المثلث تقديراً تقريبياً على النحو التالي:

$$B_e = \frac{\rho^2 \cos\varphi}{2} |\Delta A| \tag{39}$$

حيث ρ هي المسافة بين الهوائي والمثلث العنصري، و:

$$\Delta A = (\theta_3 - \theta_1)\, \Delta\varphi \tag{40}$$

وبهذا، يمكن أن تستعمل القيمة $\Delta\varphi$ للحجب الصغري ولتقدير المساحة المسقطة كذلك. وتجدر الإشارة إلى أن θ تقاس بالأرقام الثنائية وأن المثلثات العنصرية ضعيفة الاتساع بالسمت، ومن ثم يجب أي يخفض أي فرق $(\theta_i - \theta_j)$ في المعادلتين (38) و(40) بمقدار 2π إذا تجاوز π.

_____