**التوصيـة ITU-R  P.834-9  
(2017/12)**

**آثار الانكسار التروبوسفيري   
على انتشار الموجات الراديوية**

**السلسلة P**

**انتشار الموجات الراديوية**

**تمهيـد**

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](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** | **العنـوان** |
| **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 الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة | |
| **P انتشار الموجات الراديوية** | |
| **RA** علم الفلك الراديوي | |
| **RS** أنظمة الاستشعار عن بُعد | |
| **S** الخدمة الثابتة الساتلية | |
| **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، 2018

© ITU 2018

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).

التوصيـة [[1]](#footnote-1)\*ITU-R P.834-9

آثار الانكسار التروبوسفيري على انتشار الموجات الراديوية

(المسألة ITU-R 201/3)

 (2017-2016-2015-2007-2005-2003-1999-1997-1994-1992)

مجال التطبيق

تقدم التوصية ITU-R P.834 طرائق حساب آثار الانكسار واسعة النطاق في الجو، بما في ذلك انحناء الشعاع وطبقات التوصيل ونصف قطر الأرض الفعال وزاوية الارتفاع الظاهري وزاوية التسديد للمسارات أرض-فضاء والطول الفعّال للمسير الراديوي.

مصطلحات أساسية

طول المسير التروبوسفيري الزائد، وصلة أرض-فضاء، النظام العالمي للملاحة الساتلية، منتج مناخي عددي، خرائط رقمية

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

*أ )* أن التخطيط الملائم لوصلات الأرض والوصلات أرض-فضاء مرهون بتوفر إجراءات حساب مناسبة لتقييم آثار الانكسارية على الإشارات الراديوية؛

*ب)* أن إجراءات طورت لحساب بعض آثار الانتشار الانكساري على الإشارات الراديوية على وصلات الأرض والوصلات أرض-فضاء،

توصـي

باستعمال المعلومات الواردة في الملحق 1 لحساب آثار الانكسار واسعة النطاق.

الملحـق 1

# 1 انحناء الأشعة

ينحني شعاع راديوي يعبر المنطقة الدنيا (غير المتأينة) للجو بوجود تدرج لمؤشر الانكسار. وبما أن مؤشر الانكسار يتغير أساساً مع الارتفاع، ففي معظم الحالات لا يُؤخذ في الاعتبار سوى التدرج العمودي لمؤشر الانكسار. وعندئذ يكون الانحناء عند نقطة ما متضمناً في المستوي العمودي ويُعبر عنه بواسطة:

 (1)

حيث:

ρ: نصف قطر انحناء مسير الشعاع

*n*: مؤشر الانكسار الجوي

d*n*/d*h*: التدرج العمودي لمؤشر الانكسار

*h*: ارتفاع النقطة فوق سطح الأرض

ϕ: زاوية مسير الشعاع مع المستوي الأفقي عند النقطة قيد النظر.

يُحدد انحناء الأشعة على أنه موجب عندما يكون تقعره موجهاً نحو سطح الأرض. ولا تتوقف هذه الظاهرة عملياً على التردد وحده إذا كان تدرج المؤشر لا يتغير بكيفية مهمة على مسافة تساوي طول الموجة.

# 2 نصف قطر الأرض الفعّال

إذا كان المسير أفقياً تقريباً، تكون ϕ قريبة من صفر. ولكن، بما أن *n* قريبة جداً من 1، فإن المعادلة (1) تُبسط على النحو التالي:

 (2)

لذلك فمن الواضح أنه إذا كان التدرج العمودي ثابتاً، فإن المسيرات تكون أقواس دائرة.

وإذا كان المظهر الجانبي للانكسارية بالاستناد إلى الارتفاع خطياً، أي تدرج الانكسارية ثابت على طول مسير الشعاع، يمكن حدوث تحول يسمح باعتبار الانتشار مستقيماً. ويشكل التحول دراسة أرض افتراضية ذات نصف قطر فعال *Re = k a*، معبراً عنه بواسطة:

 (3)

حيث *a* تدل على نصف قطر الأرض الحقيقي، وحيث *k* هو عامل نصف قطر الأرض الفعال (عامل *k*). ومع هذا التحول الهندسي، تكون مسارات الشعاع خطية بمعزل عن زاوية الارتفاع.

وبدرجة أكبر من الدقة، لا يكون تدرج الانكسارية ثابتاً إلا إذا كان المسير أفقياً. وفي الواقع العملي يمكن أن يمثل النموذج الأسي للمظهر الجانبي لمؤشر الانكسار الوسطي (انظر التوصية رقم ITU-R P.453) - بالنسبة للارتفاعات التي تقل عن m 1 000 - بشكل تقريبي عن طريق نموذج خطي. ويكون العامل *k* المقابل هو *k* = 4/3.

# 3 مؤشر الانكسار المعدّل

بالنسبة لبعض التطبيقات، مثلاً فيما يخص ترسيم الشعاع، يُستعمل مؤشر انكسار معدل أو وحدة انكسار معرّفة في التوصية ITU‑R P.310. وتُعطى وحدة الانكسار *M* بواسطة:

 (4)

حيث *h* ارتفاع النقطة المعنية معبراً عنه بالأمتار و*a* نصف قطر الأرض معبراً عنه بآلاف الكيلومترات. ويسمح هذا التحويل بالرجوع إلى الانتشار فوق سطح أرض منبسطة يعلوها جو تعادل انكساريتها فيه وحدة الانكسار *M*.

# 4 زاوية نقطة التسديد الظاهرية على المسيرات المائلة

## 1.4 مقدمة

في دراسات التقاسم، من الضروري تقييم زاوية الارتفاع الظاهرية لمحطة فضائية تأخذ الانكسار الجوي في الحسبان. وتُعطى فيما يلي طريقة حساب مناسبة.

## 2.4 رؤية المحطة الفضائية

كما هو موصوف في الفقرة 1 أعلاه، فإن حزمة راديوية مرسلة من محطة على سطح الأرض (ارتفاع (km) *h* وزاوية ارتفاع θ (بالدرجات)) تُحنى نحو الأرض نظراً لأثر الانكسار الجوي. ويمكن تقييم تصحيح الانكسار، τ (بالدرجات)، بواسطة التكامل التالي:

 (5)

حيث تحدد ϕ على النحو التالي على أساس قانون سنيل (Snell) بإحداثيات قطبية:

 (6)

 (7)

*r*: نصف قطر الأرض (km 6 370)

*x*: الارتفاع (km).

وبما أن انحناء الشعاع يتوقف إلى حد كبير على الجزء المحدد بواسطة الجزء الأدنى للجو، يمكن حساب مؤشر الانكسار لجو نمطي عند ارتفاع *x* انطلاقاً من المعاملات التالية:

 (8)

حيث:

= *a* 0,000315

= *b* 0,1361.

ويقوم هذا النموذج على النموذج الجوي الأسّي المعرف في التوصية ITU-R P.453 لانتشار الأرض. وإضافة إلى ذلك فإن *n′(x)* مشتقة من *n(x)*، أي *n′(x) = -ab* exp *(-bx)*.

وقد تم تقييم τ (*h*, θ) (بالدرجات) بافتراض الجو المرجعي؛ ويبدو أن الصيغة الرقمية التالية تعطي تقريباً جيداً:

τ (*h*, θ)  1/[1,314  0,6437 θ  0,02869 θ2  *h* (0,2305  0,09428 θ  0,01096 θ2)  0,008583 *h*2] (9)

وتم الحصول على هذا التقريب من أجل (0 ≤ *h* ≤ 3 km) و(θ*m* ≤ θ ≤ 10°)، حيث θ*m*، الزاوية التي تُعترض فقط عندها الحزمة الراديوية بواسطة سطح الأرض، وتُعطى بواسطة:

 (10)

أو، بالتقريب،  (بالدرجات).

وتعطي المعادلة (9)كذلك تقريباً معقولاً من أجل (°90 > °θ >°10).

ولتكن θ0 (بالدرجات) هي زاوية ارتفاع محطة فضائية في ظروف الانتشار في الفضاء الحر ولتكن θ*m* زاوية الارتفاع الدنيا لمحطة عند سطح الأرض لا يعترض فيها سطح الأرض لحزمتها الراديوية. ويكون حد تصحيح الانكسار المقابل لقيمة θ*m* هو τ (*h*, θ*m*). وبذا لا تكون المحطة الفضائية مرئية إلا عندما يكون عدم التساوي التالي صحيحاً:

 (11)

## 3.4 تقييم زاوية الارتفاع الظاهرية

عندما يكون عدم التساوي (11) صحيحاً، يمكن حساب زاوية الارتفاع الظاهرية، θ (بالدرجات)، التي تأخذ الانكسار الجوي في الاعتبار، مع حل المعادلة التالية:

 (12)

ويكون حل المعادلة (12) كما يلي:

 (13)

حيث قيم τ*s* (*h*, θ0) شبيهة بقيم τ (*h*, θ)، لكن يُعبر عنها كدالة لقيمة θ0.

وتعطي الصيغة الرقمية التالية تقريباً جيداً للدالة τ*s* (*h*, θ0) (بالدرجات):

τ*s* (*h*, θ0)    1/[1,728  0,5411 θ0  0,03723 θ02  *h* (0,1815  0,06272 θ0   
  0,01380 θ02)  *h*2 (0,01727  0,008288 θ0)] (14)

وقيمة θ المحسوبة بواسطة المعادلة (13) هي زاوية الارتفاع الظاهرية.

## 4.4 تلخيص عمليات الحساب

*المرحلة 1*: زاوية ارتفاع محطة فضائية في ظروف الانتشار في الفضاء الحر يُشار إليها بواسطة θ0.

*المرحلة 2*: باستعمال المعادلتين (9) و(10)، نتفحص ما إذا كان عدم التساوي (11) صحيحاً. وإذا لم يكن الأمر كذلك، فإن الساتل ليس مرئياً وينتج عن ذلك عدم ضرورة أي حساب آخر.

*المرحلة 3*: إذا كان عدم التساوي (11) صحيحاً، تُحسب θ بواسطة المعادلتين (13) و(14).

## 5.4 النتائج المقيسة لزاوية التسديد الظاهرية

يقدم الجدول 1 قيماً متوسطة للانحراف الزاوي للانتشار عبر الجو بكامله. ويعطي تلخيصاً للمعطيات التجريبية المحصل عليها بواسطة تقنيات الرادار وبواسطة مقياس إشعاع تلسكوب راديوي. ونلاحظ تقلبات لزاوية الارتفاع الظاهرية بسبب التغيرات المحلية لبنية مؤشر الانكسار.

الجـدول 1

قيم الانحراف الزاوي للانتشار عبر الجو بكامله

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| زاوية الارتفاع، θ  (بالدرجات) | متوسط الانحراف الزاوي الإجمالي، Δθ (بالدرجات) | | | |
| هواء قاري قطبي | هواء قاري معتدل | هواء بحري معتدل | هواء بحري استوائي |
| 1 | 0,45 | - | - | 0,65 |
| 2 | 0,32 | 0,36 | 0,38 | 0,47 |
| 4 | 0,21 | 0,25 | 0,26 | 0,27 |
| 10 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,14 |
| 20 |  | 0,05 | 0,06 |  |
| 30 |  | 0,03 | 0,04 |  |
|  | التغيرات اليومية في Δθ (للعمودين 1 و4 فقط) | | | |
| 1 | 0,1     جذر متوسط التربيع | | | |
| 10 | 0,007 جذر متوسط التربيع | | | |

# 5 خسارة تمديد الحزمة لانتشار الموجة في الجو

خسارة تمديد الحزمة () هي خسارة غير أومية ناجمة عن تمديد حزمة الهوائي في مستوى الارتفاع الرأسي نتيجةً لتغير دليل الانكسار الراديوي مقابل الارتفاع. وهذا التأثير طفيف جداً بالنسبة إلى زوايا الارتفاع فوق °5.

وخسارة الإشار الناجمة عن تمديد الحزمة لانتشار الموجة عبر الجو بكامله في الاتجاهين أرض-فضاء وفضاء-أرض هي:

 (dB) (15)

حيث:

(16)

حيث:

θ0: زاوية ارتفاع الخط الواصل بين نقطتي الإرسال والاستقبال، مقدرة بالدرجات (º10 > θ0)

*h:* ارتفاع أدنى نقطة عن مستوى سطح البحر، مقدراً بالكيلومترات (km 3 > *h*)

# 6 طول المسير الراديوي الزائد وتغيراته

بما أن مؤشر الانكسار التروبوسفيري أعلى من 1 ويتغير مع الارتفاع، فإن طول المسير الراديوي لموجة تنتشر بين الأرض وساتل ما يكون أكبر من طول المسير الهندسي. ويُعطى الطول الزائد بواسطة التكامل التالي:

 (17)

حيث:

*s*: الطول على مدى المسير

*n*: مؤشر الانكسار

*A* و*B*: طرفا المسير.

ولا يمكن استعمال المعادلة (17) إلا إذا كان تغير مؤشر الانكسار *n* على طول المسير معروفاً.

عندما تكون درجة الحرارة *T* والضغط الجوي *P* والرطوبة النسبية *H* عند سوية الأرض معروفة، يمكن حساب طول المسير الزائد Δ*L* حسب الطريقة شبه التجريبية المعبر عنها فيما يلي، والتي استُخلصت من المنحنيات المحصل عليها بواسطة السبر الراديوي الجوي خلال حملة قياسات عام واحد أُجريت في 500 محطة أرصاد جوية في 1979. وفي هذه الطريقة، تكون العبارة العامة لطول المسير الزائد Δ*L* هي:

 (18)

حيث:

0ϕ: زاوية الارتفاع عند نقطة الرصد

Δ*LV*: طول المسير العمودي الزائد

*k* وδ (ϕ0, Δ*LV*­): المعلمات التصحيحية التي يُستعمل لحسابها النموذج الجوي الأُسّي.

ويأخذ العامل *k* في الحسبان تغير زاوية الارتفاع على طول المسير. ويعبر الحد δ (ϕ0, Δ*LV*) عن آثار الانكسار (المسير ليس خطاً مستقيماً). ويكون هذا الحد دائماً صغيراً جداً، ما عدا عند زاوية الارتفاع المنخفضة جداً ويُهمل في الحساب؛ وهو ينطوي على خطأ cm 3,5 فقط لزاوية ϕ0 ذات  °10وmm 0,1 لزاوية ϕ0 ذات °45. ونلاحظ من جانب آخر أنه عند زوايا ارتفاع صغيرة جداً لا تكون المعلمة δ بالنسبة لها قابلة للإهمال، فإن فرضية جو مستو في طبقات، يشكل أساس كل طرائق حساب طول المسير الزائد، لا تبقى مقبولة.

يُعطى طول المسير العمودي الزائد (m) بواسطة المعادلة التالية:

*LV*  0,00227 *P*  *f* (*T*) *H* (19)

في الحد الأول من الجزء الأيمن من المعادلة (19)، *P* هي الضغط الجوي (hPa) عند نقطة الرصد.

في الحد الثاني ذي الطبيعة التجريبية، *H* هي الرطوبة النسبية (%)؛ تُعطى دلالة درجة الحرارة *f*(*T*)، التي تتوقف على الموقع الجغرافي، بواسطة المعادلة التالية:

*f* (*T*)  *a* 10*bT* (20)

حيث:

*T* يُعبر عنها بواسطة °C

*a* يُعبر عنها بواسطة m/% للرطوبة النسبية

*b* يُعبر عنها بواسطة °C-1.

وتُعطى في الجدول 2 المعلمتان *a* و*b* اللتان تتوقفان على الموقع الجغرافي.

الجدول 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| الموقع | *a* (m/%) | *b* (°C–1) |
| مناطق ساحلية (جزر أو أماكن تقع على أقل من km 10 من الساحل) | 5,5 × 10–4 | 2,91 × 10–2 |
| مناطق استوائية غير ساحلية | 6,5 × 10–4 | 2,73 × 10–2 |
| كل المناطق الأخرى | 7,3 × 10–4 | 2,35 × 10–2 |

لحساب العامل التصحيحي *k* للمعادلة (18)، نفترض تغيراً أسياً بارتفاع *h* للانكسارية الجوية *N*:

*N*(*h*)  *Ns* exp (– *h* / *h*0) (21)

حيث *Ns* هي متوسطة قيمة الانكسارية عند سطح الأرض (انظر التوصية ITU-R P.453) و*h*0 تُعطى بواسطة:

 (22)

عندها تُحسب *k* من العبارة التالية:

 (23)

حيث *ns* و*n* (*h0*) هما قيمتا مؤشر الانكسار عند سطح الأرض وعند الارتفاع *h*0 (المعطاة بواسطة المعادلة (22)) على التوالي، و*rs* و*r* (*h*0) هما المسافتان المقابلتان لمركز الأرض.

وبالنسبة للمسيرات أرض-فضاء ذات زوايا ارتفاع θ، يمكن التعبير عن طول المسير التروبوسفيري الزائد *L*()، (m) على أنه مجموع المكون الهيدروستاتي والمكون الرطب *LH*() و*LW*():

ويمكن إسقاط طول المسير الزائد عبر طول مسير عمودي، *LHv* و*LWv إلى زاوية الارتفاع،* θ الأعلى من °10 باستعمال دالتي تقابل منفصلتين من أجل المكون الهيدروستاتي والمكون الرطب، *mH*() و*mW*():

m (24)

يمكن استنباط المكون العمودي الهيدروستاتي عند سطح الأرض، *LHvs* باستعمال المعادلة التالية:

m (24a)

ويمكن استنباط المكون العمودي الرطب عند سطح الأرض، *LWvs* باستعمال المعادلة التالية:

m (24b)

حيث:

*ps*،:*es* الضغط الكامل للهواء والضغط الجزئي لبخار الماء على سطح الأرض (hPa)

:*Tms* متوسط درجة حرارة عمود بخار الماء على السطح (K)

:λ عامل انخفاض ضغط البخار

:*Rd* = *R*/*Md* (J/kg K) 287,0

:*R* الثابت *الجزيئي الغرامي* للغاز 8,314 = (J/mol K)

:*Md* الكتلة الجزيئية الغرامية للهواء الجاف = (g/mol) 28,9644

= *k*1 (K/hPa) 77,604

= *k*2 (K2/hPa) 373 900

= *gms* *gm*(*hs*)

= *gm*(*h*) 9,784 ⋅ (1 – 0,00266 ⋅ cos (2 ⋅ lat) – 0,00028 ⋅ *h*)

= تسارع الجاذبية عند مركز ثقل الهواء من الارتفاع *h* (m/s2)

:*lat* خط العرض (راديان)

:*hs* ارتفاع سطح الأرض فوق متوسط سطح البحر (a.m.s.l.) (km).

:*h* ارتفاع المستقبِل فوق متوسط سطح البحر (a.m.s.l.) (km).

وبالنسبة للمستقبِلات الواقعة على ارتفاع *h* مختلف عن ارتفاع السطح *hs*، يُعطى المكون الهيدروستاتي والمكون الرطب *LHv*(*h*) و*LWv*(*h*) باستعمال المعادلتين التاليتين:

m (25a)

m (25b)

حيث:

يمكن استنباط قيم معلمات الأرصاد الجوية عند الارتفاع *h*، *Tm*(*h*) و *e*(*h*)و *p*(*h*)من القيم عند سطح الأرض، *Tms* و*es* و*ps*، عن طريق استخدام المعادلات التالية:

K                 (26a)

hPa             (26b)

hPa                       (26c)

حيث:

= α*m* معدل هبوط متوسط درجة حرارة بخار الماء من سطح الأرض (K/km)

*=T*s درجة حرارة الهواء عند سطح الأرض (K) = K                (26d)

= α معدل هبوط متوسط درجة حرارة الهواء من سطح الأرض

          K/km (26e)

 = Rd /1000 = 0,287                J/(g K) (26f)

= *g* التسارع بسبب الجاذبية عند سطح الأرض m/s2 = 

ويمكن استخلاص جميع معلمات دخل النموذج *ps* و*es* *Tms* وλ وα*m* من خلال افتراض أن معلمات الأرصاد الجوية تتميز بتقلب موسمي.

 (27a)

حيث:

:*Xi* *ps*, *es*, *Tms*, λ أو α*m*. المؤشر *i* ، 1 يشير إلى *ps*، 2 يشير إلى *es*، 3 يشير إلى *Tms*، 4 يشير إلى ، 5 يشير إلى α*m*

:*a*1*i* القيمة الوسطية للمعلمة

:*a*2*i* التقلب الموسمي للمعلمة

:*a*3*i* يوم من القيمة الدنيا للمعلمة

:*Dy* *يوم من السنة (*1*،* 2*،* ...، 365,25)، = 1 1 يناير، = 32 1 فبراير، = 60,25 1 مارس.

وتم حساب المعامِلات *a*1 و*a*2 و*a*3 للمعلمات *ps* و*es* و*Tms* وλ وα*m* وارتفاع السوية المرجعية *href* التي تشكل جزءاً لا يتجزأ من هذه التوصية وهي متاحة في شكل خرائط رقمية مقدمة في الملف [R‑REC‑P.834‑9‑201712-I!!ZIP-E](http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-9-201712-I/en).

والبيانات من º0 إلى º360 في خطوط الطول ومن º90+ إلى º90– في خطوط العرض وذات استبانة تبلغ º1,5 في كل من خطوط الطول والعرض. ويمكن استنباط طول المسير الزائد عند أي موقع مطلوب وعند أي ارتفاع فوق سطح الأرض، *h* باتباع الأسلوب التالي:

أ ) تحديد المعامِلات *a*1iو*a*2iو*a*3i لكل معلمة من المعلمات الخمس، *ps* و*es* و*Tms* وλ وα*m* والسوية المرجعية *href* من الخرائط الرقمية عند أقرب أربع نقاط شبكية إلى الموقع المطلوب.

ب) حساب قيم المعلمات الخمس *ps* و*es* و*Tms* وλ وα*m* عند الارتفاع المرجعي *href* في أحد أيام السنة *D*y،  و   
و و في أقرب أربع نقاط شبكية، باستعمال المعادلة (27) مع المعاملات *a*1i و*a*2i و*a*3i لكل نقطة شبكية، أي و و و و و، حيث i = 1} و2 و3 و{4. ويلاحظ أن الرمز العلوي i يمثل رقم النقطة الشبكية وليس الأس.

ج) حساب قيمة المعلمات الثلاث، و و عند النقاط الشبكية الأربع على الارتفاع *h* كالتالي:

K      (27b)

hPa      (27c)

hPa      (27d)

K      (27e)

K/km         (27f)

m/s2        (27g)

د ) حساب القيمتين *LiHv*(*h*) و*LiWv*(*h*) عند أقرب النقاط الشبكية الأربع على الارتفاع *h*، باستعمال المعادلتين (25a) و(25b) مع القيم *pi*(*h*) و*ei*(*h*) و*Tim*(*h*) لكل نقطة من نقاط الشبكة.

m      (27h)

m      (27i)

حيث:

*gim*(*h*)=9,784 ⋅ (1 – 0,00266 ⋅ cos (2 ⋅ *lat*i) – 0,00028 ⋅ *h*)      m/s2 (27j)

ﻫ ) حساب القيمتين *LHv*(*h*) و*LWv*(*h*) عند الارتفاع *h*، في الموقع المطلوب بإجراء استكمال داخلي ثنائي الخطية للقيمتين *LiHv*(*h*) و*LiWv*(*h*) عند أقرب أربع نقاط شبكية على النحو المبين في التوصية ITU-R P.1144.

و ) حساب قيمة طول المسير التروبوسفيري الزائد عند زاوية الارتفاع  على الارتفاع *h* في الموقع المطلوب، *L*(*h,*) باستعمال المعادلة(24) .

وقد اختبرت دقة النموذج المقترح عن طريق استخدام المسبار الراديوي والنظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS) والقياسات الراديوية لتحديد القيمة *Lvs* ، وتتراوح قيم عدم اليقين بين 2 و6 سنتمترات على نطاق العالم. وإذا كانت هناك حاجة إلى دقة أكبر، فإنه يمكن استخدام قياسات محلية متوافقة للضغط الكامل للهواء وضغط بخار الماء كمدخلات للنموذج.

وتُعطى دالة التقابل للمكونين الهيدروستاتي والرطب *mh*() و *mw*() بالمعادلتين التاليتين:

                 (28a)

                 (28b)

حيث:



*b*h = 0,0029

*b*w = 0,00146

*c*w = 0,04391

 (28c)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| نصف الكرة الأرضية | *c*1 | *c*10 | *c*11 | ψ |
| الشمالي | 0,062 | 0,001 | 0,005 | 0 |
| الجنوبي | 0,062 | 0,002 | 0,007 | π |

 (28d)

 (28e)

وتشكل المعامِلات *A*0*h* و *A*1*h*و *A*2*h*و *B*1*h*و *B*2*h*و *A*0*w*و *A*1*w*و *A*2*w*و *B*1*w*و *B*2*w*جزءاً لا يتجزأ من هذه التوصية وتتاح في شكل خرائط رقمية في الملف [R‑REC‑P.834‑9‑201712‑I!!ZIP-E](http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-9-201712-I/en). وتُحسب قيم المعلمتين *ah* و *aw*في الموقع المطلوب بأداء استكمال داخلي الخطية لقيم هذه المعاملات عند النقاط الشبكية الأربع على النحو المبين في التوصية ITU-R P.1144.

وفيما يتعلق بحالة وصلة أرض-فضاء ذات زوايا ارتفاع θ أكبر من °20، يمكن تقريب دالتي التقابل المعطاة بالمعادلتين (28a) و(28b) من خلال المعادلة التالية:

 (28f)

وعند تطبيق هذا النموذج، يوصى باستعمال إما المعادلتين (28a) و(28b) أو المعادلة (28f) على نحو متسق مع جميع زوايا الارتفاع.

الشكل 1

خريطتان تطهران متوسط زيادة تأخر انتشار المسير عن المستوى المرجعي في شهري يناير ويوليو



خط العرض (بالدرجات)

خط الطول (بالدرجات)

15 يوليو

خط الطول (بالدرجات)

طول المسير الزائد (بالأمتار)

15 يناير

خط العرض (بالدرجات)

**الملاحظة 1** - تُتاح إجراءات Matlab التي تنفذ النموذج الذي تبيّنه مجموعة بيانات المعادلات (22) إلى (24) على الموقع الإلكتروني لقطاع الاتصالات الراديوية في القسم المخصص للجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية.

# 7 الانتشار عبر طبقات الغلاف الجوي

ملاحظة 1 – تتوفر الإجراءات Maltab التي تنطبق على النموذج الذي تصفه مجموعة معطيات المعادلات من (22) إلى (24) في موقع قطاع الاتصالات الرادوية الإلكتروني المعني بأعمال لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية.

خط الطول (بالدرجات)

هناك مسارات للانتشار كلما كان التدرج العمودي للانكسارية عند ارتفاع وموقع معينين أصغر من N/km 157−.

إن وجود المسارات مهم لأنه يمكن أن يسبب انتشاراً راديوياً غير عادي، خاصة على وصلات أرض أو وصلات أرض-فضاء مع زاوية ارتفاع ضعيفة جداً. وتشكل المسارات آلية تسمح للإشارات الراديوية ذات ترددات عالية بما يكفي بالانتشار بعيداً جداً ما وراء مسافة خط البصر العادية، ومن ثم خطر التداخل مع خدمات أخرى (انظر التوصية ITU-R P.452). وهي تلعب فيما عدا ذلك دوراً مهماً في ظواهر التداخل عبر مسيرات متعددة (انظر التوصية ITU-R P.530) ولو كان وجودها لا يكفي أو غير كافٍ لملاحظة ظواهر الانتشار عبر مسيرات متعددة على وصلة معينة.

## 1.7 تأثير زاوية الارتفاع

عندما يكون هوائي إرسال يقع داخل مسار راديوي ذي طبقات أفقية، فإن الأشعة المرسلة عند زوايا ارتفاع ضعيفة جداً يمكن أن "تُحبس" داخل المسار. في الحالة المبسطة لمظهر جانبي انكساري "عادي" فوق مسار سطحي ذي تدرج انكسار ثابت، فإن زاوية الارتفاع الحرجة (rad) α لكي تُحبس الأشعة، تُعطى بواسطة المعادلة:

 (29)

حيث *dM*/d*h* هي التدرج العمودي للانكسارية المعدّلة  وΔ*h* هي سُمك المسار الذي يقابل ارتفاع ذروة المسار فوق هوائي الإرسال.

ويعطي الشكل 2 زاوية الارتفاع القصوى لكي "تُحبس" أشعة في المسار. وترتفع زاوية "الحبس" القصوى بسرعة مع مرور تدرجات الانكسارية تحت N/km 157− (أي عندما ترتفع معدلات التغير) أو عندما يزيد سمك المسار.

## 2.7 أدنى تردد "للحبس"

إن وجود مسار، وإن كان في موقع جيد، لا يعني بالضرورة أن الطاقة ستُقترن بفعالية في المسار بحيث يكون هناك انتشار على مسافات طويلة. وإضافة إلى كون تردد الموجة يجب أن يحترم زاوية الارتفاع القصوى، فإنه يجب أن يكون أعلى من قيمة حرجة محددة بواسطة العمق المادي للمسار والمظهر الجانبي للانكسارية. وتحت هذا التردد الأدنى للحبس، تكون هناك تسربات متزايدة للطاقة عبر حدود المسار.

ومن الممكن تقييم التردد الأدنى لكي تُحبس موجة في مسار تروبوسفيري باستعمال تكامل للطور. ويبين الشكل 4 تردد الحبس الأدنى لمسار سطحي (المنحنيات المتصلة) حيث يتم افتراض أن تدرج انكسارية ثابت (سالب) يمتد من السطح إلى ارتفاع معين، مع مظهر جانبي "معياري" فوق هذا الارتفاع. وبالنسبة للترددات المستعملة مع أنظمة الأرض (على العموم بين 8 وGHz 16)، يجب أن يكون للمسار سمك أدنى بين حوالي 5 وm 15 وتردد الحبس الأدنى، *fmin*، يتوقف كثيراً على سُمك المسار وتدرج مؤشر الانكسار.

وفي حالة المسارات المرفوعة، تدخل في الاعتبار معلمة أخرى، حتى بالنسبة للحالة البسيطة المتعلقة بمظهر جانبي خطي للانكسارية. تأخذ هذه المعلمة في الاعتبار شكل المظهر الجانبي لمؤشر الانكسار تحت تدرج المسار. وتدل المنحنيات المتقطعة في الشكل 4 على تردد الحبس الأدنى لمسار ذي تدرج ثابت يقع فوق طبقة سطحية ذات تدرج انكسارية معيارية لا يقل عن N/km 40−.

الشكل 2

الزاوية القصوى للحبس لمسار سطحي له تدرج انكسارية ثابت  
فوق أرض كروية



تدرج الانعكاسية = (N/Km)

زاوية الحبس الحرج (mrad)

زاوية الحبس الحرج (بالدرجات)

سماكة المجرى = m100

وبالنسبة لطبقات لها معدلات تغير أعلى بقدر بسيط من الحد الأدنى المطلوب لوجود انتشار عبر المسار، يكون تردد الحبس الأدنى في الواقع أعلى من التردد الملاحظ في حالة مسار سطحي. وبالنسبة لجميع تدرجات المسار، فإنه من أجل الحبس في المسار المرفوع، لا بد من طبقة أرق بكثير مما هو الحال في المسار السطحي لتدرج مكافئ بالنسبة لأي تردد.

الشكل 3

التردد الأدنى للحبس في مسارات راديوية جوية  
لتدرجات الانكسارية الثابتة



تردد الحبس (GHz)

     سماكة الطبقة (m)

مسارات قائمة على السطح

مسارات مرفوعة فوق المظهر الجانبي المعياري للانعكاسية

1. \* أجرت لجنة الدراسات 3 تعديلات صياغية على هذه التوصية في 2020 طبقاً للقرار ITU‑R 1. [↑](#footnote-ref-1)