

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

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

آثار الانكسار التربووسفيري على انتشار الموجات الراديوية

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية



تهييد

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 مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياسية 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 تقدير الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهربائية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار 1 ITU-R. وترت الأستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لنقدم بيان عن البراءات أو للتصریح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <https://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.

سلال توقيعات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <https://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

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

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2018

*ITU-R P.834-9 التوصية

آثار الانكسار التربووسفيري على انتشار الموجات الراديوية

(المسألة 201/3)

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

مجال التطبيق

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

مصطلحات أساسية

طول المسير التربووسفيري 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 بتوفير 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،

توصي

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

الملاحق 1

1 إنحصار الأشعة

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

$$(1) \quad \frac{1}{\rho} = -\frac{\cos \varphi}{n} \frac{dn}{dh}$$

* أجرت لجنة الدراسات 3 تعديلات صياغية على هذه التوصية في 2020 طبقاً للقرار 1 ITU-R.

حيث:

- ρ : نصف قطر الخناء مسیر الشعاع
- n : مؤشر الانكسار الجوي
- dn/dh : التدرج العمودي مؤشر الانكسار
- h : ارتفاع النقطة فوق سطح الأرض
- φ : زاوية مسیر الشعاع مع المستوى الأفقي عند النقطة قيد النظر.

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

2 نصف قطر الأرض الفعال

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:

$$(2) \quad \frac{1}{\rho} = - \frac{dn}{dh}$$

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 مسیر الشعاع، يمكن حدوث تحول يسمح باعتبار الانتشار مستقيماً. ويشكل التحول دراسة أرض افتراضية ذات نصف قطر فعال $a = R_e / k$ ، معبراً عنه بواسطة:

$$(3) \quad \frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \frac{1}{R_e}$$

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 معزولة عن زاوية الارتفاع.

وبدرجة أكبر من الدقة، لا يكون تدرج الانكسارية ثابتاً إلا إذا كان المسير أفقياً. وفي الواقع العملي يمكن أن يمثل النموذج الأسني للمظهر الجانبي مؤشر الانكسار الوسطي (انظر التوصية رقم ITU-R P.453) - بالنسبة لارتفاعات التي تقل عن 1 000 m - بشكل تقريري عن طريق خوذج خطى. ويكون العامل k المقابل هو $k = 4/3$.

3 مؤشر الانكسار المعدل

بالنسبة لبعض التطبيقات، مثلاً فيما يخص ترسيم الشعاع، يُستعمل مؤشر انكسار معدل أو وحدة انكسار معرفة في التوصية ITU-R P.310. وتعطى وحدة الانكسار M بواسطة:

$$(4) \quad M = N + \frac{h}{a}$$

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 .

زاوية نقطة التسديد الظاهرية على المسيرات المائلة

4

مقدمة 1.4

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

رؤى المخطة الفضائية 2.4

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

$$(5) \quad \tau = - \int_h^\infty \frac{n'(x)}{n(x) \cdot \tan\varphi} dx$$

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

$$(6) \quad \cos\varphi = \frac{c}{(r + x) \cdot n(x)}$$

$$(7) \quad c = (r + h) \cdot n(h) \cdot \cos\theta$$

: نصف قطر الأرض (km 6 370)

: الارتفاع (km).

ويعاً 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:

$$(8) \quad n(x) = 1 + a \cdot \exp(-bx)$$

حيث:

$$0,000315 = a$$

$$0,1361 = b$$

ويقوم هذا النموذج على النموذج الجوي الأسّي المعروف في التوصية ITU-R P.453 لانتشار الأرض. وإضافة إلى ذلك فإن $n'(x) = -ab \exp(-bx)$.

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

$$(9) \quad \tau(h, \theta) = 1/[1,314 + 0,6437 \theta + 0,02869 \theta^2 + h(0,2305 + 0,09428 \theta + 0,01096 \theta^2) + 0,008583 h^2]$$

وتم الحصول على هذا التقرير من أجل ($0 \leq h \leq 3$ km) و($0 \leq \theta \leq 10^\circ$)، حيث θ_m ، الزاوية التي تُعرض فقط عندها الحزمة الراديوية بواسطة سطح الأرض، ونُعطي بواسطة:

$$(10) \quad \theta_m = -\arccos \left(\frac{r}{r+h} \cdot \frac{n(0)}{n(h)} \right)$$

أو، بالتقريب، $\sqrt{h} = -0,875 \theta_m$ (بالدرجات).

وتعطي المعادلة (9) كذلك تقريراً معقولاً من أجل $10^{\circ} \geq \theta > 90^{\circ}$.

ولتكن θ_0 (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 لجزمتها الراديوية. ويكون حد تصحيح الانكسار المقابل لقيمة θ_m هو $(h, \theta_m) \tau$. وبذا لا تكون المحطة الفضائية مرئية إلا عندما يكون عدم التساوي التالي صحيحاً:

$$(11) \quad \theta_m - \tau(h, \theta_m) \leq \theta_0$$

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:

$$(12) \quad \theta - \tau(h, \theta) = \theta_0$$

ويكون حل المعادلة (12) كما يلي:

$$(13) \quad \theta = \theta_0 + \tau_s(h, \theta_0)$$

حيث قيم (θ_0, τ_s) شبيهة بقيم (h, θ) ، لكن يعبر عنها كدالة لقيمة θ_0 .

وتعطي الصيغة الرقمية التالية تقريراً جيداً للدالة $(\theta_0, h) \tau_s$ (بالدرجات):

$$(14) \quad \begin{aligned} \tau_s(h, \theta_0) = 1/[1,728 + 0,5411 \theta_0 + 0,03723 \theta_0^2 + h (0,1815 + 0,06272 \theta_0 \\ + 0,01380 \theta_0^2) + h^2 (0,01727 + 0,008288 \theta_0)] \end{aligned}$$

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

4.4 تلخيص عمليات الحساب

المراحل 1: زاوية ارتفاع محطة فضائية في ظروف الانتشار في الفضاء الحر يُشار إليها بواسطة θ_0 .

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

المراحل 3: إذا كان عدم التساوي (11) صحيحاً، نحسب θ بواسطة المعادلتين (13) و(14).

5.4 النتائج المقيسة لزاوية التسديد الظاهرية

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

الجدول 1

قيم الانحراف الزاوي للانتشار عبر الجو بكماله

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

5 خسارة تدید الحرمة لانتشار الموجة في الجو

خسارة تدید الحرمة (A_{bs}) هي خسارة غير أومية ناجمة عن تدید حرمة الهوائي في مستوى الارتفاع الرئيسي نتيجةً لتغير دليل الانكسار الراديوی مقابل الارتفاع. وهذا التأثير طفيف جداً بالنسبة إلى زوايا الارتفاع فوق 5° .

وخسارة الإشار الناجمة عن تدید الحرمة لانتشار الموجة عبر الجو بكماله في الاتجاهين أرض-فضاء وفضاء-أرض هي:

$$(15) \quad (\text{dB}) A_{bs} = -10 \log(B)$$

حيث:

$$(16) \quad B = 1 - \frac{0,5411 + 0,07446\theta_0 + h(0,06272 + 0,0276\theta_0) + h^2 0,008288}{[1,728 + 0,5411\theta_0 + 0,03723\theta_0^2 + h(0,1815 + 0,06272\theta_0 + 0,0138\theta_0^2) + h^2(0,01727 + 0,008288\theta_0)]^2}$$

حيث:

θ_0 : زاوية ارتفاع الخط الواصل بين نقطتي الإرسال والاستقبال، مقدرة بالدرجات (${}^{\circ}10 > \theta_0 > 0$)

h : ارتفاع أدنى نقطة عن مستوى سطح البحر، مقدراً بالكيلومترات ($km 3 > h > 0$)

6 طول المسیر الرادیوی الزائد وتغیراته

بما أن مؤشر الانكسار التروبوسفيري أعلى من 1 ويتغير مع الارتفاع، فإن طول المسیر الرادیوی موجة تنتشر بين الأرض وسائل ما يكون أكبر من طول المسیر الهندسي. ويعطى الطول الزائد بواسطة التکامل التالي:

$$(17) \quad \Delta L = \int_A^B (n - 1) ds$$

حيث:

s : الطول على مدى المسیر

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 ΔL حسب الطريقة شبه التجريبية المعتبر عنها فيما يلي، والتي استخلصت من المنحنيات المحصل عليها بواسطة السير الراديوي الجوي خلال حملة قياسات عام واحد أُجريت في 500 محطة أرصاد جوية في 1979. وفي هذه الطريقة، تكون العبارة العامة لطول المسير الزائد ΔL هي:

$$(18) \quad \Delta L = \frac{\Delta L_V}{\sin \varphi_0 (1 + k \cot^2 \varphi_0)^{1/2}} + \delta(\varphi_0, \Delta L_V)$$

حيث:

φ_0 : زاوية الارتفاع عند نقطة الرصد

ΔL_V : طول المسير العمودي الزائد

$\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$: المعلمات التصحيحية التي يستعمل لحسابها النموذج الجوي الأسّي.

وأخذ العامل k في الحساب تغير زاوية الارتفاع على طول المسير. ويعبر الحد $(\varphi_0, \Delta L_V)$ δ عن آثار الانكسار (المسير ليس خطأً مستقيماً). ويكون هذا الحد دائماً صغيراً جداً، ما عدا عند زاوية الارتفاع المخفضة جداً وبهمل في الحساب؛ وهو ينطوي على خطأ cm 3,5 فقط لزاوية φ_0 ذات 10° و mm 0,1 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.

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

$$(19) \quad \Delta L_V = 0,00227 P + f(T) H$$

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 (%); يُعطى دلالة درجة الحرارة (T ، $f(T)$ ، التي تتوقف على الموقع الجغرافي، بواسطة المعادلة التالية:

$$(20) \quad f(T) = a 10^{bT}$$

حيث:

T يُعبر عنها بواسطة °C

a يُعبر عنها بواسطة m/% للرطوبة النسبية

b يُعبر عنها بواسطة °C⁻¹.

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

الجدول 2

b (°C-1)	a (m/%)	الموقع
$2,91 \times 10^{-2}$	$5,5 \times 10^{-4}$	مناطق ساحلية (جزر أو أماكن تقع على أقل من 10 km من الساحل)
$2,73 \times 10^{-2}$	$6,5 \times 10^{-4}$	مناطق استوائية غير ساحلية
$2,35 \times 10^{-2}$	$7,3 \times 10^{-4}$	كل المناطق الأخرى

حساب العامل التصحيحي k للمعادلة (18)، نفترض تغيراً أسيّاً بارتفاع h للانكسارية الجوية N :

$$(21) \quad N(h) = N_s \exp(-h/h_0)$$

حيث N_s هي متوسطة قيمة الانكسارية عند سطح الأرض (انظر التوصية ITU-R P.453) و h_0 تُعطى بواسطة:

$$(22) \quad h_0 = 10^6 \frac{\Delta L_V}{N_s}$$

عندما تُحسب k من العبارة التالية:

$$(23) \quad k = 1 - \left[\frac{n_s r_s}{n(h_0) r(h_o)} \right]^2$$

حيث n_s و $n(h_0)$ هما قيمتا مؤشر الانكسار عند سطح الأرض و عند الارتفاع h_0 (المعطاة بواسطة المعادلة (22)) على التوالي، و r_s و $r(h_o)$ هما المسافتان المقابلتان لمركز الأرض.

وبالنسبة للمسيرات أرض-فضاء ذات زوايا ارتفاع θ ، يمكن التعبير عن طول المسير التروبوسفيري الزائد ($\Delta L(\theta)$ m) على أنه مجموع المكون الهيدروستاتي والمكون الرطب ($\Delta L_H(\theta)$ و $\Delta L_W(\theta)$):

ويمكن إسقاط طول المسير الزائد عبر طول مسیر عمودي، ΔL_{Hv} و ΔL_{Wv} إلى زاوية الارتفاع، θ الأعلى من 10° باستعمال دالتي تقابل منفصلتين من أجل المكون الهيدروستاتي والمكون الرطب، ($m_H(\theta)$ و $m_W(\theta)$):

$$(24) \quad m \quad \Delta L(\theta) = \Delta L_H(\theta) + \Delta L_W(\theta) = \Delta L_{Hv} \cdot m_H(\theta) + \Delta L_{Wv} \cdot m_W(\theta)$$

يمكن استنباط المكون العمودي الهيدروستاتي عند سطح الأرض، ΔL_{Hvs} باستعمال المعادلة التالية:

$$(24a) \quad m \quad \Delta L_{Hvs} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_{ms}} k_1 \cdot p_s$$

ويمكن استنباط المكون العمودي الرطب عند سطح الأرض، ΔL_{Wvs} باستعمال المعادلة التالية:

$$(24b) \quad m \quad \Delta L_{Wvs} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_{ms}} \frac{k_2}{(\lambda+1)} \frac{e_s}{T_{ms}}$$

حيث:

- e_s, p_s : الضغط الكامل للهواء والضغط الجزيئي لبخار الماء على سطح الأرض (hPa)
- T_{ms} : متوسط درجة حرارة عمود بخار الماء على السطح (K)
- λ : عامل انخفاض ضغط البخار
- R_d : (J/kg K) $287,0 = R/M_d$
- R : الثابت الجزيئي الغرامي للغاز = $8,314 \text{ J/mol K}$
- M_d : الكتلة الجزيئية الغرامية للهواء الجاف = $(g/mol) 28,9644$
- k_1 : $(\text{K}/\text{hPa}) 77,604 = k_1$
- k_2 : $(\text{K}^2/\text{hPa}) 373\,900 = k_2$
- $g_m(h_s) = g_{ms}$
- $9,784 \cdot (1 - 0,00266 \cdot \cos(2 \cdot \text{lat}) - 0,00028 \cdot h) = g_m(h)$
- = تسارع الجاذبية عند مركز ثقل الهواء من الارتفاع h (m/s^2)
- lat : خط العرض (راديان)
- h_s : ارتفاع سطح الأرض فوق متوسط سطح البحر (km) (a.m.s.l.)
- h : ارتفاع المستقبل فوق متوسط سطح البحر (km) (a.m.s.l.)

وبالنسبة للمستقبلات الواقعة على ارتفاع h مختلف عن ارتفاع السطح h_s , يُعطى المكون الهيدروستاتي والمكون الرطب $\Delta L_{Hv}(h)$ و $\Delta L_{Wv}(h)$ باستعمال المعادلتين التاليتين:

$$(25a) \quad \Delta L_{Hv}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)} k_1 \cdot p(h)$$

$$(25b) \quad \Delta L_{Wv}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)} \frac{k_2}{(\lambda + 1)} \frac{e(h)}{T_m(h)}$$

حيث:

يمكن استنباط قيم معلمات الأرصاد الجوية عند الارتفاع h , $T_m(h)$ و $e(h)$ و $p(h)$ من القيم عند سطح الأرض، T_{ms} و e_s و p_s , عن طريق استخدام المعادلات التالية:

$$(26a) \quad T_m(h) = T_{ms} - \alpha_m \cdot (h - h_s)$$

$$(26b) \quad p(h) = p_s \left[1 - \frac{\alpha \cdot (h - h_s)}{T_s} \right]^{\frac{g}{R'_d \alpha}} \text{ hPa}$$

$$(26c) \quad e(h) = e_s \cdot \left[\frac{p(h)}{p_s} \right]^{\lambda+1}$$

حيث:

$$(26d) \quad K = \frac{\alpha R'_d}{(1 - \frac{\alpha R'_d}{(\lambda+1)g})} = T_s = \text{درجة حرارة الهواء عند سطح الأرض (K)}$$

$\alpha = \text{معدل هبوط متوسط درجة حرارة بخار الماء من سطح الأرض (K/km)}$

$$(26e) \quad K/\text{km} = 0,5 \cdot \left[\frac{(\lambda+1) \cdot g}{R'_d} - \sqrt{\frac{(\lambda+1) \cdot g}{R'_d} \left[\frac{(\lambda+1) \cdot g}{R'_d} - 4\alpha_m \right]} \right]$$

$$(26f) \quad = R_d / 1000 = 0,287 \quad \text{J/(g K)} R'_d$$

$$g = 9,806 \cdot (1 - 0,002637 \cdot \cos(2 \cdot lat) - 0,00031 \cdot h_s) = \text{م}/\text{s}^2$$

ويمكن استخلاص جميع معلمات دخل النموذج p_s و e_s و T_{ms} و λ و α_m من خلال افتراض أن معلمات الأرصاد الجوية تتميز بتقلب موسمي.

$$(27a) \quad X_i(D_y) = a1_i - a2_i \cos \left[2\pi \frac{(D_y - a3_i)}{365,25} \right]$$

حيث:

X_i : معلمات دخل النموذج p_s و e_s و T_{ms} و λ و α_m . المؤشر i ، 1 يشير إلى p_s ، 2 يشير إلى e_s ، 3 يشير إلى T_{ms} ، 4 يشير إلى λ ، 5 يشير إلى α_m

: $a1_i$ القيمة الوسطية للمعلمة

: $a2_i$ التقلب الموسمي للمعلمة

: $a3_i$ يوم من القيمة الدنيا للمعلمة

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

وتم حساب المعاملات $a1$ و $a2$ و $a3$ للمعلمات p_s و e_s و T_{ms} و λ و α_m وارتفاع السوية المرجعية h_{ref} 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](#).

والبيانات من 0° إلى 360° في خطوط الطول ومن +90° إلى -90° في خطوط العرض وذات استبانة تبلغ 1,5° في كل من خطوط الطول والعرض. ويمكن استبatement طول المسير الزائد عند أي موقع مطلوب وعند أي ارتفاع فوق سطح الأرض، h باتباع الأسلوب التالي:

(أ) تحديد المعاملات $a1_i$ و $a2_i$ و $a3_i$ لكل معلمة من المعلمات الخمس، p_s و e_s و T_{ms} و λ و α_m والسوية المرجعية h_{ref} من الخرائط الرقمية عند أقرب أربع نقاط شبكة إلى الموقع المطلوب.

(ب) حساب قيم المعلمات الخمس p_s و e_s و T_{ms} و λ و α_m عند الارتفاع المرجعي h_{ref} في أحد أيام السنة D_y ، X'_{i1} و X'_{i2} و X'_{i3} و X'_{i4} في أقرب أربع نقاط شبكة، باستعمال المعادلة (27) مع المعاملات $a1_i$ و $a2_i$ و $a3_i$ لكل نقطة شبكة، أي ($p^i(h_{ref}^i)$ و $e^i(h_{ref}^i)$ و $T_m^i(h_{ref}^i)$ و λ^i و α_m^i)، حيث $i = \{1, 2, 3, 4\}$. ويلاحظ أن الرمز العلوي i يمثل رقم النقطة الشبكية وليس الأسس.

(ج) حساب قيمة المعلمات الثلاث، ($p^i(h)$ و $e^i(h)$ و $T_m^i(h)$) عند النقاط الشبكية الأربع على الارتفاع h كالتالي:

$$(27b) \quad K \quad T_m^i(h) = T_m^i(h_{ref}^i) - \alpha_m^i \cdot (h - h_{ref}^i)$$

$$(27c) \quad \text{hPa} \quad p^i(h) = p^i(h_{ref}^i) \left[1 - \frac{\alpha^i \cdot (h - h_{ref}^i)}{T^i(h_{ref}^i)} \right]^{\frac{g^i}{R_d \alpha^i}}$$

$$(27d) \quad \text{hPa} \quad e^i(h) = e^i(h_{ref}^i) \cdot \left[\frac{p^i(h)}{p^i(h_{ref}^i)} \right]^{\lambda^i + 1}$$

$$(27e) \quad K \quad T^i(h_{ref}^i) = \frac{T_m^i(h_{ref}^i)}{\left[1 - \frac{\alpha^i R'_d}{(\lambda^i + 1) g^i} \right]}$$

$$(27f) \quad \text{K/km} \quad \alpha^i = 0,5 \cdot \left[\frac{(\lambda^i + 1) \cdot g^i}{R'_d} - \sqrt{\frac{(\lambda^i + 1) \cdot g^i}{R'_d} \left[\frac{(\lambda^i + 1) \cdot g^i}{R'_d} - 4\alpha_m^i \right]} \right]$$

$$(27g) \quad \text{m/s}^2 \quad g^i = 9,806 \cdot (1 - 0,002637 \cdot \cos(2 \cdot \text{lat}^i) - 0,00031 \cdot h_{ref}^i)$$

د) حساب القيمتين $\Delta L_{Wv}(h)$ و $\Delta L_{Hv}(h)$ عند أقرب النقاط الشبكية الأربع على الارتفاع h ، باستعمال المعادلتين (25a) و (25b) مع القيم $p^i(h)$ و $e^i(h)$ و $T_m^i(h)$ لكل نقطة من نقاط الشبكة.

$$(27h) \quad m \quad \Delta L_{Hv}^i(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m^i(h)} k_1 \cdot p^i(h)$$

$$(27i) \quad m \quad \Delta L_{Wv}^i(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m^i(h)} \frac{k_2}{(\lambda^i + 1)} \cdot \frac{e^i(h)}{T_m^i(h)}$$

حيث:

$$(27j) \quad g_m^i(h) = 9,784 \cdot (1 - 0,00266 \cdot \cos(2 \cdot \text{lat}^i) - 0,000028 \cdot h) \quad \text{m/s}^2$$

ه) حساب القيمتين $\Delta L_{Wv}(h)$ و $\Delta L_{Hv}(h)$ عند الارتفاع h ، في الموقع المطلوب بإجراء استكمال داخلي ثانوي الخطية للقيمتين $\Delta L_{Wv}^i(h)$ و $\Delta L_{Hv}^i(h)$ عند أقرب أربع نقاط شبكة على النحو المبين في التوصية ITU-R P.1144.

و) حساب قيمة طول المسير التربوسيفيري الزائد عند زاوية الارتفاع θ على الارتفاع h في الموقع المطلوب، $\Delta L(h, \theta)$ باستعمال المعادلة (24).

وقد اختبرت دقة النموذج المقترن عن طريق استخدام المسبار الراديوي والنظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS) والقياسات الراديوية لتحديد القيمة ΔL_{vs} ، وتترواح قيم القيرين بين 2 و 6 سنتيمترات على نطاق العالم. وإذا كانت هناك حاجة إلى دقة أكبر، فإنه يمكن استخدام قياسات محلية متوافقة للضغط الكامل للهواء وضغط بخار الماء كمدخلات للنموذج.

وتعطى دالة التقابل للمكونين الهيدروستاتي والرطب $m_w(\theta)$ و $m_h(\theta)$ بالمعادلتين التاليتين:

$$(28a) \quad m_h(\theta) = m(\theta, a_h, b_h, c_h)$$

$$(28b) \quad m_w(\theta) = m(\theta, a_w, b_w, c_w)$$

حيث:

$$m(\theta) = \frac{1 + \left[\frac{a}{1 + \left(\frac{b}{1 + c} \right)} \right]}{\sin \theta + \left[\frac{a}{\sin \theta + \left(\frac{b}{\sin \theta + c} \right)} \right]}$$

$$b_h = 0,0029$$

$$b_w = 0,00146$$

$$c_w = 0,04391$$

$$(28c) \quad c_h = c_1 + \left[\left(\cos \left(\frac{D_y - 28}{365.25} \cdot 2\pi + \psi \right) + 1 \right) \cdot \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \right] \cdot [1 - \cos(lat)]$$

نصف الكرة الأرضية	ψ	c₁₁	c₁₀	c₁
الشمالي	0	0,005	0,001	0,062
الجنوبي	π	0,007	0,002	0,062

$$(28d) \quad a_h = 10^{-3} \left[A_{0h} + A_{1h} \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) + B_{1h} \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) + A_{2h} \cdot \cos \left(4\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) + B_{2h} \cdot \sin \left(4\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) \right]$$

$$(28e) \quad a_w = 10^{-3} \left[A_{0w} + A_{1w} \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) + B_{1w} \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) + A_{2w} \cdot \cos \left(4\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) + B_{2w} \cdot \sin \left(4\pi \cdot \frac{D_y}{365.25} \right) \right]$$

وتشكل المعاملات A_{0h} و A_{1h} و B_{1h} و A_{2h} و B_{2h} جزءاً لا يتجزأ من هذه التوصية وتحال في شكل خرائط رقمية في الملف [R-REC-P.834-9-201712-I!!!ZIP-E](#). وتحسب قيم المعلمتين a_h و a_w في الموقع المطلوب بأداء استكمال داخلي الخطية لقيم هذه المعاملات عند النقاط الشبكية الأربع على النحو المبين في التوصية [ITU-R P.1144](#).

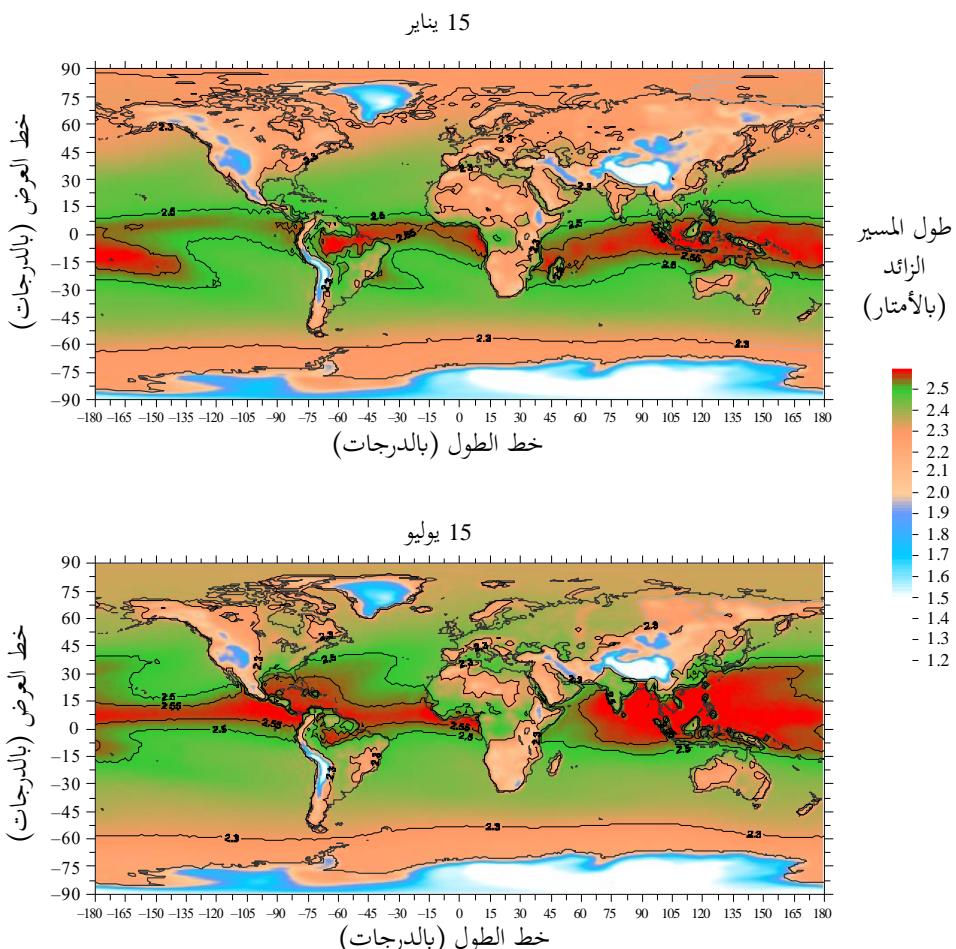
وفيما يتعلق بحالة وصلة أرض-فضاء ذات زوايا ارتفاع θ أكبر من 20° , يمكن تقرير دالتي التقابل المعطاة بالمعادلتين (28a) و (28b) من خلال المعادلة التالية:

$$(28f) \quad m_h(\theta) = m_w(\theta) = \frac{1}{\sin(\theta)}$$

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

الشكل 1

خريطة تطهان طهران متوسط زيادة تأثير انتشار المسير عن المستوى المرجعي في شهر يناير ويوليو



0834-01

الانتشار عبر طبقات الغلاف الجوي

7

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

إن وجود المسارات مهم لأنها 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 خط التداخل مع خدمات أخرى (انظر التوصية ITU-R P.452). وهي تلعب فيما عدا ذلك دوراً مهماً في ظواهر التداخل عبر مسارات متعددة (انظر التوصية ITU-R P.530) ولو كان وجودها لا يكفي أو غير كافٍ للاحظة ظواهر الانتشار عبر مسارات متعددة على وصلة معينة.

1.7 تأثير زاوية الارتفاع

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

$$(29) \quad \alpha = \sqrt{2 \times 10^{-6} \left| \frac{dM}{dh} \right| \Delta h}$$

حيث dM/dh هي التدرج العمودي للانكسارية المعدلة $\left(\frac{dM}{dh} < 0 \right)$ و Δh هي سمك المسار الذي يقابل ارتفاع ذروة المسار فوق هوائي الإرسال.

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

2.7 أدنى تردد "للحبس"

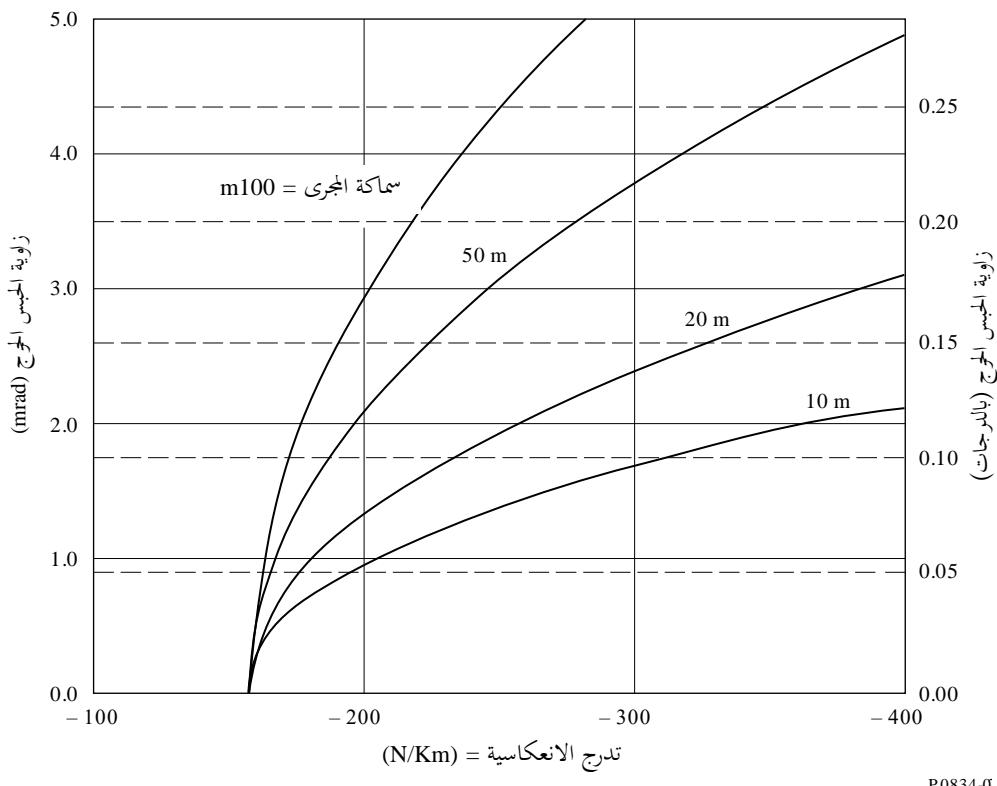
إن وجود مسار، وإن كان في موقع جيد، لا يعني بالضرورة أن الطاقة ستُقتنن بفعالية في المسار بحيث يكون هناك انتشار على مسافات طويلة. وإضافة إلى كون تردد الموجة يجب أن يحترم زاوية الارتفاع القصوى، فإنه يجب أن يكون أعلى من قيمة حرجية محددة بواسطة العمق المادي للمسار والمظهر الجانبي للانكسارية. وتحت هذا التردد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

ومن الممكن تقدير التردد الأدنى لكي تحبس موجة في مسار تروبوسفيري باستعمال تكامل للطور. وبين الشكل 4 تردد الحبس الأدنى لمسار سطحي (المنحنيات المتصلة) حيث يتم افتراض أن تدرج انكساري ثابت (سالب) يمتد من السطح إلى ارتفاع معين، مع مظهر جانبي "معياري" فوق هذا الارتفاع. وبالنسبة للتترددات المستعملة مع أنظمة الأرض (على العموم بين 8 و 16 GHz)، يجب أن يكون للمسار سمك أدنى بين حوالي 5 و 15 m وتردد الحبس الأدنى، f_{min} ، يتوقف كثيراً على سمك المسار وتدرج مؤشر الانكسار.

وفي حالة المسارات المفوعة، تدخل في الاعتبار معلومة أخرى، حتى بالنسبة للحالة البسيطة المتعلقة بمظهر جانبي خطى للانكسارية. تأخذ هذه المعلومة في الاعتبار شكل المظهر الجانبي مؤشر الانكسار تحت تدرج المسار. وتدل المنحنيات المتقطعة في الشكل 4 على تردد الحبس الأدنى لمسار ذي تدرج ثابت يقع فوق طبقة سطحية ذات تدرج انكساري معيارية لا يقل عن -40 N/km .

الشكل 2

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



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**

