

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.834-9
(2017/12)

آثار الانكسار التروبوسفيري
على انتشار الموجات الراديوية

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية



تمهيد

يوظف قطاع الاتصالات الراديوية دوراً يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يُرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلسلة توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

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

النشر الإلكتروني

جنيف، 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).

التوصية *ITU-R P.834-9

آثار الانكسار التروبوسفيري على انتشار الموجات الراديوية

(المسألة ITU-R 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 انحناء الشعاع وطبقات التوصيل ونصف قطر الأرض الفعال وزاوية الارتفاع الظاهري وزاوية التسديد للمسارات أرض-فضاء والطول الفعال 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،

توصي

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

الملحق 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:

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

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

حيث:

ρ : نصف قطر انحناء مسير الشعاع

n : مؤشر الانكسار الجوي

dn/dh : 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 الفعال

إذا كان المسير أفقياً تقريباً، تكون φ قريبة من صفر. ولكن، بما أن n قريبة جداً من 1، فإن المعادلة (1) تُبسّط 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 مسير الشعاع، يمكن حدوث تحول يسمح باعتبار الانتشار مستقيماً. ويشكل التحول دراسة أرض افتراضية ذات نصف قطر فعال $R_e = k a$ ، 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 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 الآسي للمظهر الجانبي لمؤشر الانكسار الوسطي (انظر التوصية رقم ITU-R P.453) - بالنسبة للارتفاعات التي تقل عن 1 000 m - 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:

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

حيث h ارتفاع النقطة المعنية معبراً عنه بالأمتار و a نصف قطر الأرض معبراً عنه بالآلاف 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 مرسله من محطة على سطح الأرض (ارتفاع h (km) وزاوية ارتفاع θ (بالدرجات)) تُحني نحو الأرض نظراً لآثار 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:

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

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

r : نصف قطر الأرض (370 6 km)

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:

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

حيث:

$$0,000315 = a$$

$$0,1361 = b$$

ويقوم هذا النموذج على النموذج الجوي الأسي المعروف 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 $\tau(h, \theta)$ (بالدرجات) بافتراض الجو المرجعي؛ ويبدو أن الصيغة الرقمية التالية تعطي تقريباً 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 التقريب من أجل $(0 \leq h \leq 3 \text{ km})$ و $(\theta_m \leq \theta \leq 10^\circ)$ ، حيث θ_m ، الزاوية التي تُعترض فقط عندها الحزمة الراديوية بواسطة سطح الأرض، وتُعطى بواسطة:

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

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

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

ولتكن θ_0 (بالدرجات) هي زاوية ارتفاع محطة فضائية في ظروف الانتشار في الفضاء الحر ولتكن θ_m زاوية الارتفاع الدنيا لمخطة عند سطح الأرض لا يعترض فيها سطح الأرض لحزمتها الراديوية. ويكون حد تصحيح الانكسار المقابل لقيمة θ_m هو $\tau(h, \theta_m)$. 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 تقسيم 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 $\tau_s(h, \theta_0)$ شبيهة بـ $\tau(h, \theta)$ ، لكن يُعبر عنها كدالة لقيمة θ_0 .

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

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

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 θ_0 .

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.

الجدول 1

قيم الانحراف الزاوي للانتشار عبر الجو بكامله

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 $\Delta\theta$ (للمودين 1 و 4 فقط)				
	جذر متوسط التربيع	0,1		1
	جذر متوسط التربيع	0,007		10

5 خسارة تمديد الحزمة لانتشار الموجة في الجو

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

وخسارة الإشارة الناجمة عن تمديد الحزمة لانتشار الموجة عبر الجو بكامله 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 ($10^\circ > \theta_0$)

h : ارتفاع أدنى نقطة عن مستوى سطح البحر، مقدراً بالكيلومترات ($3 \text{ km} > h$)

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:

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

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 ΔL 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 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

k و $\delta(\varphi_0, \Delta L_V)$: المعلمات التصحيحية التي يُستعمل لحسابها النموذج الجوي الأسي.

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

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

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

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

حيث:

T يُعبر عنها بواسطة $^\circ\text{C}$

a يُعبر عنها بواسطة m/% للرطوبة النسبية

b يُعبر عنها بواسطة $^\circ\text{C}^{-1}$.

وتُعطى 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

لحساب العامل التصحيحي k للمعادلة (18)، نفترض تغيراً أسياً 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:

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

عندها تُحسب k من العبارة التالية:

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

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

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

ويمكن إسقاط طول المسير الزائد عبر طول مسير 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:

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

حيث:

e_s, p_s : الضغط الكامل للهواء والضغط الجزئي لبخار الماء على سطح الأرض (hPa)

T_{ms} : متوسط درجة حرارة عمود بخار الماء على السطح (K)

λ : عامل انخفاض ضغط البخار

R_d : $287,0 \text{ (J/kg K)}$

R : الثابت الجزيئي الغرامي للغاز = $8,314 \text{ (J/mol K)}$

M_d : الكتلة الجزيئية الغرامية للهواء الجاف = $28,9644 \text{ (g/mol)}$

k_1 = $77,604 \text{ (K/hPa)}$

k_2 = $373\,900 \text{ (K}^2\text{/hPa)}$

$g_m(h_s) = g_{ms}$

$9,784 \cdot (1 - 0,00266 \cdot \cos(2 \cdot \text{lat}) - 0,00028 \cdot h) = g_m(h)$

= تسارع الجاذبية عند مركز ثقل الهواء من الارتفاع $h \text{ (m/s}^2\text{)}$

lat : خط العرض (راديان)

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

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

وبالنسبة للمستقيبلات 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:

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

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

حيث:

يمكن استنباط قيم معاملات 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:

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

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

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

حيث:

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

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

α = معدل هبوط متوسط درجة حرارة الهواء من سطح الأرض

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

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

$$g = 9,806 \cdot (1 - 0,002637 \cdot \cos(2 \cdot lat) - 0,00031 \cdot h_s) = m/s^2 \quad \text{التسارع بسبب الجاذبية عند سطح الأرض}$$

ويمكن استخلاص جميع معاملات دخل النموذج p_s و e_s و T_{ms} و λ و α_m من خلال افتراض أن معاملات 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 : λ , T_{ms} , e_s , p_s أو 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 = 1 يناير، 32 = 1 فبراير، 60,25 = 1 مارس.

وتم حساب المعاملات $a1$ و $a2$ و $a3$ للمعاملات 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 استنباط 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 المعاملات 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 شبكية إلى الموقع المطلوب.

ب) حساب قيم المعاملات 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 شبكية، باستعمال المعادلة (27) مع المعاملات $a1_i$ و $a2_i$ و $a3_i$ لكل نقطة شبكية، 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 الأس.

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

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

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

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

$$(27e) \quad K \quad T^i(h_{ref}^i) = \frac{T_m^i(h_{ref}^i)}{\left[1 - \frac{\alpha^i R_d^i}{(\lambda^i + 1) g^i} \right]}$$

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

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

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

$$(27h) \quad \text{m} \quad DL_{Hv}^i(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m^i(h)} k_1 \times p^i(h)$$

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

حيث:

$$(27j) \quad g_m^i(h) = 9,784 \cdot (1 - 0,00266 \cdot \cos(2 \cdot \text{lat}^i)) - 0,00028 \cdot h \quad \text{m/s}^2$$

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

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

وقد اختبرت دقة النموذج المقترح عن طريق استخدام المسبار الراديوي والنظام العالمي للملاحة الساتلية (GNSS) والقياسات الراديوية لتحديد القيمة ΔL_{vs} ، وتتراوح قيم عدم اليقين 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.

وتُعطى دالة التقابل للمكونين الهيدروستاتي والرطب $m_h(\theta)$ و $m_w(\theta)$ 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:

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

$$b_h = 0,0029$$

$$b_w = 0,00146$$

$$c_w = 0,04391$$

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

ψ	c_{11}	c_{10}	c_1	نصف الكرة الأرضية
0	0,005	0,001	0,062	الشمالي
π	0,007	0,002	0,062	الجنوبي

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

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

وتشكل المعاملات A_{0h} و A_{1h} و A_{2h} و B_{1h} و B_{2h} و A_{0w} و A_{1w} و A_{2w} و B_{1w} و B_{2w} جزءاً لا يتجزأ من هذه التوصية وتتاح في شكل خرائط رقمية في الملف [R-REC-P.834-9-201712-I!!ZIP-E](#). وتُحسب 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 تقريب دالتي التقابل المعطاة بالمعادلتين (28a) و (28b) من خلال المعادلة التالية:

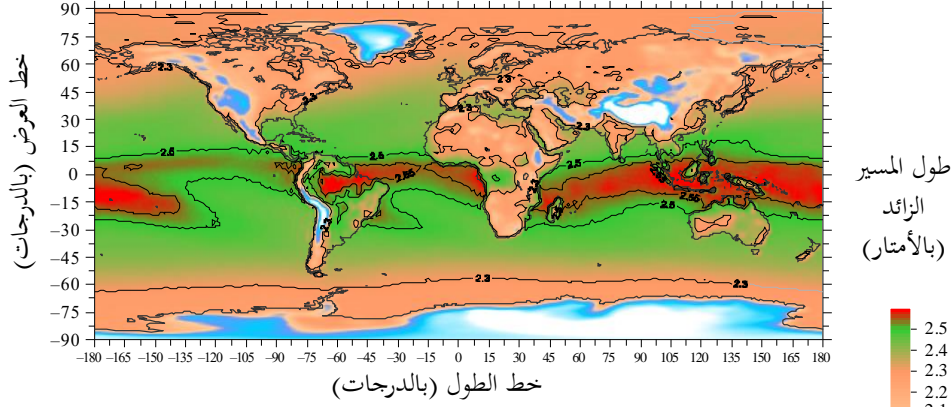
$$(28f) \quad m_h(\theta) = m_w(\theta) = \frac{1}{\sin(\theta)}$$

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

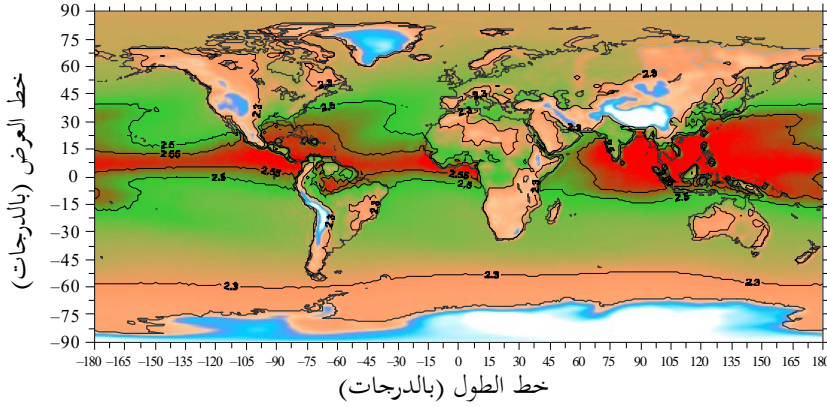
الشكل 1

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

15 يناير



15 يوليو



0834-01

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

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

إن وجود المسارات مهم لأنه يمكن أن يسبب انتشاراً راديويّاً 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 المرسله 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 α (rad) لكي تُحبس 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 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 -157 N/km (أي عندما ترتفع معدلات التغير) أو عندما يزيد سُمك المسار.

2.7 أدنى تردد "للحبس"

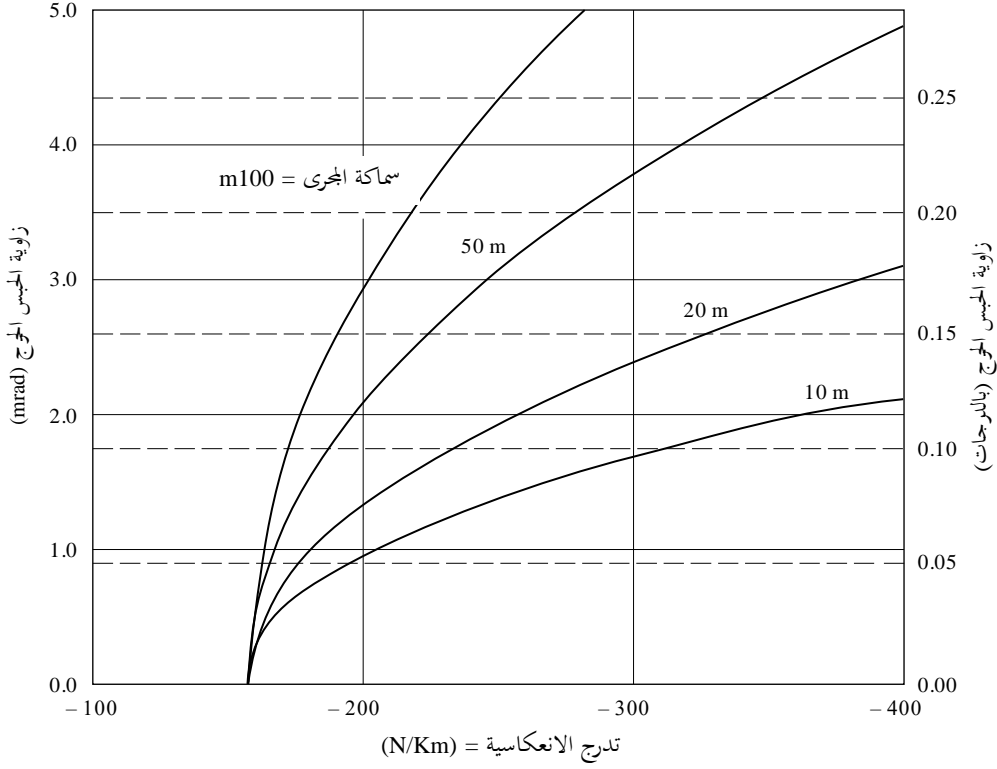
إن وجود مسار، وإن كان في موقع جيد، لا يعني بالضرورة أن الطاقة ستُقتنر بفعالية في المسار بحيث يكون هناك انتشار على مسافات طويلة. وإضافة إلى كون تردد الموجة يجب أن يحترم زاوية الارتفاع القصوى، فإنه يجب أن يكون أعلى من قيمة حرجة محددة بواسطة العمق المادي للمسار والمظهر الجانبي للانكسارية. وتحت هذا التردد الأدنى للحبس، تكون هناك تسريبات 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 و 16 GHz)، يجب أن يكون للمسار سُمك أدنى بين حوالي 5 و 15 m وتردد الحبس الأدنى، f_{min} ، 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 -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

