الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.676-13
(2022/08)

التوهين الناجم عن الغازات الجوية والمؤثرات ذات الصلة

السلسلة P

انتشار الموجات الراديوية

الاتحاد الدولي للاتصالات

تمهيد

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 القرار 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	العنوان
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، 2023

© ITU 2023
جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذا المنشور بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

التوصية ITU-R P.676-13*

التوهين الناجم عن الغازات الجوية والمؤثرات ذات الصلة

(المسألة ITU-R 201/3)

(2022-2019-2016-2013-2012-2009-2007-2005-2001-1999-1997-1995-1992-1990)

مجال التطبيق

تعرض هذه التوصية:

أ) أسلوب في الملحق 1 لحساب التوهين الغازي للمسير المائل، والطور اللاخطي، والانحناء الجوي، وطول المسير الجوي الزائد، ودرجة حرارة الضوضاء المتدفقة هبوطاً وصعوداً بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 1 000 GHz لمواصفات معروفة عشوائياً للضغط ودرجة الحرارة وارتفاع بخار الماء؛

ب) أسلوب تقريبي في الملحق 2 لتقدير التوهين الغازي للمسير المائل اللحظي بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 350 GHz عندما تُعرف القيم اللحظية لضغط السطح ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل[1] من البيانات المحلية أو مواصفات مرجعية أو خرائط رقمية مرجعية؛

ج) أسلوب تقريبي في الملحق 2 لتقدير إحصاءات التوهين الغازي للمسير المائل اللحظي بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 350 GHz عندما تُعرف القيم اللحظية لضغط السطح ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل من البيانات المحلية أو مواصفات مرجعية أو خرائط رقمية مرجعية؛

د) تقريب ويبول للتوهين الناجم عن بخار الماء على المسير المائل لاستخدامه في التوصية ITU-R P.1853،

مصطلحات أساسية

توهين غازي، توهين محدد، توهين المسير المائل، التوهين الكلي، بخار الماء، الأوكسجين، تشتت الطور، متدفق صعوداً، متدفق هبوطاً، الانحناء

المختصرات/الأسماء المختصرة

Altitude	الارتفاع (المسافة الرأسية نسبة إلى متوسط مستوى البحر) *(Vertical distance relative to mean sea level)*
Dispersion	التشتت (التغاير في التأخير الزمني مقابل التردد) *(Variation of time delay vs. frequency)*
Downwelling	تدفق هبوطاً (انتشار الضوضاء عبر الغلاف الجوي هبوطاً) *(Downward propagation of noise through the atmosphere)*
Exoatmospheric	خارج الغلاف الجوي (موجود خارج الغلاف الجوي) *(Originating outside the atmosphere)*
Height	الارتفاع (المسافة الرأسية نسبة إلى متوسط مستوى البحر) *(Vertical distance relative to the surface of the Earth)*

* أدخلت لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية في يونيو 2024 طبقاً للقرار ITU-R 1.

1 محتوى بخار الماء المتكامل هو الكمية الإجمالية لبخار الماء في عمود رأسي يمتد من سطح الأرض إلى الجزء العلوي من الغلاف الجوي. ومصطلحات "محتوى بخار الماء المتكامل" و"محتوى بخار الماء الإجمالي" و"بخار الماء الإجمالي في العمود/بخار الماء العمودي الإجمالي" و"محتوى بخار الماء العمودي المتكامل" و"المحتوى العمودي الإجمالي لبخار الماء" كلها مصطلحات مترادفة.

Isotope نظائر (أنواع متعددة لعنصر كيميائي) *(Multiple species of a chemical element)*

Upwelling تدفق صعوداً (انتشار الضوضاء عبر الغلاف الجوي صعوداً)
(Upward propagation of noise through the atmosphere)

Zeeman splitting تقسيم زيمان (تقسيم الخط الطيفي إلى مكونات عديدة في وجود مجال مغنطيسي ثابت)
(Splitting of a spectral line into several components in the presence of a static magnetic field)

توصيات وكتيبات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية ITU-R P.528

التوصية ITU-R P.530

التوصية ITU-R P.618

التوصية ITU-R P.619

التوصية ITU-R P.676

التوصية ITU-R P.836

التوصية ITU-R P.1144

التوصية ITU-R P.1510

التوصية ITU-R P.1853

التوصية ITU-R P.2001

التوصية ITU-R P.2041

كتيب الأرصاد الجوية الراديوية

ملاحظة – ينبغي في كل الأحوال استخدام أحدث مراجعة/طبعة سارية من التوصية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن هناك حاجة للتنبؤ بالتوهين الغازي للمسير المائل، والطور اللاخطي، والانحناء الجوي، وطول المسير الجوي الزائد، ودرجة حرارة الضوضاء المتدفقة هبوطاً وصعوداً بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 1 000 GHz لمواصفات معروفة عشوائياً للضغط ودرجة الحرارة وارتفاع بخار الماء؛

ب) أن هناك حاجة لتقدير التوهين الغازي للمسير المائل اللحظي بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 350 GHz عندما تُعرف القيم اللحظية لضغط السطح ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل من البيانات المحلية أو مواصفات مرجعية أو خرائط رقمية مرجعية؛

ج) أن هناك حاجة لتقدير إحصاءات التوهين الغازي للمسير المائل اللحظي بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 350 GHz عندما تُعرف القيم اللحظية لضغط السطح ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل من البيانات المحلية أو مواصفات مرجعية أو خرائط رقمية مرجعية؛

د) أن هناك حاجة إلى توفير تقريب وبيول للتوهين الناجم عن بخار الماء على المسير المائل لاستخدامه في التوصية ITU-R P.1853،

توصي

1 بأن يستخدم الأسلوب الوارد في الملحق 1 لحساب التوهين الغازي للمسير المائل، والطور اللاخطي، والانحناء الجوي، وطول المسير الجوي الزائد، ودرجة حرارة الضوضاء المتدفقة هبوطاً وصعوداً بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 1 000 GHz، وذلك لمواصفات معروفة عشوائياً لدرجة الحرارة والضغط وارتفاع كثافة بخار الماء مستقاة من بيانات محلية (مثل قياسات المسابير الراديوية أو أي من المواصفات المرجعية الواردة في الملحقات 1 أو 2 أو 3 من التوصية ITU-R P.835)؛

2 بأن يستخدم الأسلوب التقريبي الوارد في الملحق 2 لتقدير التوهين الغازي للمسير المائل اللحظي بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 350 GHz، وذلك عندما تُعرف القيم اللحظية لضغط السطح ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل من البيانات المحلية (مثل محطات الأرصاد الجوية أو بيانات تاريخية)؛

3 بأن يستخدم الأسلوب التقريبي الوارد في الملحق 2 لتقدير إحصاءات التوهين الغازي للمسير المائل بسبب الأكسجين وبخار الماء لمدى التردد من 1 إلى 350 GHz عندما تُعرف القيم اللحظية لدرجة حرارة السطح وضغط السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل من بيانات تاريخية طويلة الأجل أو من خرائط بالتوصية ITU-R P.2145؛

4 بأن يستخدم الأسلوب الوارد في الملحق 2 لتقدير تقريب ويبول للتوهين الناجم عن بخار الماء على المسير المائل، عند تطبيق التوصية ITU-R P.1853،

الملحق 1

حساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية بواسطة جمع مساهمات خطوط الامتصاص

1 التوهين النوعي

إن الطريقة الصحيحة لتقدير التوهين النوعي الذي يعزى إلى الهواء الجاف وبخار الماء في الترددات التي تصل إلى 1 000 GHz لأي قيمة من قيم الضغط والحرارة والرطوبة هي جمع مساهمات كل خط من الخطوط الطيفية الصادرة عن الأوكسجين وبخار الماء مع عوامل صغيرة إضافية مطابقة لطيف Debye اللاطنان الصادر عن الأوكسجين تحت 10 GHz، وللتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق 100 GHz وللطيف المستمر لبخار الماء الذي يسمح بمراعاة القيم المقيسة لامتصاص بخار الماء التي تفوق القيم المتوقعة. ويوضح الشكل 1 التوهين النوعي باستخدام طريقة التنبؤ، والمحسوب من 0 إلى 1 000 GHz بفواصل يبلغ كل منها 1 GHz، من أجل ضغط مقداره 1 013,25 hPa ودرجة حرارة هي 15° مئوية وذلك في حالتي كثافة بخار الماء البالغة 7,5 g/m^3 والجو المعياري (الجاف).

ويندمج بجوار 60 GHz العديد من خطوط امتصاص الأوكسجين في ضغوط على مستوى البحر من أجل تشكيل نطاق وحيد وعريض للامتصاص والذي يوضح بالتفصيل في الشكل 2. ويبين هذا الشكل أيضاً التوهين بالأوكسجين على مرتفعات أعلى، كلما زادت استبانة الخطوط، ومع انخفاض الضغط بزيادة الارتفاع. ولا تندرج في أسلوب الخط تلو الخط للتنبؤ بعض أنواع الجزئيات الأخرى (مثل: أنواع نظائر الأوكسجين وأنواع الأوكسجين المثار بالاهتزاز والأوزون وأنواع نظائر الأوزون والأوزون المثار بالاهتزاز وغيرها من الأنواع الصغرى). وهذه الخطوط الإضافية ليست هامة للأجواء العادية، لكن قد تكون ضرورية للجو الجاف.

تعطي المعادلة التالية التوهين النوعي بالغازات الجوية:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820 f \left(N''_{Oxygen}(f) + N''_{Water\ Vapour}(f) \right) \qquad \text{(dB/km)} \tag{1}$$

حيث γ_O وγ_W هما توهينان نوعيان (dB/km) سببهما الهواء الجاف (التوهين الناجم عن الأوكسجين وضغط الآزوت وطيف Debye اللاطنان) وبخار الماء على التوالي، وf هو التردد (GHz) و$N''_{Water\ Vapour}(f)$ و $N''_{Oxygen}(f)$ هما الجزآن التخيليان من الانكسارية المركبة المرتبطة بالتردد:

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum_{i\ (Oxygen)} S_i F_i + N''_D(f) \qquad (2أ)$$

$$N''_{Water\ Vapour}(f) = \sum_{i\ (Water\ Vapour)} S_i F_i \qquad (2ب)$$

S_i هي شدة الخط رقم i للأوكسجين أو بخار الماء، وF_i عامل الشكل لخط الأوكسجين أو بخار الماء، ويغطي المجموع كل الخطوط الطيفية الواردة في الجدولين 1 و2؛

$N''_D(f)$ هو الطيف المستمر للجو الجاف الناجم عن الامتصاص المستحث من ضغط الآزوت وطيف Debye، المتحصل عليه بالمعادلة (8).

وتحدد شدة الخط على النحو التالي:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7}\, p\, \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)] \qquad \text{for oxygen} \\ &= b_1 \times 10^{-1}\, e\, \theta^{3.5} \exp[b_2(1-\theta)] \qquad \text{for water vapour} \end{aligned} \qquad (3)$$

حيث:

p : ضغط الجو الجاف (hPa)

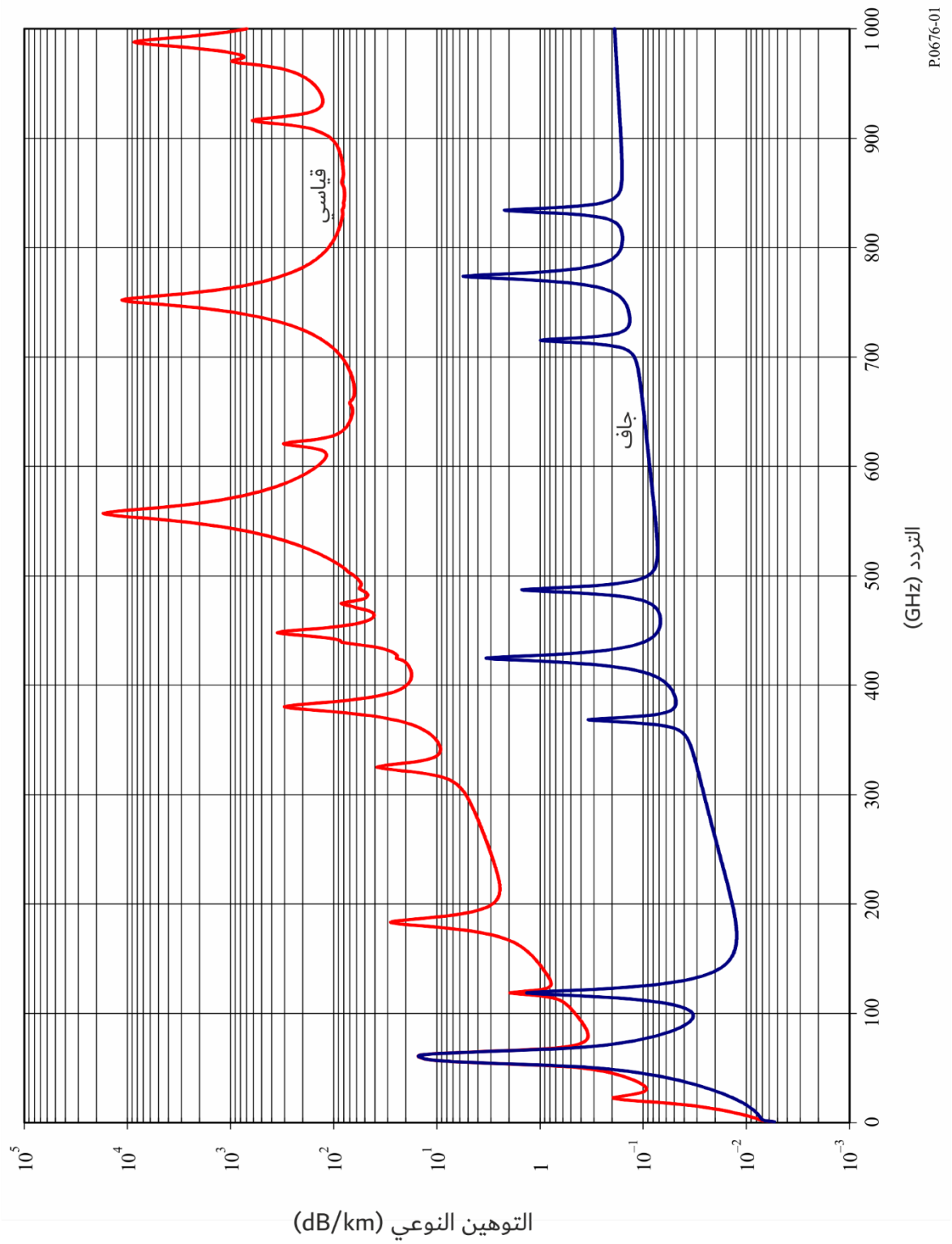
e : الضغط الجزئي لبخار الماء معبراً عنه (hPa) (الضغط الجوي الكلي، $p_{tot} = p + e$)

$300/T = \theta$

T : درجة الحرارة (K).

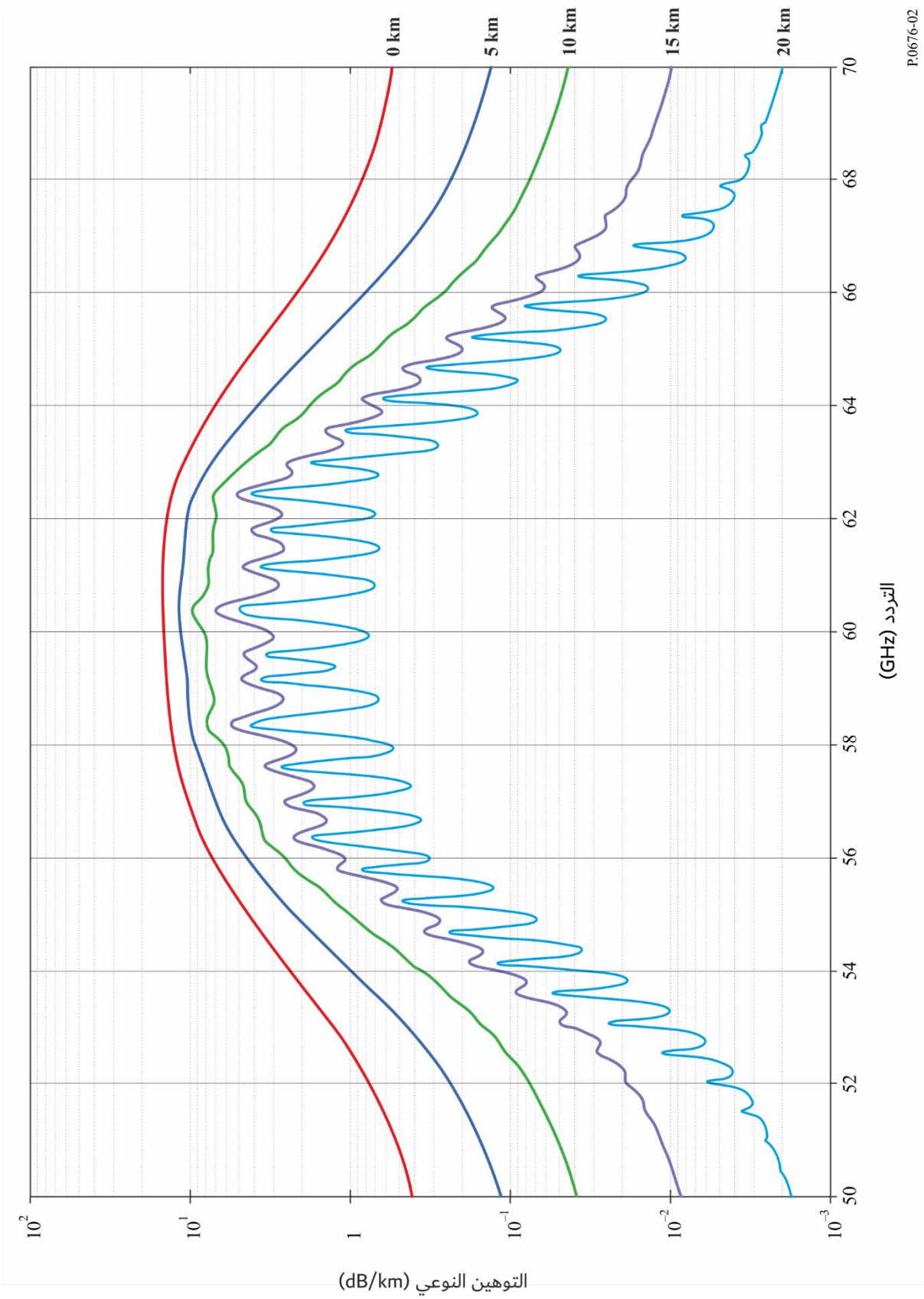
الشكل 1

التوهين النوعي الناجم عن الغازات الجوية محسوباً في فواصل قدر كل منها 1 GHz بما فيها الترددات المركزية للخطوط



الشكل 2

التوهين النوعي في مدى الترددات 50-70 GHz في الارتفاعات المبينة، والمحسوب على فواصل 10 MHz، بما في ذلك مراكز الخطوط (0 و5 و10 و15 و20 km)



ينبغي استعمال القيم الخاصة بالضغط p والضغط الجزئي e ودرجة الحرارة T (المتحصل عليها مثلاً بواسطة المسابير الراديوية). وينبغي عند الافتقار إلى البيانات المحلية، استعمال الظروف الجوية المعيارية المرجعية المناسبة الواردة في التوصية ITU-R P.835. (جدير بالذكر أنه في حال حساب التوهين الجوي الكلي يستعمل نفس الضغط الجزئي لبخار الماء في التوهين الناجم عن الأكسجين والتوهين الناجم عن بخار الماء.)

ويمكن الحصول على الضغط الجزئي لبخار الماء، e، على أي ارتفاع من كثافة بخار الماء ρ ودرجة الحرارة T على هذا الارتفاع، باستعمال المعادلة التالية:

$$e = \frac{\rho T}{216.7} \tag{4}$$

وترد البيانات الطيفية للأوكسجين في الجدول 1، والبيانات الطيفية لبخار الماء في الجدول 2. وآخر مدخلات في الجدول 2 عبارة عن شبه خط مركزه 780 1 GHz، يمثل حده الأدنى المساهمة المشتركة تحت 000 1 GHz لرنين بخار الماء غير المدرج في طريقة التنبؤ بجمع مساهمات خطوط الامتصاص (أي التواصل الرطب). وتضبط معلمات شبه الخط لمراعاة الفارق بين الامتصاص المقاس عند النوافذ الجوية والامتصاص المحسوب للخط المحلي.

تعطي العبارة التالية عامل شكل الخط:

$$F_i = \frac{f}{f_i}\left[\frac{\Delta f - \delta\left(f_i - f\right)}{\left(f_i - f\right)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta\left(f_i + f\right)}{\left(f_i + f\right)^2 + \Delta f^2}\right] \tag{5}$$

حيث f_i هو تردد خط الأوكسجين أو بخار الماء وΔf هو عرض الخط:

$$\begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4}\,(p\ \theta^{(0.8\ -\ a_4)} + 1.1\,e\,\theta) && \text{for oxygen} \\ &= b_3 \times 10^{-4}\,(p\ \theta^{b_4} + b_5\,e\,\theta^{b_6}) && \text{for water vapour} \end{aligned} \tag{6أ}$$

ويعدل عرض الخط لمراعاة تقسيم زماني لخطوط الأوكسجين وتوسيع دوبلر لخطوط بخار الماء:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2.25\times10^{-6}} && \text{for oxygen} \\ &= 0.535\Delta f + \sqrt{0.217\Delta f^2 + \frac{2.1316\times10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{for water vapour} \end{aligned} \tag{6ب}$$

وδ عامل تصحيح ينتج عن تأثيرات التداخل في خطوط الأوكسجين:

$$\begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6\theta)\times10^{-4}(p+e)\,\theta^{0.8} && \text{for oxygen} \\ &= 0 && \text{for water vapour} \end{aligned} \tag{7}$$

الجدول 1

المعطيات المطيافية للتوهين بالأوكسجين

a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	f_0
6,850	2,566	0,0	6,690	9,651	0,975	50,474214
6,800	2,246	0,0	7,170	8,653	2,529	50,987745
6,729	1,947	0,0	7,640	7,709	6,193	51,503360
6,640	1,667	0,0	8,110	6,819	14,320	52,021429
6,526	1,388	0,0	8,580	5,983	31,240	52,542418
6,206	1,349	0,0	9,060	5,201	64,290	53,066934
5,085	2,227	0,0	9,550	4,474	124,600	53,595775
3,750	3,170	0,0	9,960	3,800	227,300	54,130025
2,654	3,558	0,0	10,370	3,182	389,700	54,671180
2,952	2,560	0,0	10,890	2,618	627,100	55,221384
6,135	1,172–	0,0	11,340	2,109	945,300	55,783815
0,978–	3,525	0,0	17,030	0,014	543,400	56,264774
6,547	2,378–	0,0	11,890	1,654	1331,800	56,363399
6,451	3,545–	0,0	12,230	1,255	1746,600	56,968211
6,056	5,416–	0,0	12,620	0,910	2120,100	57,612486
0,436	1,932–	0,0	12,950	0,621	2363,700	58,323877
1,273–	6,768	0,0	14,910	0,083	1442,100	58,446588
2,309	6,561–	0,0	13,530	0,387	2379,900	59,164204
0,776–	6,957	0,0	14,080	0,207	2090,700	59,590983
0,699	6,395–	0,0	14,150	0,207	2103,400	60,306056
2,825–	6,342	0,0	13,390	0,386	2438,000	60,434778
0,584–	1,014	0,0	12,920	0,621	2479,500	61,150562
6,619–	5,014	0,0	12,630	0,910	2275,900	61,800158
6,759–	3,029	0,0	12,170	1,255	1915,400	62,411220
0,844	4,499–	0,0	15,130	0,083	1503,000	62,486253
6,675–	1,856	0,0	11,740	1,654	1490,200	62,997984
6,139–	0,658	0,0	11,340	2,108	1078,000	63,568526
2,895–	3,036–	0,0	10,880	2,617	728,700	64,127775
2,590–	3,968–	0,0	10,380	3,181	461,300	64,678910
3,680–	3,528–	0,0	9,960	3,800	274,000	65,224078
5,002–	2,548–	0,0	9,550	4,473	153,000	65,764779
6,091–	1,660–	0,0	9,060	5,200	80,400	66,302096
6,393–	1,680–	0,0	8,580	5,982	39,800	66,836834
6,475–	1,956–	0,0	8,110	6,818	18,560	67,369601
6,545–	2,216–	0,0	7,640	7,708	8,172	67,900868
6,600–	2,492–	0,0	7,170	8,652	3,397	68,431006
6,650–	2,773–	0,0	6,690	9,650	1,334	68,960312
0,079	0,439–	0,0	16,640	0,010	940,300	118,750334

الجدول 1 (تتمة)

a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	f_0
0,000	0,000	0,0	16,400	0,048	67,400	368,498246
0,000	0,000	0,0	16,400	0,044	637,700	424,763020
0,000	0,000	0,0	16,000	0,049	237,400	487,249273
0,000	0,000	0,0	16,000	0,145	98,100	715,392902
0,000	0,000	0,0	16,200	0,141	572,300	773,839490
0,000	0,000	0,0	14,700	0,145	183,100	834,145546

الجدول 2

البيانات الطيفية للتوهين ببخار الماء

b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	f_0
1,00	5,087	,76	26,38	2,144	,1079	22,235080
,82	4,930	,69	28,58	8,732	,0011	67,803960
,79	4,780	,70	29,48	8,353	,0007	119,995940
,85	5,022	,77	29,06	,668	2,273	183,310087
,54	4,398	,67	24,04	6,179	,0470	321,225630
,74	4,893	,64	28,23	1,541	1,514	325,152888
,61	4,740	,69	26,93	9,825	,0010	336,227764
,89	5,063	,54	28,11	1,048	11,67	380,197353
,55	4,810	,63	21,52	7,347	,0045	390,134508
,48	4,230	,60	18,45	5,048	,0632	437,346667
,52	4,483	,63	20,07	3,595	,9098	439,150807
,50	5,083	,60	15,55	5,048	,1920	443,018343
,67	5,028	,66	25,64	1,405	10,41	448,001085
,65	4,506	,66	21,34	3,597	,3254	470,888999
,64	4,804	,65	23,20	2,379	1,260	474,689092
,72	5,201	,69	25,86	2,852	,2529	488,490108
,43	3,980	,61	16,12	6,731	,0372	503,568532
,45	4,010	,61	16,12	6,731	,0124	504,482692
1,00	4,500	,70	26,00	,158	,9785	547,676440
1,00	4,500	,70	26,00	,158	,1840	552,020960
1,00	4,552	,69	30,86	,159	497,0	556,935985
,68	4,856	,71	24,38	2,391	5,015	620,700807
,50	4,000	,60	18,00	8,633	,0067	645,766085
1,00	4,140	,69	32,10	7,816	,2732	658,005280
,84	4,352	,68	30,86	,396	243,4	752,033113

الجدول 2 (*تتمة*)

b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	f_0
,45	5,760	,33	15,90	8,177	,0134	841,051732
,84	4,090	,68	30,60	8,055	,1325	859,965698
,90	4,530	,68	29,85	7,914	,0547	899,303175
,95	5,100	,70	28,65	8,429	,0386	902,611085
,53	4,700	,70	24,08	5,110	,1836	906,205957
,78	5,150	,70	26,73	1,441	8,400	916,171582
,80	5,000	,70	29,00	10,293	,0079	923,112692
,67	4,940	,64	25,50	1,919	9,009	970,315022
,90	4,550	,68	29,85	,257	134,6	987,926764
5,00	24,15	2,00	196,3	,952	,17506	1 780,000000

ينتج تواصل الجو الجاف من طيف امتصاص الأوكسجين اللاطنان (طيف Debye) تحت 10 GHz، والتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق 100 GHz.

$$N''_D(f) = f\, p\, \theta^2 \left[\frac{6.14 \times 10^{-5}}{d\left[1 + \left(\frac{f}{d}\right)^2\right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12}\, p\, \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5}\, f^{1.5}} \right] \tag{8}$$

حيث d هي معلمة العرض لطيف Debye:

$$d = 5.6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \tag{9}$$

2 التوهين في المسير

1.2 مسيرات للأرض

يمكن، في حالة مسير للأرض أو المسيرات المائلة قليلاً قريباً من الأرض، أن يحسب التوهين في المسير، A، على النحو التالي:

$$A = \gamma\, r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \qquad \text{dB} \tag{10}$$

حيث r_0 هو طول المسير (km).

2.2 المسيرات المائلة

يقدم القسمان 1.2.2 و2.2.2 أساليب لحساب التوهين الغازي في المسير المائل أرض–فضاء لمسير صاعد بين موقع على سطح الأرض أو بالقرب منه وموقع فوق سطح الأرض أو في الفضاء باستخدام أسلوب الخط تلو الخط في الملحق 1 لما يُعرف من البيانات الوصفية للحرارة وضغط الهواء الجاف وكثافة بخار الماء. ويوسع القسم 3.2.2 هذا الأسلوب ليشمل مسير هابط بين موقع فوق سطح الأرض أو في الفضاء وموقع على سطح الأرض أو بالقرب منه. ويقدم القسمان 4.2.2 و5.2.2 أساليب لحساب الانحناء وطول المسير الجوي الزائد، على التوالي، على مسير أرض–فضاء.

1.2.2 زوايا الارتفاع الظاهرية غير السالبة

التوهين الغازي للمسير المائل على المسير الصاعد بين العلوين h_1 وh_2 $(h_2 > h_1 \geq 0 \text{ km})$ هو:

$$A_{gas} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sin \varphi(h)} dh = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\gamma(h)}{\sqrt{1-\cos^2 \varphi(h)}} dh \tag{11}$$

حيث:

$$\cos \varphi(h) = \frac{(R_E+h_1)\, n(h_1)}{(R_E+h)\, n(h)} \cos \varphi_1 \tag{12}$$

$\gamma(h)$ هو التوهين النوعي على العلو h وR_E هو متوسط نصف قطر الأرض (6 371 km) وφ_1 هي زاوية الارتفاع الظاهرية المحلية على العلو h_1 و$n(h)$ هو مؤشر الانكسار على العلو h.

وبينما يمكن تقييم المعادلة (11) بالتكامل العددي[2]، يحسن تقريب التوهين الغازي للمسير المائل بتقسيم الغلاف الجوي إلى طبقات تتزايد أسياً، وتحديد التوهين النوعي (dB/km) لكل طبقة وطول مسير (km) عبر كل طبقة، وجمع جداء التوهين النوعي لكل طبقة وطول المسير عبر كل طبقة على النحو الموضح في المعادلة (13). وفي غياب البيانات الوصفية المحلية للحرارة وضغط الهواء الجاف والضغط الجزئي لبخار الماء مقابل العلو (من بيانات المسبار الراديوي على سبيل المثال)، يمكن استخدام أي من الأغلفة الجوية المعيارية المرجعية الستة (أي متوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي، أو الغلاف الجوي المرجعي لخط العرض المنخفض، أو الغلاف الجوي المرجعي الصيفي في منتصف خط العرض، أو الغلاف الجوي المرجعي الشتوي في منتصف خط العرض، أو الغلاف الجوي المرجعي الصيفي لخط العرض المرتفع، أو الغلاف الجوي المرجعي الشتوي لخط العرض المرتفع) الواردة في التوصية ITU-R P.835.

$$A_{gas} = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i \, \gamma_i \quad \text{(dB)} \tag{13}$$

حيث γi هو التوهين النوعي (dB/km) للطبقة رقم i وفق المعادلة (1)، وa_i هو طول المسير (km) عبر الطبقة رقم i.

وفي مسير مائل بين سطح الأرض والفضاء وبالإشارة إلى الشكل الهندسي في الشكل 5، يزداد سمك الطبقات أسياً من 10 cm على سطح الأرض إلى ~1 km على علو ~100 km لضمان تقدير دقيق لإجمالي التوهين الغازي في المسير المائل. وسمك الطبقة i، δ_i، هو:

$$\delta_i = 0.0001 \, e^{\frac{i-1}{100}} \qquad \text{(km)} \tag{14}$$

$h_1 = 0$ وh_i علو الجزء السفلي من الطبقة i من أجل $i \geq 2$ هو:

$$h_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j = 0.0001 \, \frac{e^{\frac{i-1}{100}}-1}{e^{\frac{1}{100}}-1} \tag{15}$$

وفي حال استخدام أحد الأغلفة الجوية المعيارية المرجعية الستة المحددة في التوصية ITU-R P.835، تعرَّف البيانات الوصفية الجوية لقيم علو هندسي تصل إلى 100 km، وفي هذه الحالة $i_{max} = 922$ و$\delta_{922} = 0.999\,66 \text{ km}$ و$h_{922} = 99.457 \text{ km}$.

---

2 يمكن تقييم المعادلة (11) باستخدام أساليب مختلفة حسب التنفيذ: ومثال ذلك أ) الدالة المتكاملة في برمجيات Matlab، ب) الدالة الرباعية في برمجيات Octave، ج) الدالة الرباعية في برمجيات Python، د) العديد من دوال الوصفات العددية، وغيرها من أساليب مكافئة.

وفي مسير مائل بين علو أخفض داخل الغلاف الجوي، h_{lower}، وعلو أعلى داخل الغلاف الجوي، ($0\ \text{km} \le h_{lower} < h_{upper} \le 100\ \text{km}$)، يمكن حساب توهين المسير المائل بإسناد r_1 إلى نصف قطر العلو الأدنى من مركز الأرض وتعديل المعادلتين (14) و(15) للحفاظ تقريباً على توالي التزايد الأسي للعلو بالنسبة لسطح الأرض على النحو التالي:

أ) يُحسب i_{lower} و i_{upper}:

$$i_{lower} = \text{floor}\left\{100 \ln\left[10^4\, h_{lower}\left(e^{\frac{1}{100}} - 1\right) + 1\right] + 1\right\} \qquad (16\text{أ})$$

$$i_{upper} = \text{ceiling}\left\{100 \ln\left[10^4\, h_{upper}\left(e^{\frac{1}{100}} - 1\right) + 1\right] + 1\right\} \qquad (16\text{ب})$$

حيث أرضية (x) تدور x إلى أقرب عدد صحيح تال، وسقف (x) يدور x إلى أقرب عدد صحيح تال.

ب) يستعاض عن الحد الأدنى في المعادلة (13) بقيمة $i = i_{lower}$ ويستعاض عن الحد الأعلى بقيمة $i_{upper} - 1$.

ج) يستعاض عن 0,0001 في المعادلة (14) بالمتحول m، حيث:

$$m = \left(\frac{e^{\frac{2}{100}} - e^{\frac{1}{100}}}{e^{\frac{i_{upper}}{100}} - e^{\frac{i_{lower}}{100}}}\right)(h_{upper} - h_{lower}) \qquad (16\text{ج})$$

د) يستعاض عن المعادلة (15) بالمعادلة التالية:

$$h_i = h_{lower} + \sum_{j=i_{lower}}^{i-1} \delta_j = h_{lower} + m\,\frac{e^{\frac{i-1}{100}} - e^{\frac{i_{lower}-1}{100}}}{e^{\frac{1}{100}} - 1},\ i_{lower} \le i \le i_{upper} \qquad (16\text{د})$$

وينبغي استخدام المعادلات من (16أ) إلى (16د) بحذر بسبب احتمال تردي الدقة في المسيرات المائلة حيث $i_{upper} - i_{lower} < 50$ (في المسيرات بين منصتين محمولتين جواً على سبيل المثال).

a_i هو طول المسير عبر الطبقة رقم i^{th} بسماكة δ_i وn_i هو مؤشر الانكسار الراديوي للطبقة رقم i^{th}. وn_i هي دالة ضغط الهواء الجاف والحرارة والضغط الجزئي لبخار الماء للطبقة رقم i^{th} باستخدام المعادلتين (1) و(2) من التوصية ITU-R P.453 وα_i وβ_{i+1} هما زاويتا ورود الدخول والخروج عند السطح البيني بين الطبقة رقم i والطبقة رقم $(i+1)$، وr_i هو نصف القطر من مركز الأرض إلى بداية الطبقة i^{th}، $r_{i+1} = r_i + \delta_i$، وr_1 هو نصف القطر من مركز الأرض إلى بداية الطبقة الدنيا، وعادةً ما يكون متوسط نصف قطر الأرض (6 371 km). ومؤشر الانكسار، n_i، والتوهين النوعي، γ_i، للطبقة رقم i^{th} هما قيمتيهما عند نقطة منتصف الطبقة رقم i^{th}، أي على علو $r_i + \delta_i/2$.

وطول المسير a_i هو:

$$a_i = -r_i \cos\beta_i + \sqrt{r_i^2 \cos^2\beta_i + 2\, r_i\, \delta_i + \delta_i^2} \quad (\text{km}) \qquad (17)$$

وزاوية α_i هي:

$$\alpha_i = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{-a_i^2 - 2\, r_i\, \delta_i - \delta_i^2}{2\, a_i\, (r_i + \delta_i)}\right) \qquad (18\text{أ})$$

$$= \sin^{-1}\left(\frac{r_i}{r_i + \delta_i} \sin\beta_i\right) \qquad (18\text{ب})$$

وقد ألغيت المعادلة (18أ) بسبب تردي الدقة. وβ_1 هي زاوية السمت المحلية عند سطح الأرض أو بالقرب منه (مكمل زاوية الارتفاع الظاهرية، φ، أي $\beta_1 = 90° - \varphi$).

ويمكن حساب β_{i+1} بشكل متكرر من α_i باستخدام قانون سنيل (Snell) على النحو التالي:

$$\beta_{i+1} = \sin^{-1}\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} \sin\alpha_i\right) \qquad (19\text{أ})$$

وبدلاً من ذلك، يمكن حساب βi مباشرةً دون حساب αi باستخدام قانون Snell في الإحداثيات القطبية على النحو التالي:

$$\beta_i = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_i}\sin\beta_1\right) \qquad (19ب)$$

وبالمثل، يمكن حساب α_i على النحو التالي:

$$\alpha_i = \sin^{-1}\left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}}\sin\beta_1\right) \qquad (19ج)$$

في الاتجاه أرض–فضاء، قد تصح المعادلات (19أ) أو (19ب) و(19ج) غير صالحة عند زوايا الارتفاع الظاهرية الأولية <1 درجة (أي زاوية السمت الأولية الظاهرية، $\beta_1, > 89^o$) عندما يقل تدرج الانكسارية الراديوية *dN/dh* عن –157 N-unit/km، وقد يحدث ذلك عند استخدام بيانات المسبار الراديوي من مناطق معينة من العالم المعرضة للانتشار عبر مجار كبيانات وصفية جوية. وفي هذه الحالات، تنعكس الموجة الراديوية بواسطة الغلاف الجوي وتتبع انحناء الأرض (أي تنتقل عبر مجار)، وتكون صيغة مقلوب دالة الجيب في المعادلات (19أ) أو (19ب) و(19ج) أكبر من 1. وتصح المعادلات (19أ) و(19ب) و(19ج) لجميع زوايا الارتفاع الظاهرية غير السالبة عند استخدام أي من الأغلفة الجوية المعيارية المرجعية الستة الواردة في التوصية ITU-R P.835 كمدخلات، لأن هذه الأغلفة الجوية المرجعية تخلو من خاصية الانتشار عبر المجاري في تدرجات الانكسارية.

ويبين الشكل 4 التوهين باتجاه السمت المحسوب بفواصل يبلغ كل منها 1 GHz من أجل غلاف جوي متوسط مرجعي عالمي سنوي ورد في التوصية ITU-R P.835. والغلاف الجوي "المعياري" هو متوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي وفيه ρ_o = 7,5 g/m^3، والغلاف الجوي "الجاف" هو متوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي وفيه ρ_o = 0 g/m^3.

2.2.2 زوايا الارتفاع الظاهرية السالبة

تفترض المعادلة (13) زيادة العلو بين المحطة الأرضية والفضاء. ولكن بالنسبة لزوايا الارتفاع الظاهرية السالبة من محطة أرضية مرتفعة، ينخفض العلو على طول مسير الانتشار بين المحطة الأرضية والعلو الأدنى للتماس ثم يزيد على طول مسير الانتشار بين العلو الأدنى للتماس والفضاء. ويظهر ذلك في الشكل 3 لمحطة أرضية على علو h1 بزاوية ارتفاع ظاهرية قدرها $90^o - \beta_1$.

ومن قانون Snell بالإحداثيات القطبية:

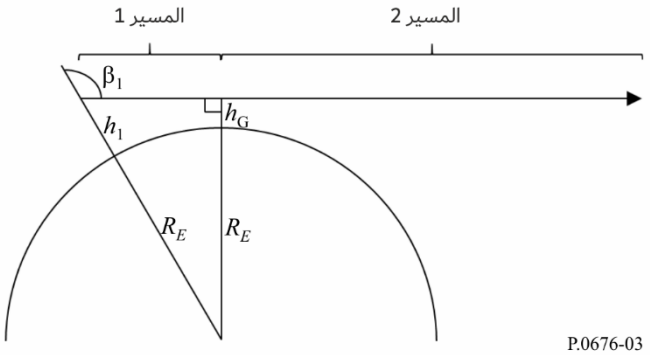
$$n(h_G)(R_E + h_G) = n(h_1)\,(R_E + h_1)\sin\beta_1 \qquad (20)$$

وفي هذه الحالة، يمكن تحديد علو التماس، h_G، عن طريق حل المعادلة (20) التكراري. ويمكن تحديد مؤشر الانكسار الراديوي *n*(*h*) من المعادلتين (1) و(2) من التوصية ITU-R P.453 للبيانات الوصفية الجوية النوعية التي تسترعي الاهتمام، وهي عادةً إحدى مجموعات البيانات الوصفية المرجعية في التوصية ITU-R P.835.

وصافي التوهين الغازي هو مجموع التوهين الغازي للمسير 1 والمسير 2. والمسير 1 هو التوهين الغازي بين محطة أرضية افتراضية على علو h_G km والمحطة الأرضية الفعلية على علو h_1 km بزاوية ارتفاع ظاهرية 0 درجة، والمسير 2 هو التوهين الغازي بين محطة أرضية افتراضية على علو h_G km وأقصى علو جوي (عادة 100 km) بزاوية ارتفاع ظاهرية 0 درجة.

الشكل 3

هندسة علو التماس



3.2.2 تبادلية فضاء–أرض وأرض–فضاء بالمثل

بالنسبة إلى مسير بين محطة فضائية ومحطة أرضية، حيث تكون زاوية الارتفاع الظاهرية، φ_s، في المحطة الفضائية سالبة، وزاوية الارتفاع الظاهرية في المحطة الأرضية φ_e، ترتبط زاويتا الارتفاع الظاهريتان بما يلي:

$$\varphi_s = -\cos^{-1}\left(\frac{r_e\, n_e}{r_s\, n_s}\cos\varphi_e\right) \qquad (21أ)$$

و

$$\varphi_e = \cos^{-1}\left(\frac{r_s\, n_s}{r_e\, n_e}\cos\varphi_s\right) \qquad (21ب)$$

حيث n_e هو مؤشر الانكسار على علو المحطة الأرضية وr_e هو نصف القطر من مركز الأرض إلى المحطة الأرضية ($r_e \geq R_E$)، وn_s هو مؤشر الانكسار على علو المحطة الفضائية، وr_s هو نصف القطر من مركز الأرض إلى المحطة الفضائية ($r_s > r_e$). وإذا كان علو المحطة الفضائية أعلى من 100 km فوق سطح الأرض، فإن $n_s = 1$.

وبما أن الانتشار عبر الغلاف الجوي تبادلي بالمثل، فإن التوهين الغازي لمسير أرض–فضاء، حيث تكون زاوية الارتفاع الظاهرية في المحطة الفضائية φ_s، يطابق التوهين الغازي لمسير أرض–فضاء التبادلي بالمثل، حيث زاوية الارتفاع الظاهرية عند المحطة الأرضية φ_e. ونتيجة لذلك، يمكن حساب التوهين الغازي لمسير أرض–فضاء هابط باعتباره التوهين الغازي المقابل لمسير أرض–فضاء الصاعد. وإذا تحققت المتراجحة $\frac{r_s\, n_s}{r_e\, n_e}\cos\varphi_s > 1$، فإن مسير فضاء–أرض لا يتقاطع مع الأرض.

4.2.2 الانحناء الجوي

إن إجمالي الانحناء الجوي، أي الانحناء، على طول مسير أرض–فضاء هو:

$$Bending = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} (\beta_{i+1} - \alpha_i) \qquad (22أ)$$

$$= \sum_{i=1}^{i_{max}-1} \left[\sin^{-1}\left(\frac{n_1\, r_1}{n_{i+1}\, r_{i+1}}\sin\beta_1\right) - \sin^{-1}\left(\frac{n_1\, r_1}{n_i\, r_{i+1}}\sin\beta_1\right)\right] \qquad (22ب)$$

حيث تعني القيمة الموجبة للانحناء أن الشعاع ينحني نحو الأرض. والمعادلة (9) من التوصية ITU-R P.834 هي تقريب لمعادلتين (22أ) و(22ب) لمتوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي.

5.2.2 طول المسير الجوي الزائد

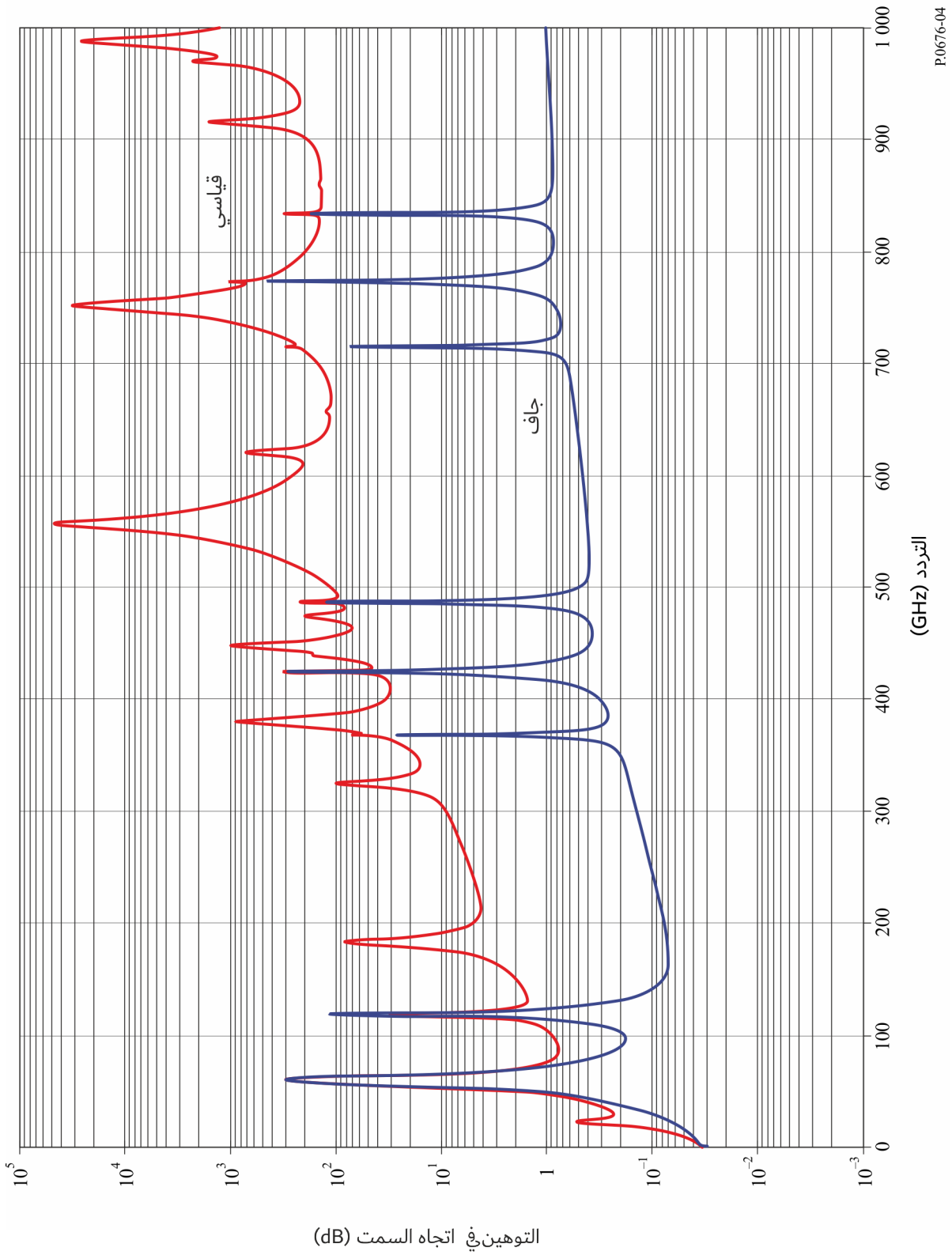
بما أن مؤشر الانكسار التروبوسفيري أكبر من 1، فإن طول المسير الجوي الفعال يتجاوز طول المسير الهندسي، وفي هذه الحالة يكون طول المسير الجوي الزائد، ΔL:

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{i_{max}} a_i (n_i - 1) \qquad \text{(km)} \tag{23}$$

ومصطلح طول المسير الجوي الزائد مرادف لمصطلح طول المسير الراديوي الزائد في التوصية ITU-R P.834؛ وترد في الفقرة 6 من التوصية ITU-R P.834 طريقة للتنبؤ بالطول الزائد للمسير الراديوي كدالة للموقع، ويوم السنة، وزاوية الارتفاع الظاهرية.

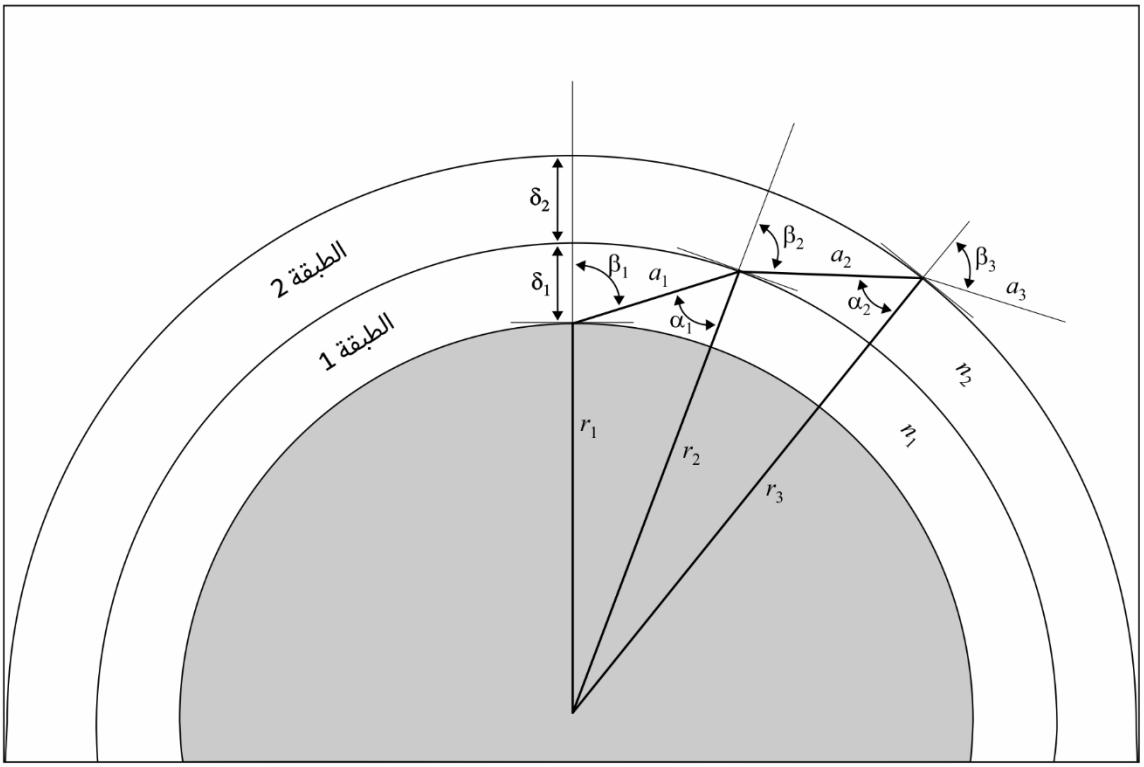
الشكل 4

توهين السمت نتيجة للغازات الجوية والمحسوب عند فواصل قيمة كل منها 1 GHz بما فيها مراكز الخط



الشكل 5

مسير عبر الغلاف الجوي



P.0676-05

3 آثار التشتت

إضافة إلى التوهين المشروح في الفقرة السابقة والقائم على الجزء التخيلي للانكسارية المركبة المعتمدة على التردد، يتولد عن الأوكسجين وبخار الماء تشتت يستند إلى الجزء الحقيقي للانكسارية المركبة المعتمدة على التردد. ويوضح هذا التأثير بدلالة تشتت الطور مقابل التردد (درجة/الكيلومتر) أو تأخر الزمرة (بيكوثانية/الكيلومتر) ويمكن حسابه، على غرار التوهين للمسيرات المائلة.

وعلى غرار المعادلة (1)، يعطى تشتت الطور الغازي النوعي، φ، بواسطة:

$$\varphi = \varphi_o + \varphi_w = -1.2008 f \left(N'_{Oxygen}(f) + N'_{WaterVapour}(f) \right) \quad \text{(deg/km)} \tag{24}$$

حيث φ_o هو تشتت الطور النوعي (درجات/كيلومترات) بسبب الهواء الجاف، وφ_w هو تشتت الطور النوعي بسبب بخار الماء؛ وf هو التردد (GHz)؛ و$N'_{WaterVapour}(f)$ هي الأجزاء الحقيقية للانكساريات المعقدة المعتمدة على التردد:

$$N'_{Oxygen}(f) = \sum_{i\,(Oxygen)} S_i F'_i + N'_D(f) \tag{25أ}$$

$$N'_{Water\,Vapour}(f) = \sum_{i\,(Water\,Vapour)} S_i F'_i \tag{25ب}$$

حيث:

وSi هي شدة خط الأكسجين أو بخار الماء i^{th} من المعادلة (3)، وF'_i هو الجزء الحقيقي من عامل شكل خط الأكسجين أو بخار الماء:

$$F'_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{(f_i - f) + \delta\Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} - \frac{(f_i + f) + \delta\Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \tag{25ج}$$

وتمتد عمليات الجمع لتشمل جميع الخطوط الطيفية في الجدولين 1 و2.

و$N'_D(f)$ هو الجزء الحقيقي من الاستمرارية الجافة بسبب امتصاص الآزوت الناتج عن الضغط:

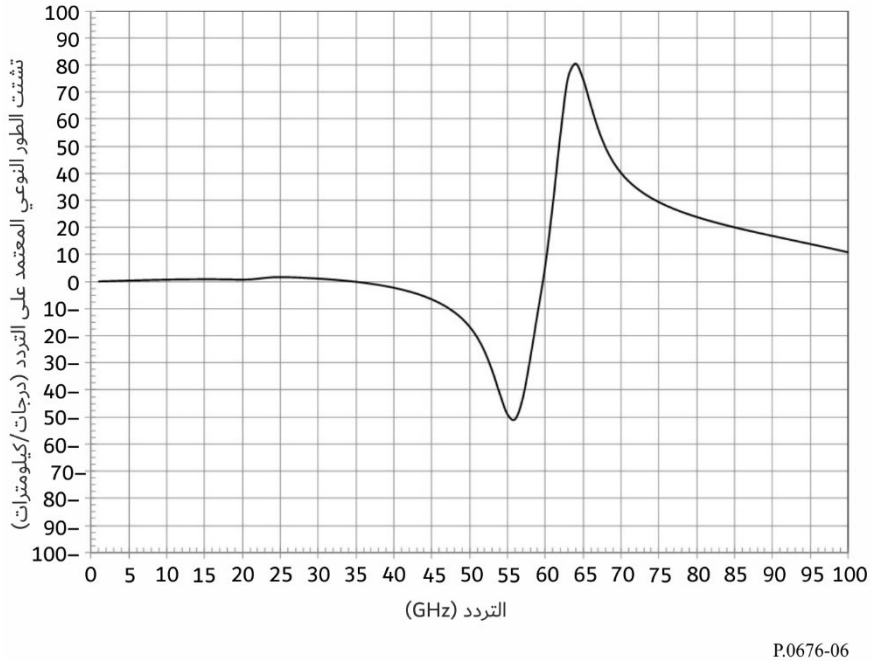
$$N'_D(f) = \frac{-6.14 \times 10^{-5} p\, \theta^2 f^2}{f^2 + d^2} \qquad (25د)$$

ويرد تعريف Δf في المعادلة (6ب)، وδ في المعادلة (7)، وd في المعادلة (9).

ويبين الشكل 6 تشتت الطور النوعي المعتمد على التردد للغلاف الجوي المعياري (p = 1 013.25 hPa, ρ = 7.5 g/m^3, T = 15ºC).

الشكل 6

تشتت الطور النوعي المعتمد على التردد للغلاف الجوي المعياري
(p = 1 013.25 hPa, ρ = 7.5 g/m^3, T = 15ºC)



4 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً والمتدفقة صعوداً

تعرَّف حرارة لمعان الموجات المكروية بأنها حرارة الضوضاء عند خرج هوائي بلا خسارة نتيجة اللمعان الجوي الوارد. وترتبط الكثافة الطيفية لقدرة الضوضاء $S(f)$ بحرارة الضوضاء $T(f)$ من خلال الدالة $S(f) = k\,T(f)$، حيث k هو ثابت بولتزمان. ويمكن حساب حرارة لمعان الموجات المكروية من الفضاء إلى الأرض المتدفقة هبوطاً والناظرة إلى الأعلى وحرارة لمعان الموجات المكروية من الأرض إلى الفضاء المتدفقة صعوداً والناظرة إلى لأسفل على غرار المعادلة (13). وعادة ما تكون الطبقة 1 على سطح الأرض، والطبقة k في الجزء العلوي من الغلاف الجوي (100 km عادة). ومجموع حرارة لمعان الموجات المكروية هو مجموع حرارات لمعان الموجات المكروية لكل طبقة جوية مضروبة بالخسارة بين تلك الطبقة الجوية ونقطة الرصد. ويُفترض أن الغلاف الجوي في حالة توازن دينامي حراري محلي وأن التشتت مهمل.

وفي الفقرات التالية، $T_B(f_{GHz}, T_j)$ هي حرارة لمعان الموجات المكروية للطبقة رقم j المحددة بواسطة:

$$T_B(f_{GHz}, T_j) = 0.048\, f_{GHz} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j}\right) - 1} \right] \quad \text{(K)} \qquad (26)$$

حيث $\boldsymbol{T_j}$ هي الحرارة الفيزيائية للطبقة رقم j^th. ويمكن تقريب $T_B(f_{GHz}, T_j)$ تقريباً جيداً بواسطة T_j من أجل $f_{GHz} < 0.42\, T_j$؛ وγ_j هو التوهين النوعي (dB/km) للطبقة رقم j^{th} المحدد في المعادلة (1)، a_j هو طول المسير (km) عبر الطبقة رقم j المحدد في المعادلة (17).

ويظهر في الشكل 7 الفرق بين الحرارة الفيزيائية، T، وحرارة لمعان الموجات المكروية لمصدر جسم أسود، T_B. وفي تردد معين، f_{GHz}، يؤول هذا الفرق إلى قيمة التردد مضروبةً في المعامل 0,024 ($T - T_B \rightarrow 0.024 f_{GHz}$) عند ارتفاع الحرارة الفيزيائية، T.

1.4 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً

إذا كانت البيانات الوصفية للحرارة الفيزيائية والضغط وبخار الماء على طول المسير معروفة، يمكن حسابها حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً التي تتمثل في مجموع: أ) حرارة لمعان الموجات المكروية الكوني الموهَنة بالتوهين الجوي وب) حرارة لمعان الموجات المكروية الجوية المتدفقة هبوطاً، على النحو التالي:

$$T_{downwelling} = T_B\left(f_{GHz}, 2.73\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^{k} a_j \gamma_j}{10}\right)}$$

$$+ \sum_{j=1}^{k} T_B(f_{GHz}, T_j)\left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=1}^{j} a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad \text{(K)} \qquad (27)$$

ومع ذلك، قد يكون من الأنسب تنفيذ صافي حرارة لمعان الموجات المكروية كتكرار باستخدام الأسلوب التكراري التالي:

الخطوة 1: وضع $T_{B,downwelling} = 0.048\left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{2.73}\right)-1}\right]$ (27أ)

تكرار الخطوات من 2 إلى 5 من أجل $j = k$ إلى $j = 1$ بإنقاص j بقيمة 1 في كل تكرار:

الخطوة 2: وضع $T_{B,downwelling,last} = T_{B,downwelling}$ (27ب)

الخطوة 3: $T_B = 0.048\left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j}\right)-1}\right]$ (27ج)

الخطوة 4: Step 4: Set $L_j = 10^{\frac{-a_j \gamma_j}{10}}$ (27د)

الخطوة 5: $T_{B,downwelling} = \left[T_{B,downwelling,last} L_j + \left(1 - L_j\right) T_B\right]$ (27هـ)

حيث 2,73 K هي حرارة الجسم الأسود الخلفية الكونية المكروية خارج الغلاف الجوي.

ويوضح الشكل 8 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً لمسير السمت في غلاف جوي معياري.

وإذا لم تكن البيانات الوضفية معروفة، يمكن استخدام الأسلوب الوارد في الفقرة 3 من الملحق 1 بالتوصية ITU-R P.618 لتقدير حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً، بما في ذلك المؤثرات الأخرى من التوهين الكلي في الغلاف الجوي.

ويمكن استخدام التوصية ITU-R P.372 لتحديد حرارة ضوضاء نظام المحطة الأرضية من درجات حرارة اللمعان.

2.4 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً

يمكن حساب صافي حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً، والذي هو مجموع: أ) حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً في الغلاف الجوي، ب) حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً في الغلاف الجوي والمنعكسة على سطح الأرض والموهنة بصافي التوهين في الغلاف الجوي، ج) حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً على سطح الأرض والموهنة بالتوهين في الغلاف الجوي، على النحو التالي:

$$T_{B,upwelling} = (\epsilon T_B(f_{GHz}, T_{Earth}) + \rho\, T_{downwelling}) \times 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^{k} a_j \gamma_j}{10}\right)}$$

$$+ \sum_{j=1}^{k} T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=j}^{k} a_i \gamma_i}{10}\right)} \text{(K)} \qquad (28)$$

ومع ذلك، قد يكون من الأنسب تنفيذ صافي حرارة لمعان الموجات المكروية كتكرار باستخدام الأسلوب التكراري التالي:

الخطوة 1: وضع $T_{B,upwelling} = \epsilon\, 0.048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_{Earth}} - 1\right)}\right] + \rho\, T_{B,downwelling}$ (28أ)

تكرار الخطوات من 2 إلى 5 من أجل $j = 1$ إلى $j = k$ بزيادة j بقيمة 1 بعد كل تكرار:

الخطوة 2: وضع $T_{B,upwelling,last} = T_{B,upwelling}$ (28ب)

الخطوة 3: وضع $T_B = 0.048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j} - 1\right)}\right]$ (28ج)

الخطوة 4: وضع $L_j = 10^{\frac{-a_j \gamma_j}{10}}$ (28د)

الخطوة 5: وضع $T_{B,upwelling} = \left[T_{B,upwelling,last}\, L_j + (1 - L_j)\, T_B\right]$ (28هـ)

حيث:

ϵ: انبعاثية سطح الأرض

ρ: انعكاسية سطح الأرض

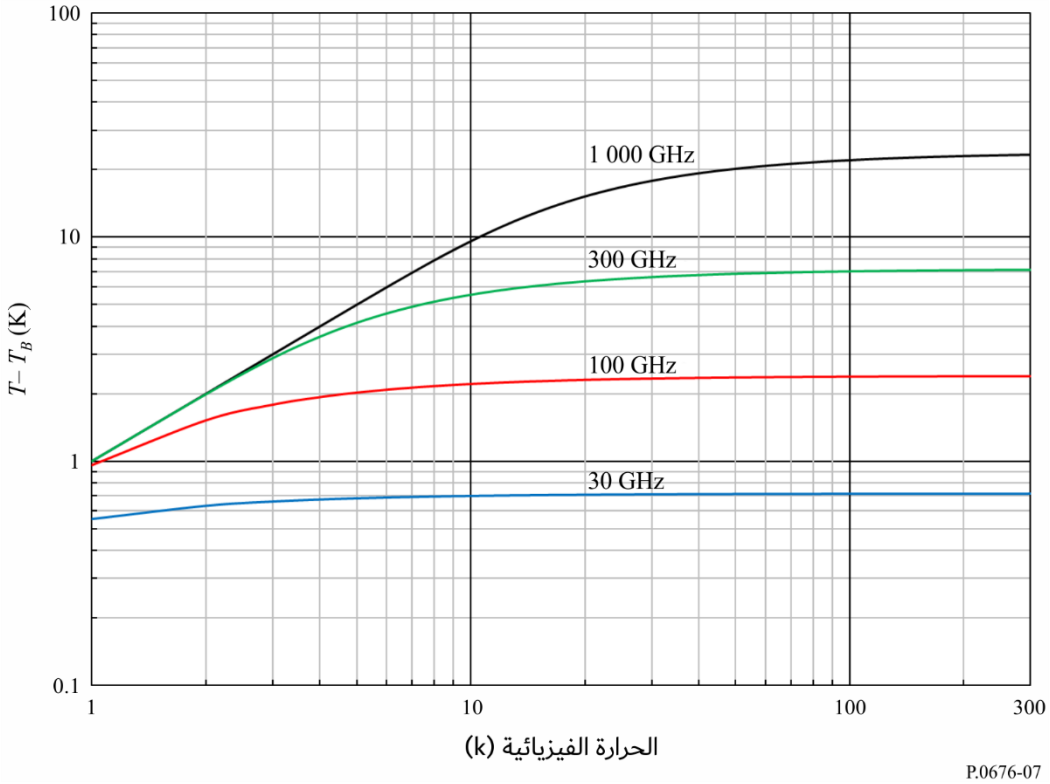
$\rho = 1 - \epsilon$.

وفي غياب بيانات محلية أو إرشادات أخرى، يمكن استخدام قيمة 0,95 للانبعاثية ϵ.

ويوضح الشكل 9 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً السمت والغلاف الجوي العالمي السنوي المرجعي المعياري (أي المتوسط) حيث $\epsilon = 0.95$ و $\rho = 0.05$ و $T_{Earth} = 290$ K.

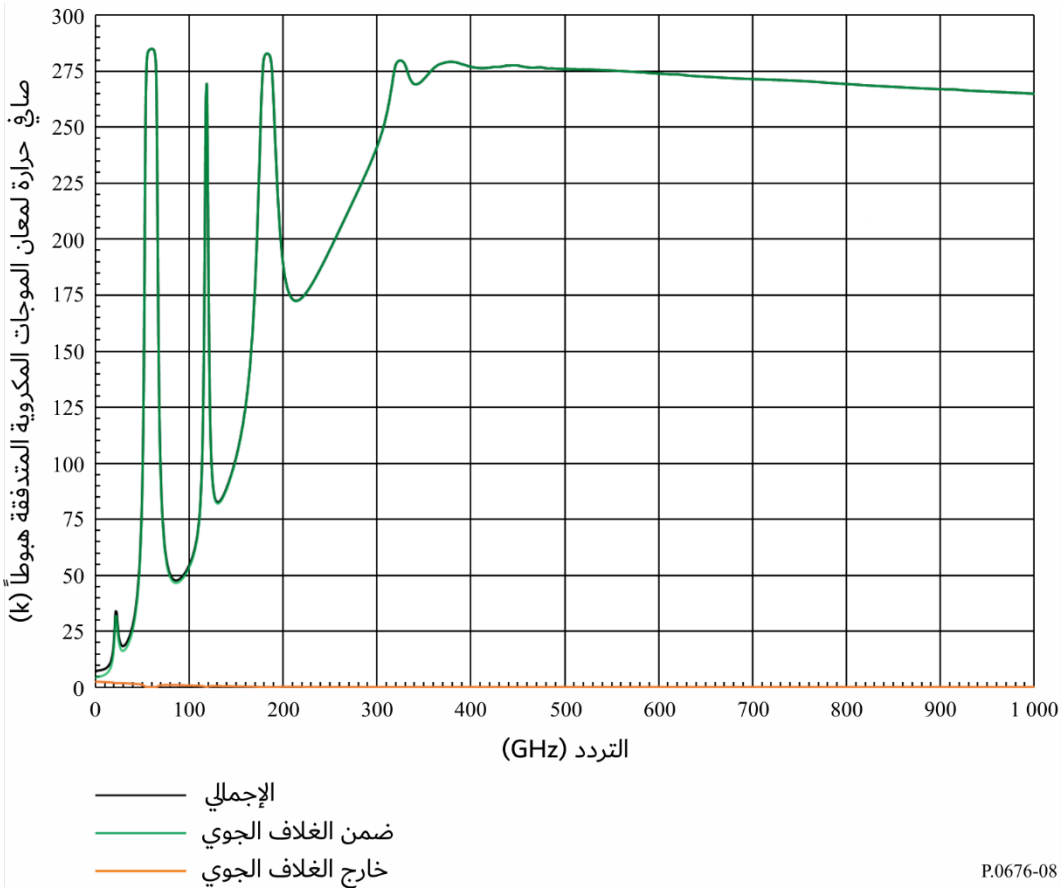
الشكل 7

الفرق بين درجات حرارة اللمعان الفيزيائية وحرارة لمعان الموجات المكروية من مصدر جسم أسود



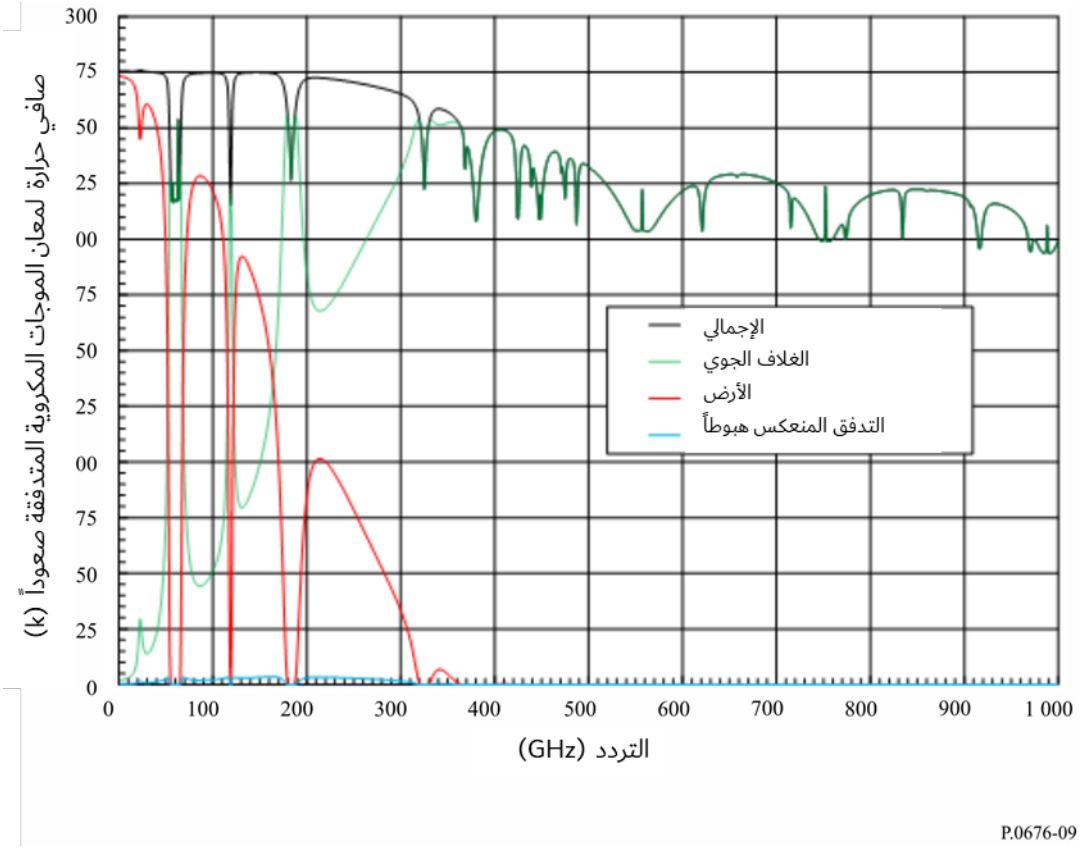
الشكل 8

حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً لمسير السمت في غلاف جوي معياري (مراكز 1 GHz)



الشكل 9

حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً للسمت في غلاف جوي معياري (مراكز 1 GHz)



5 توهين المسير المائل باستخدام البيانات الوصفية الرأسية في الغلاف الجوي

يمكن حساب التوهين الغازي في المسير المائل لأي بيانات وصفية نوعية في الملحق 3 بالتوصية ITU-R P.835 باستخدام الإجراء الوارد في الفقرة 2.2 من الملحق 1 مع مراعاة ما يلي:

1 تحويل كثافة بخار الماء ρ إلى ضغط جزئي لبخار الماء e باستخدام المعادلة (4).

2 تحويل ضغط الهواء الكلي ($p_{tot} = p_{dry} + e$) إلى ضغط الهواء الجاف، p_{dry}، بطرح الضغط الجزئي لبخار الماء، e.

3 حساب التوهين الكلي باستعمال المعادلة (13) حيث تحدد سماكة الطبقة الأسية في المعادلة (14).

4 إذا كان علو سطح الأرض فوق متوسط مستوى سطح البحر غير متاح من البيانات المحلية، يمكن الحصول على تقدير من التوصية ITU-R P.1511.

5 ينبغي أن يكون الجمع في المعادلة (13) من علو سطح الأرض فوق متوسط مستوى سطح البحر إلى أقصى علو في مجموعة البيانات.

6 ينبغي استكمال المستويات الاثني وثلاثين في كل مجموعة بيانات وصفية داخلياً وخارجياً (على سطح الأرض، إذا لزم الأمر) وفقاً لسمك الطبقة الأسية المحدد في المعادلة (14) بافتراض ما يلي:

أ) علاقة خطية بين لوغاريتم الضغط والعلو.

ب) علاقة خطية بين الحرارة والعلو.

ج) علاقة خطية بين لوغاريتم كثافة بخار الماء والعلو.

وإذا لزم الأمر، يمكن استخدام المعادلات من (24أ) إلى (24ج) في الملحق 1 بالتوصية ITU-R P.834 (والخرائط المصاحبة) للاستكمال الداخلي والخارجي لهذه البيانات الوصفية.

7 زاوية الارتفاع عند سطح الأرض أو بالقرب منه هي الزاوية الظاهرية بدلاً من زاوية الارتفاع في الفضاء الطلق. وبالنسبة لزوايا الارتفاع في الفضاء الطلق التي تقل عن أو تساوي 10 درجات، يمكن حساب زاوية الارتفاع الظاهرية من زاوية الارتفاع في الفضاء الطلق باستخدام المعادلة (13) من التوصية ITU-R P.834.

8 يمكن تقدير التوهين الغازي المقدر في المسير المائل عند أي خط عرض وخط طول بين نقاط الشبكة عن طريق الاستكمال الداخلي الثنائي الخطوط للتقديرات المقابلة للتوهين الغازي في المسير المائل عند نقاط الشبكة المحيطة باستخدام الإجراء الوارد في الملحق 1 بالتوصية ITU-R P.1144. وينبغي أن يكون التوهين الغازي للمسير المائل عند كل نقطة شبكة محيطة من علو سطح الأرض فوق متوسط مستوى سطح البحر عند خط العرض وخط الطول الذي يسترعي الاهتمام حتى أقصى علو في كل مجموعة بيانات وصفية.

الملحق 2

التوهين الغازي للمسير المائل في مدى التردد 1-350 GHz

قائمة الرموز

A_o	التوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين
A_w	التوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء
A_{total}	التوهين الغازي الإجمالي للمسير المائل
N''_{oxygen}	الجزء التخيلي للانكسارية المركبة الناجمة عن الأكسجين
$N''_{water\ vapour}$	الجزء التخيلي للانكسارية المركبة الناجمة عن بخار الماء
θ	زاوية الارتفاع
p	احتمال التجاوز
γ_o	التوهين الغازي المحدد الناجم عن الأكسجين
γ_w	التوهين الغازي المحدد الناجم عن بخار الماء
f	التردد
P_s	ضغط السطح الإجمالي اللحظي (الجوي)
$P_s(p)$	ضغط السطح الإجمالي مقابل احتمال التجاوز
p_s	ضغط السطح الجاف اللحظي
$\overline{p_s}$	متوسط ضغط السطح الجاف
T_s	درجة حرارة السطح اللحظية
$\overline{T_s}$	متوسط درجة حرارة السطح
$T_s(p)$	درجة حرارة السطح مقابل احتمال التجاوز
ρ_{w_s}	كثافة بخار الماء السطحي اللحظية
$\overline{\rho_{w_s}}$	متوسط كثافة بخار الماء السطحي
$\rho_{w_s}(p)$	كثافة بخار الماء السطحي مقابل احتمال التجاوز
e_s	الضغط الجزئي لبخار الماء اللحظي

$\overline{e_s}$	متوسط الضغط الجزئي لبخار الماء
V_s	متوسط محتوى بخار الماء المتكامل
$V_s(p)$	محتوى بخار الماء المتكامل مقابل احتمال التجاوز
a_o, b_o, c_o, d_o	معاملات الارتفاع ho
h_o	ارتفاع مكافئ الأكسجين
A, B, f_i, a_i, b_i	معاملات الارتفاع h_w
h_w	ارتفاع مكافئ بخار الماء
a_V, b_V, c_V, d_V	معاملات المتغير K_V
K_V	معامل امتصاص كتلة بخار الماء
k_{V_s}	معلمة شكل ويبول لمحتوى بخار الماء المتكامل
λ_{V_s}	معلمة مقياس ويبول لمحتوى بخار الماء المتكامل

يحتوي هذا الملحق على أساليب التنبؤ التي تقدر التوهين الغازي للمسير المائل بين سطح الأرض والفضاء لزوايا ارتفاع تبلغ 5 درجات وما فوق وترددات بين 1 و350 GHz. وتشمل أساليب التنبؤ طرائق التنبؤ اللحظي، حيث يكون ضغط السطح المحلي الإجمالي (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي أو محتوى بخار الماء المتكامل (انظر الحاشية 1) معروفة (مستقاة على سبيل المثال من محطة أرصاد جوية أو بيانات مسابير راديوية)؛ وطرائق التنبؤ الإحصائي، حيث تُعرف قيم احتمال تجاوز ضغط السطح الإجمالي (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي ومحتوى بخار الماء المتكامل ومعلمات مقياس وشكل ويبول إما من البيانات المحلية طويلة الأجل أو من الخرائط الرقمية المتكاملة الواردة في التوصية ITU-R P.2145. ويُقدم تقريب ويبول للتوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء لاستخدامه في التوصية ITU-R P.1853.

التوهين الغازي للمسير المائل الخالص هو مجموع التوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين، A_o، والتوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء، A_w؛ أي $A_{total} = A_o + A_w$. ويرد في الجدول 3 ملخص لطرائق التنبؤ بالتوهين الغازي للمسير المائل اللحظي والإحصائي. وعلى غرار الملحق 1، لا تشمل طرائق التنبؤ هذه التوهين الغازي الناجم عن نظائر الأكسجين، والأكسجين المثار اهتزازياً، والأوزون، ونظائر الأوزون، والأوزون المُثار اهتزازياً، والجزيئات النزرة الأخرى. والتوهين الغازي الناجم عن هذه المكونات الجوية غير مهم نسبيًا للمسيرات المائلة النمطية بين سطح الأرض والفضاء.

1 طرائق التنبؤ بالتوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين

هناك طريقتان للتنبؤ بالتوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين:

1) كما هو موضح في الفقرة 1.1، طريقة للتنبؤ اللحظي عندما يُعرف ضغط السطح الإجمالي (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي من البيانات المحلية المقاسة لحظياً؛

2) وكما هو موضح في الفقرة 2.1، طريقة للتنبؤ الإحصائي عندما تُعرف إحصاءات ضغط السطح الإجمالي (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي، إما من البيانات المحلية أو من الخرائط المتكاملة الواردة في التوصية ITU-R P.2145.

الجدول 3

ملخص طرائق التنبؤ اللحظي والإحصائي للتوهين الغازي للمسير المائل

	طريقة التنبؤ اللحظي	طريقة التنبؤ الإحصائي
التوهين الناجم عن الأكسجين	الفقرة 1.1 $A_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_o(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s})}{\sin\theta}$ حيث: $h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s + c_o(f) \cdot P_s + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}$ و: $;\ p_s = P_s - e_s e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}$	الفقرة 2.1 $A_o(f, p) = \frac{\gamma_o(f, \overline{p_s}, \overline{T_s}, \overline{e_s}) \cdot h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p))}{\sin\theta}$ حيث: $h_o\left(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p)\right) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s(p) + c_o(f) \cdot P_s(p) + d_o(f) \cdot \rho_{w_s}(p)$ و: $;\ \overline{p_s} = \overline{P_s} - \overline{e_s}\overline{e_s} = \frac{\overline{\rho_{w_s}}\ \overline{T_s}}{216.7}$
التوهين الناجم عن بخار الماء	الفقرة 1.2 $A_w(f, p_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_w(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_w(f)}{\sin\theta}$ حيث: $h_w(f) = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^{3} \frac{a_i}{(f - f_i)^2 + b_i}$ و: $;\ p_s = P_s - e_s e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}$	
	الفقرة 2.2 $A_w(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) \cdot V_s}{\sin\theta}$ حيث: $K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \rho_{w_s} + c_V(f) \cdot T_s + d_V(f) \cdot P_s$	الفقرة 3.2 $A_w(f, p) = \frac{K_V(f, \overline{P_s}, \overline{T_s}, \overline{\rho_{w_s}}) \cdot V_s(p)}{\sin\theta}$ حيث: $K_V(f, \overline{P_s}, \overline{T_s}, \overline{\rho_{w_s}}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \overline{\rho_{w_s}} + c_V(f) \cdot \overline{T_s} + d_V(f) \cdot \overline{P_s}$

1.1 طريقة التنبؤ بالتوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين

التوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين المتنبأ به، A_o:

$$A_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{\gamma_o(f, p_s, T_s, e_s) \cdot h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s})}{\sin\theta} \quad (29)$$

حيث:

f: التردد المقصود، بوحدات GHz

P_s: ضغط السطح الإجمالي اللحظي (الجوي)، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

e_s: الضغط الجزئي لبخار الماء السطحي اللحظي، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب، حيث $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}$

p_s: ضغط السطح الجاف اللحظي، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب، $p_s = P_s - e_s$

T_s: درجة حرارة السطح اللحظية، بوحدات K، في الموقع المرغوب

ρ_{w_s}: كثافة بخار الماء السطحي اللحظية، بوحات g/m³، في الموقع المرغوب

θ: زاوية الارتفاع

γ_o: التوهين الغازي المحدد الناجم عن الأكسجين، بوحدات dB/km، يُعطى بالمعادلة:

$$\gamma_o = 0.1820\, f\, N''_{oxygen}(f) \quad (30)$$

$N''_{oxygen}(f)$، الجزء التخيلي للانكسارية الراديوية المركبة الناتجة عن الأكسجين والمعطاة بالمعادلة (2أ) بالملحق 1؛ حيث:

$$h_o(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_o(f) + b_o(f) \cdot T_s + c_o(f) \cdot P_s + d_o(f) \cdot \rho_{w_s} \quad (31)$$

المعاملات a_o وb_o وc_o وd_o عند التردد المرغوب ينبغي استكمالها خطياً بين الترددات الواردة في الجزء 1 من ملف البيانات، وهو جزء لا يتجزأ من هذه التوصية[3]. ويشمل ملف البيانات المعاملات a_o وb_o وc_o وd_o للترددات بين 1 و350 GHz بخطوات 0,5 GHz وتردد إضافي يساوي 118,75 GHz.

2.1 طريقة التنبؤ بالتوهين الغازي الإحصائي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين

التوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن الأكسجين المتنبأ به، A_o:

$$A_o(f, p) = \frac{\gamma_o(f, \overline{p_s}, \overline{T_s}, \overline{e_s}) \cdot h_o(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p))}{\sin\theta} \quad (32)$$

حيث:

f: التردد المقصود، بوحدات GHz

$\overline{P_s}$: متوسط ضغط السطح الإجمالي (الجوي)، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

$\overline{e_s}$: متوسط الضغط الجزئي لبخار الماء السطحي اللحظي، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب،

حيث:

$$\overline{e_s} = \frac{\overline{\rho_{w_s}}\ \overline{T_s}}{216.7}$$

$\overline{p_s}$: متوسط ضغط السطح الجاف، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب، $\overline{p_s} = \overline{P_s} - \overline{e_s}$

$\overline{T_s}$: متوسط درجة حرارة السطح، بوحدات K، في الموقع المرغوب

---

3 يمكن الاطلاع أيضاً على الجزأين 1 و2 من ملفات البيانات هنا: https://www.itu.int/oth/R1101000002/en

$\overline{\rho_{w_s}}$: متوسط كثافة بخار الماء السطحي، بوحدات g/m³، في الموقع المرغوب

p: احتمال التجاوز (CCDF)[4] المقصود كنسبة مئوية

$P_s(p)$: ضغط السطح الإجمالي (الجوي) عند احتمال التجاوز p، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

$T_s(p)$: درجة حرارة السطح عند احتمال التجاوز p، بوحدات K، في الموقع المرغوب

$\rho_{w_s}(p)$: كثافة بخار الماء السطحي عند احتمال التجاوز p، بوحدات g/m³، في الموقع المرغوب

θ: زاوية الارتفاع

γ_o: التوهين الغازي المحدد الناجم عن الأكسجين، بوحدات dB/km، يُعطى بالمعادلة:

$$\gamma_o = 0.1820\, f\, N''_{oxygen}(f) \tag{33}$$

$N''_{oxygen}(f)$، الجزء التخيلي للانكسارية الراديوية المركبة الناتجة عن الأكسجين والمعطاة بالمعادلة (2أ) بالملحق 1؛ حيث:

$$h_o\big(f, P_s(p), T_s(p), \rho_{w_s}(p)\big) = a_o(f) + b_o(f)\cdot T_s(p) + c_o(f)\cdot P_s(p) + d_o(f)\cdot \rho_{w_s}(p) \tag{34}$$

المعاملات a_o وb_o وc_o وd_o عند التردد المرغوب ينبغي استكمالها خطياً بين الترددات الواردة في الجزء 1 من ملف البيانات، وهو جزء لا يتجزأ من هذه التوصية. ويشمل ملف البيانات المعاملات a_o وb_o وc_o وd_o للترددات بين 1 و350 GHz بخطوات 0,5 GHz وتردد إضافي يساوي 118,75 GHz.

2 طرائق التنبؤ بالتوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء

هناك أربع طرائق للتنبؤ بالتوهين الغازي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء:

1) كما هو موضح في الفقرة 1.2، طريقة للتنبؤ اللحظي، حيث تُعرف القيم الإجمالية لضغط السطح (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي من بيانات محلية مقاسة لحظياً؛

2) كما هو موضح في الفقرة 2.2، طريقة للتنبؤ اللحظي، حيث تُعرف القيم الإجمالية لضغط السطح (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي ومحتوى بخار الماء المتكامل من بيانات محلية مقاسة لحظياً؛

3) كما هو موضح في الفقرة 3.2، طريقة للتنبؤ الإحصائي، حيث تُعرف إحصاءات القيم الإجمالية لضغط السطح (الجوي) ودرجة حرارة السطح وكثافة بخار الماء السطحي ومحتوى بخار الماء المتكامل إما من بيانات محلية أو من خرائط متكاملة في الموقع المطلوب في التوصية ITU-R P.2145؛

4) كما هو موضح في الفقرة 4.2، تقريب ويبول لطريقة التنبؤ الإحصائي للمسير المائل، حيث تُعرف معلمتا مقياس وشكل ويبول، إما من بيانات محلية أو من خرائط متكاملة في الموقع المطلوب في التوصية ITU-R P.2145.

إذا كانت كثافة بخار الماء السطحي اللحظية ومحتوى بخار الماء المتكامل اللحظي متاحين بشكل متزامن، ينبغي استخدام طريقة التنبؤ اللحظي ببخار الماء باستخدام محتوى بخار الماء المتكامل اللحظي.

1.2 طريقة التنبؤ بالتوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء

التوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء المتنبأ به، A_w:

$$A_w\big(f, p_s, T_s, \rho_{w_s}\big) = \frac{\gamma_w(f, p_s, T_s, e_s)\cdot h_w(f)}{\sin\theta} \tag{35}$$

[4] مصطلحا احتمال التجاوز ودالة التوزيع التراكمي التكميلية (CCDF) مترادفان.

حيث:

f: التردد المقصود، بوحدات GHz

P_s: ضغط السطح الإجمالي اللحظي (الجوي)، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

e_s: الضغط الجزئي لبخار الماء السطحي اللحظي، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب، حيث $e_s = \frac{\rho_{w_s} T_s}{216.7}$

p_s: ضغط السطح الجاف اللحظي، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب، $p_s = P_s - e_s$

T_s: درجة حرارة السطح اللحظية، بوحدات K، في الموقع المرغوب

ρ_{w_s}: كثافة بخار الماء السطحي اللحظية، بوحات g/m³، في الموقع المرغوب

θ: زاوية الارتفاع

γ_o: التوهين الغازي المحدد الناجم عن بخار الماء، بوحدات dB/km، يُعطى بالمعادلة:

$$\gamma_w = 0.1820\, f\, N''_{water\ vapour}(f) \tag{36}$$

$N''_{water\ vapour}(f)$، الجزء التخيلي للانكسارية الراديوية المركبة الناتجة عن بخار الماء والمعطاة بالمعادلة (2ب) بالملحق 1؛ حيث:

$$h_w(f) = A \cdot f + B + \sum_{i=1}^{3} \frac{a_i}{(f - f_i)^2 + b_i} \tag{37}$$

حيث $A = 5.6585 \times 10^{-5}$ و$B = 1.8348$، وتُعرض المعاملات f_i وa_i وbi في الجدول 4.

الجدول 4

المعاملات f_i وa_i وbi

b_i	a_i	(GHz)f_i	i
2,7649	2,6846	22,235080	1
4,9219	5,8905	183,310087	2
3,0748	2,9810	325,152888	3

2.2 طريقة التنبؤ رقم 2 بالتوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء

التوهين الغازي اللحظي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء المتنبأ به، A_w:

$$A_w(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = \frac{K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) \cdot V_s}{\sin\theta} \tag{38}$$

حيث:

f: التردد المقصود، بوحدات GHz

P_s: ضغط السطح الإجمالي اللحظي (الجوي)، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

T_s: درجة حرارة السطح اللحظية، بوحدات K، في الموقع المرغوب

ρ_{w_s}: كثافة بخار الماء السطحي اللحظية، بوحات g/m³، في الموقع المرغوب

V_s: محتوى بخار الماء المتكامل، بوحدات kg/m²، في الموقع المرغوب

θ: زاوية الارتفاع

و

$$K_V(f, P_s, T_s, \rho_{w_s}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \rho_{w_s} + c_V(f) \cdot T_s + d_V(f) \cdot P_s \quad (39)$$

المعاملات a_v وb_v وc_v وd_v عند التردد المرغوب ينبغي استكمالها خطياً بين الترددات الواردة في الجزء 2 من ملف البيانات، وهو جزء لا يتجزأ من هذه التوصية[5]. ويحتوى ملف البيانات على المعاملات a_v وb_v وc_v وd_v في الأعمدة 2 و3 و4 و5، على التوالي للترددات بين 1 و350 GHz بخطوات تصاعدية قيمتها 0,5 GHz في العمود 1.

3.2 طريقة التنبؤ بالتوهين الغازي الإحصائي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء

التوهين الغازي الإحصائي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء المتنبأ به، A_w:

$$A_w(f, p) = \frac{K_V(f, \overline{P_s}, \overline{T_s}, \overline{\rho_{w_s}}) \cdot V_s(p)}{\sin\theta} \quad (40)$$

حيث:

f: التردد المقصود، بوحدات GHz

$\overline{P_s}$: متوسط ضغط السطح الإجمالي (الجوي)، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

$\overline{T_s}$: متوسط درجة حرارة السطح، بوحدات K، في الموقع المرغوب

$\overline{\rho_{w_s}}$: متوسط كثافة بخار الماء السطحي، بوحدات g/m^3، في الموقع المرغوب

p: احتمال التجاوز (CCDF) المقصود كنسبة مئوية

$V_s(p)$: محتوى بخار الماء المتكامل عند احتمال التجاوز p، بوحدات kg/m^2 أو mm، من سطح الأرض عند الموقع المرغوب

θ: زاوية الارتفاع

و

$$K_V(f, \overline{P_s}, \overline{T_s}, \overline{\rho_{w_s}}) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \overline{\rho_{w_s}} + c_V(f) \cdot \overline{T_s} + d_V(f) \cdot \overline{P_s} \quad (41)$$

المعاملات a_v وb_v وc_v وd_v عند التردد المرغوب ينبغي استكمالها خطياً بين الترددات الواردة في الجزء 2 من ملف البيانات، وهو جزء لا يتجزأ من هذه التوصية. ويحتوى ملف البيانات على المعاملات a_v وb_v وc_v وd_v في الأعمدة 2 و3 و4 و5، على التوالي للترددات بين 1 و350 GHz بخطوات تصاعدية قيمتها 0,5 GHz في العمود 1.

4.2 تقريب ويبول للتوهين الغازي الإحصائي للمسير المائل الناجم عن بخار الماء

تقريب ويبول للتوهين الغازي الإحصائي للمسير المائل المتنبأ به الناجم عن بخار الماء، A_w:

$$A_w(f, p) = \frac{\lambda_{V_s} \cdot K_V(f, \overline{P_s}, \overline{T_s}, \overline{\rho_{w_s}}) \cdot \left[-\ln\left(\frac{p}{100}\right)\right]^{\frac{1}{k_{V_s}}}}{\sin\theta} \quad (42)$$

حيث:

f: التردد المقصود، بوحدات GHz

$\overline{P_s}$: متوسط ضغط السطح الإجمالي (الجوي)، بوحدات hPa، في الموقع المرغوب

$\overline{T_s}$: متوسط درجة حرارة السطح، بوحدات K، في الموقع المرغوب

[5] يمكن الاطلاع أيضاً على الجزأين 1 و2 من ملفات البيانات هنا: https://www.itu.int/oth/R1101000002/en

$\overline{\rho_{w_s}}$: متوسط كثافة بخار الماء السطحي، بوحدات g/m^3، في الموقع المرغوب

p: احتمال التجاوز (CCDF) المقصود كنسبة مئوية

λ_{V_s}: معلمة مقياس ويبول لبخار الماء السطحي عند الموقع المرغوب

k_{V_s}: معلمة شكل ويبول لبخار الماء السطحي عند الموقع المرغوب

θ: زاوية الارتفاع

و

$$K_V\left(f, \overline{P_s}, \overline{T_s}, \overline{\rho_{w_s}}\right) = a_V(f) + b_V(f) \cdot \overline{\rho_{w_s}} + c_V(f) \cdot \overline{T_s} + d_V(f) \cdot \overline{P_s} \qquad (43)$$

المعاملات a_v وb_v وc_v وd_v عند التردد المرغوب ينبغي استكمالها خطياً بين الترددات الواردة في الجزء 2 من ملف البيانات، وهو جزء لا يتجزأ من هذه التوصية. ويحتوى ملف البيانات على المعاملات a_v وb_v وc_v وd_v في الأعمدة 2 و3 و4 و5، على التوالي للترددات بين 1 و350 GHz بخطوات تصاعدية قيمتها 0,5 GHz في العمود 1.