

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.676-12
(2019/08)

**التوهين الناجم عن الغازات الجوية
والمؤثرات ذات الصلة**

P السلسلة

انتشار الموجات الراديوية



تمهيد

يضع 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 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 الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار 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، 2021

© ITU 2021

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.676-12

التوهين الناجم عن الغازات الجوية والمؤثرات ذات الصلة

(المسألة ITU-R 201/3)

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

مجال التطبيق

- تعرض هذه التوصية أساليب تقدير التوهين الناجم عن الغازات الجوية على مسيرات الأرض والمسيرات المائلة باستعمال:
- أ) الأسلوب الوارد في الملحق 1 لتقدير التوهين الناجم عن الغازات الجوية المحسوب بجمع فرادى خطوط الامتصاص الصالحة بالنسبة لمدى التردد 1-1000 GHz؛
- ب) الأسلوبين المبسطين التقريبيين الواردين في الملحق 2 لتقدير التوهين الغازي المنطبق في مدى التردد 1-350 GHz؛
- ج) مؤثرات الانتشار الأخرى التي يمكن حسابها بجمع وظائف فرادى خطوط الامتصاص.

المصطلحات الرئيسية

امتصاص غازي، توهين محدد، توهين المسير المائل، التوهين الكلي، بخار الماء، الأوكسجين، الهواء الجاف، التشتت، متدفق صعوداً، متدفق هبوطاً.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

ضرورة تقدير التوهين والتشتت والضوضاء المتدفقة صعوداً والضوضاء المتدفقة هبوطاً على المسيرات المائلة والتوهين على مسيرات الأرض بسبب الغازات الجوية،

توصي

- 1 بأن تستعمل للتطبيقات العامة الإجراء الوارد في الملحق 1 لحساب التوهين بالغازات الجوية والمؤثرات ذات الصلة؛
- 2 بأن يستعمل لتقدير تقريبي الإجراء الأبسط حسابياً الوارد في الملحق 2 لحساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية.

دليل إرشادي إلى هذه التوصية

تقدم هذه التوصية الأساليب الثلاثة التالية للتنبؤ بالتوهين الغازي النوعي وعلى المسير الناتج عن الأوكسجين وبخار الماء:

- 1 حساب التوهين الغازي النوعي وعلى المسير باستخدام طريقة جمع مساهمات خطوط الامتصاص الواردة في الملحق 1 بافتراض الضغط الجوي ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء مقابل الارتفاع؛
- 2 تقدير تقريبي للتوهين الغازي النوعي وعلى المسير على النحو الوارد في الملحق 2 بافتراض كثافة بخار الماء على سطح الأرض؛
- 3 تقدير تقريبي لتوهين المسير على النحو الوارد في الملحق 2 بافتراض المحتوى المتكامل لبخار الماء عبر المسير.

* أدخلت لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية في عامي 2020 و2021، طبقاً للقرار ITU-R 1.

ويمكن لأساليب التنبؤ هذه استعمال بيانات الأرصاد الجوية المحلية أو الظروف الجوية المرجعية أو خرائط الأرصاد الجوية المقابلة لاحتمال مطلوب للتجاوز والواردة في توصيات أخرى من سلسلة التوصيات P لقطاع الاتصالات الراديوية، وذلك في حالة عدم توفر البيانات المحلية.

بالإضافة إلى التوهين الغازي النوعي وعلى المسير، تقدم هذه التوصية أساليب للتنبؤ بالتشتت، وحرارة الضوضاء المتدفقة صعوداً والمتدفقة هبوطاً، والانحناء الجوي، والتأخير الزائد للمسير الجوي باستخدام الجمع سطرًا سطرًا في الملحق 1.

التوهين النوعي

المعادلة (1) القابلة للتطبيق على الترددات حتى 1 000 GHz يمكن استعمالها للتنبؤ بالتوهين النوعي. ويتطلب هذا الأسلوب الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء في الموقع المحدد. وفي حالة عدم وجود بيانات محلية، يمكن أن تستخدم بدلاً من الكثافة المرجعية المعيارية لبخار الماء على السطح عند مستوى الأرض البالغة $7,5 \text{ g/m}^3$ ، توليفة من الآتي: أ) المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.835، وب) خريطة المتوسط السنوي لدرجة حرارة سطح الأرض الواردة في التوصية ITU-R P.1510، وج) خرائط كثافة بخار الماء على سطح الأرض مقابل احتمال التجاوز الواردة في التوصية ITU-R P.836.

توهين المسير المائل (الاتجاه أرض-فضاء)

يمكن استخدام المعادلة (13) أو المعادلتين (40) أو (41).

- تتطلب المعادلة (13) معرفة مواصفات درجة الحرارة والضغط وكثافة بخار الماء عبر المسير. وفي حالة عدم توفر بيانات المواصفات المحلية، يمكن استعمال مواصفات الظروف الجوية المرجعية الواردة في التوصية ITU-R P.835. ويمكن أن تستخدم بدلاً من الكثافة المرجعية المعيارية لبخار الماء على السطح عند مستوى الأرض البالغة $7,5 \text{ g/m}^3$ ، خرائط كثافة بخار الماء على سطح الأرض مقابل احتمال التجاوز الواردة في التوصية ITU-R P.836.
- تتطلب المعادلة (40) معرفة الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء على سطح الأرض. والمعادلة (40) عبارة عن تقريب للمعادلة (13) يمكن تطبيقها على الترددات حتى 350 GHz بافتراض المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية وقيمة عشوائية لكثافة بخار الماء على سطح الأرض بقيمة أسية سالبة لكثافة بخار الماء مقابل الارتفاع. ويمكن استخدام المعادلة (40) للتنبؤ: أ) بالتوهين الغازي اللحظي لقيمة محددة من الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء على السطح أو ب) التوهين الغازي المقابل لكثافة بخار الماء على السطح عند احتمال مطلوب للتجاوز. وفي حالة عدم وجود بيانات محلية لكثافة بخار الماء على السطح، يمكن استخدام خرائط كثافة بخار الماء على السطح الواردة في التوصية ITU-R P.836.
- تتطلب المعادلة (41) معرفة درجة الحرارة والضغط على السطح والمحتوى المتكامل لبخار الماء عبر المسير. وكما هو الحال مع المعادلة (40)، يمكن استخدام المعادلة (41) للتنبؤ: أ) بالتوهين الغازي اللحظي لقيمة محددة من الضغط ودرجة الحرارة على السطح والمحتوى المتكامل لبخار الماء، أو ب) التوهين الغازي المقابل للمحتوى المتكامل لبخار الماء عند احتمال مطلوب للتجاوز. وفي حالة عدم توفر بيانات محلية للمحتوى المتكامل لبخار الماء، يمكن استخدام خرائط المحتوى المتكامل لبخار الماء الواردة في التوصية ITU-R P.836.

في حالة توفر بيانات كثافة بخار الماء على السطح والمحتوى المتكامل لبخار الماء، فإن المعادلة (41) مع استعمال البيانات المحلية للمحتوى المتكامل لبخار الماء تعتبر أكثر دقة من المعادلة (40) مع استعمال البيانات المحلية لكثافة بخار الماء. وبالمثل، في حالة عدم توفر بيانات محلية، فإن المعادلة (41) مع استعمال خرائط المحتوى المتكامل لبخار الماء الواردة في التوصية ITU-R P.836، تعتبر أكثر دقة من المعادلة (40) مع استعمال خرائط كثافة بخار الماء على السطح الواردة في التوصية ITU-R P.836.

المعادلة (41)	المعادلة (40)	المعادلة (13)	
GHz 350>	GHz 350>	GHz 1 000>	مدى الترددات
تقريب		الأفضل في مجموع كل خط على حدة	الدقة
مواصفة المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية		قيم عشوائية	الضغط مقابل الارتفاع
			درجة الحرارة مقابل الارتفاع
المحتوى المتكامل لبخار الماء بدلاً من كثافة بخار الماء مقابل الارتفاع	القيمة السطحية مع مواصفة أسية سالبة مقابل الارتفاع		كثافة بخار الماء مقابل الارتفاع

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 GHz 1 000 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 اللاتنان الصادر عن الأوكسجين تحت GHz 10، وللتوهين المستحث من ضغط الأوزون فوق GHz 100 وللطيف المستمر لبخار الماء الذي يسمح بمراعاة القيم المقيسة لامتناس بخار الماء التي تفوق القيم المتوقعة. ويوضح الشكل 1 التوهين النوعي باستخدام طريقة التنبؤ، والمحسوب من 0 إلى GHz 1 000 بفواصل يبلغ كل منها GHz 1، من أجل ضغط مقداره 1 013,25 hPa ودرجة حرارة هي 15° مئوية وذلك في حالي كثافة بخار الماء البالغة 7,5 g/m³ والجو المعياري (الجاف).

ويندمج بجوار GHz 60 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 ببعض أنواع الجزئيات الأخرى (مثل: أنواع نظائر الأوكسجين وأنواع 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:

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

حيث γ_o و γ_w هما توهينان نوعيان (dB/km) سببهما الهواء الجاف (التوهين الناجم عن الأوكسجين و ضغط الأوزون و طيف Debye اللاتنان) و بخار الماء على التوالي، و f هو التردد (GHz) و $N''_{Oxygen}(f)$ و $N''_{Water Vapour}(f)$ هما الجزآن التخيليان من الانكسارية المركبة المرتبطة بالتردد:

$$(أ2) \quad N''_{Oxygen}(f) = \sum_i (Oxygen) S_i F_i + N''_D(f)$$

$$(ب2) \quad N''_{Water Vapour}(f) = \sum_i (Water Vapour) S_i F_i$$

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

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

وتحدد شدة الخط على النحو التالي:

$$(3) \quad \begin{aligned} S_i &= a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2 (1 - \theta)] && \text{لأوكسجين} \\ &= b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp [b_2 (1 - \theta)] && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

حيث:

p : ضغط الجو الجاف (hPa)

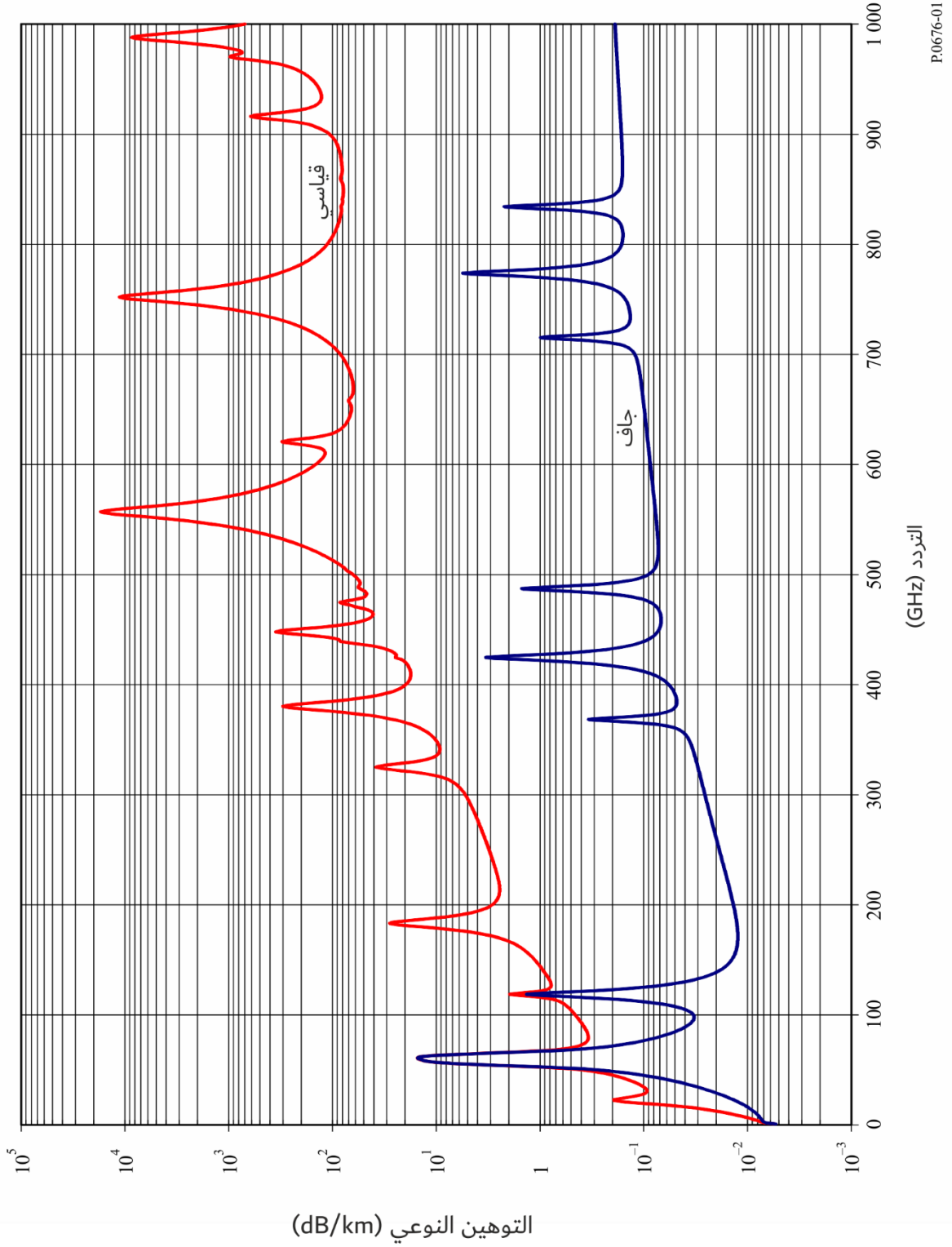
e : الضغط الجزئي لبخار الماء معبراً عنه (hPa) (الضغط الجوي الكلي، $p_{tot} = p + e$)

$300/T = \theta$

T : درجة الحرارة (K).

الشكل 1

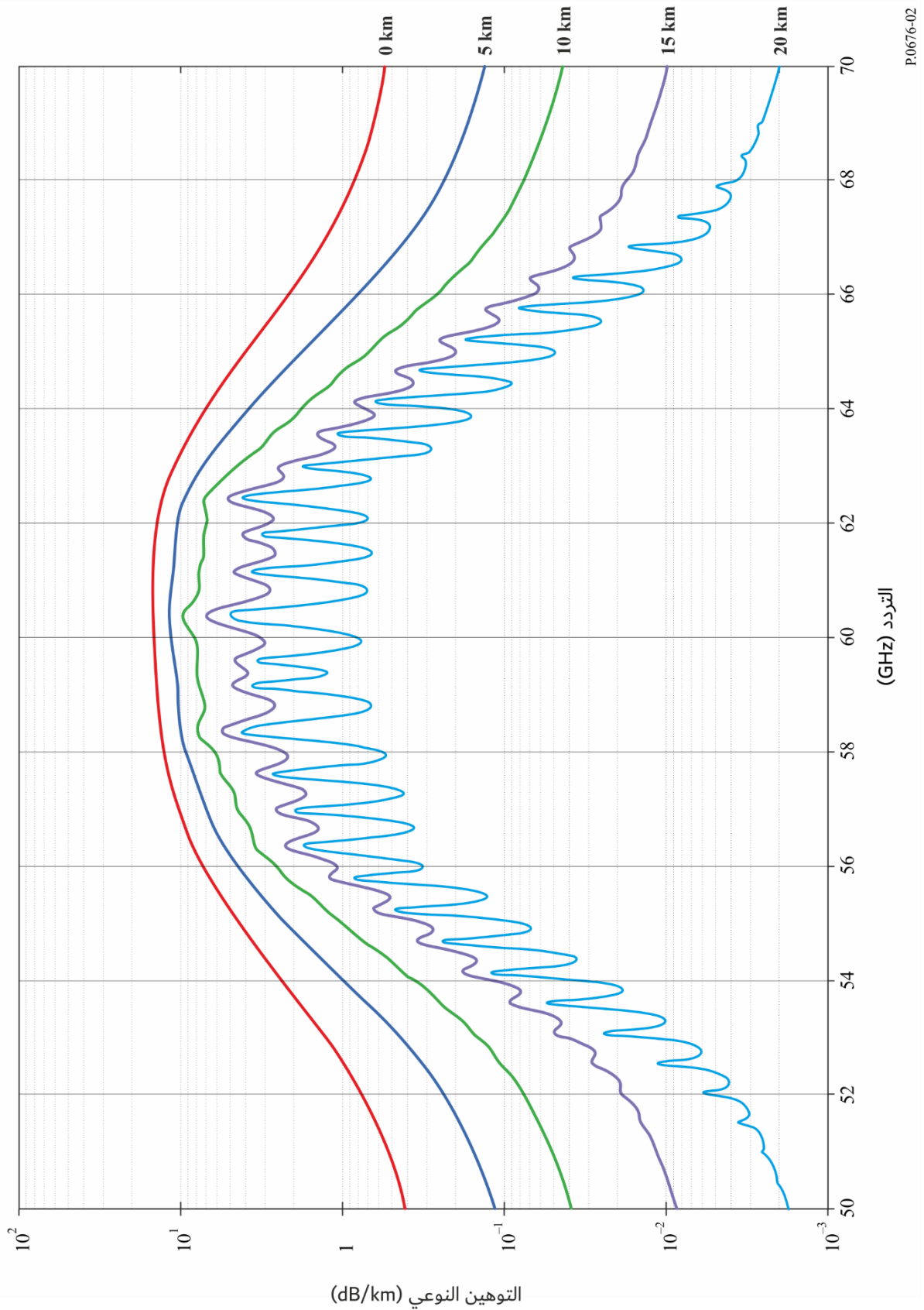
التوهين النوعي الناجم عن الغازات الجوية محسوباً في فواصل قدر كل منها 1 GHz بما فيها الترددات المركزية للخطوط



P.0676-01

الشكل 2

التوهين النوعي في مدى الترددات 50-70 GHz في الارتفاعات الميمنة، والمحسوب على فواصل 10 MHz، بما في ذلك مراكز الخطوط (0 و 5 و 10 و 15 و 20 km)



P.0676-02

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:

$$(4) \quad e = \frac{\rho T}{216,7}$$

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

تعطي العبارة التالية عامل شكل الخط:

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

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

$$(6) \quad \begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0,8 - a_4)} + 1,1 e \theta) && \text{لأوكسجين} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

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

$$(6) \quad \begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \times 10^{-6}} && \text{لأوكسجين} \\ &= 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \Delta f^2 + \frac{2,1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

و δ عامل تصحيح ينتج عن تأثيرات التداخل في خطوط الأوكسجين:

$$(7) \quad \begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} && \text{لأوكسجين} \\ &= 0 && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

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 الأوزون فوق 100 GHz.

$$(8) \quad N_D''(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right]$$

حيث d هي معلمة العرض لطيف Debye:

$$(9) \quad d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8}$$

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:

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

حيث r_0 هو طول المسير (km).

2.2 المسيرات المائلة

يقدم القسمان 1.2.2 و 2.2.2 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 و 5.2.2 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 و h_2 و $h_2 > h_1 \geq 0$ km هو:

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

حيث:

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

$\gamma(h)$ هو التوهين النوعي على العلو h و R_E هو متوسط نصف قطر الأرض (371 6 km) و φ_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 العددي¹، 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.

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

حيث γ_i هو التوهين النوعي (dB/km) للطبقة رقم i وفق المعادلة (1)، و a_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:

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

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

$$(15) \quad h_i = \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j = 0.0001 \frac{e^{\frac{i-1}{100}} - 1}{\frac{1}{100} - 1}$$

وفي حال استخدام أحد الأغلفة الجوية المعيارية المرجعية الستة المحددة في التوصية ITU-R P.835، تعرّف البيانات الوصفية الجوية لقيم علو هندسي تصل إلى 100 km، وفي هذه الحالة $i_{max} = 922$ و $\delta_{922} = 0.99966$ km و $h_{922} = 99.457$ km.

وفي مسير مائل بين علو أخفض داخل الغلاف الجوي، h_{lower} ، وعلو أعلى داخل الغلاف الجوي، $0 \text{ km} \leq h_{lower} <$ ($h_{upper} \leq 100 \text{ km}$)، 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 الأسّي للعلو بالنسبة لسطح الأرض على النحو التالي:

(أ) يُحسب i_{lower} و i_{upper} :

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

¹ 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.

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

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_{lower} ويستعاض عن الحد الأعلى بقيمة $i_{upper} - 1$.

(ج) يستعاض عن 0.0001 في المعادلة (14) بالمتحول m، حيث:

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

(د) يستعاض عن المعادلة (15) بالمعادلة التالية:

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

وينبغي استخدام المعادلات من (16أ) إلى (16د) بحذر بسبب احتمال تردّي 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 و n_i هو مؤشر الانكسار الراديوي للطبقة رقم i^{th} . و n_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. و α_i و β_{i+1} هما زاويتا ورود الدخول والخروج عند السطح البيني بين الطبقة رقم i والطبقة رقم $(i+1)$ ، و r_i هو نصف القطر من مركز الأرض إلى بداية الطبقة i^{th} ، و $r_{i+1} = r_i + \delta_i$ ، و r_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 قيمتهما عند نقطة منتصف الطبقة رقم i^{th} ، أي على علو $r_i + \delta_i/2$.

وطول المسير a_i هو:

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

وزاوية α_i هي:

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

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

وقد ألغيت المعادلة (18أ) بسبب تردّي الدقة. و β_1 هي زاوية السمّت المحلية عند سطح الأرض أو بالقرب منه (مكمل زاوية الارتفاع الظاهرية، ϕ ، أي $\beta_1 = 90^\circ - \phi$).

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

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

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

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

وبالمثل، يمكن حساب α_i على النحو التالي:

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

في الاتجاه أرض-فضاء، قد تصح المعادلات (19أ) أو (19ب) و(19ج) غير صالحة عند زوايا الارتفاع الظاهرية الأولية > 1 درجة (أي زاوية السمات الأولية الظاهرية، $\beta_1 > 89^\circ$) 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 تحلو من خاصية الانتشار عبر المجاري في تدرجات الانكسارية.

ويبين الشكل 4 التوهين باتجاه السمات 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 $\rho_0 = 7.5 \text{ g/m}^3$ ، والغلاف الجوي "الجاف" هو متوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي وفيه $\rho_0 = 0 \text{ g/m}^3$.

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 محطة أرضية على علو h_1 بزوايا ارتفاع ظاهرية قدرها $90^\circ - \beta_1$. ومن قانون Snell بالإحداثيات القطبية:

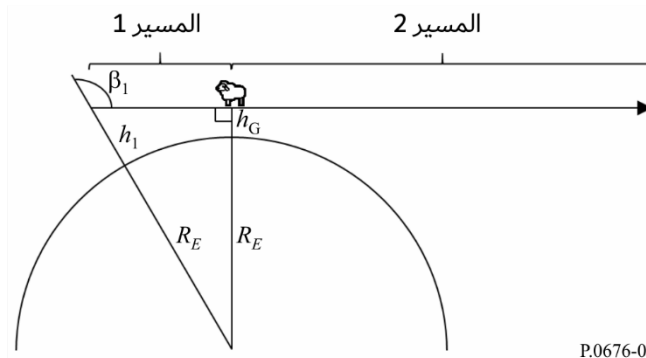
$$(20) \quad n(h_G)(R_E + h_G) = n(h_1)(R_E + h_1) \sin \beta_1$$

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 بزوايا ارتفاع ظاهرية 0° ، والمسير 2 هو التوهين الغازي بين محطة أرضية افتراضية على علو h_G km وأقصى علو جوي (عادةً 100 km) بزوايا ارتفاع ظاهرية 0° .

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:

$$(أ21) \quad \varphi_s = -\cos^{-1}\left(\frac{r_e n_e}{r_s n_s} \cos \varphi_e\right)$$

و

$$(ب21) \quad \varphi_e = \cos^{-1}\left(\frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s\right)$$

حيث n_e هو مؤشر الانكسار على علو المحطة الأرضية و r_e هو نصف القطر من مركز الأرض إلى المحطة الأرضية ($r_e \geq R_E$)، و n_s هو مؤشر الانكسار على علو المحطة الفضائية، و r_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 $1 > \frac{r_s n_s}{r_e n_e} \cos \varphi_s$ ، 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:

$$(أ22) \quad Bending = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} (\beta_{i+1} - \alpha_i)$$

$$(ب22) \quad = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} \left[\sin^{-1}\left(\frac{n_1 r_1}{n_{i+1} r_{i+1}} \sin \beta_1\right) - \sin^{-1}\left(\frac{n_1 r_1}{n_i r_{i+1}} \sin \beta_1\right) \right]$$

حيث تعني القيمة الموجبة للانحناء أن الشعاع ينحني نحو الأرض. والمعادلة (9) من التوصية ITU-R P.834 هي تقريب لمعادلتين (أ22) و(ب22) لمتوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي.

5.2.2 طول المسير الجوي الزائد

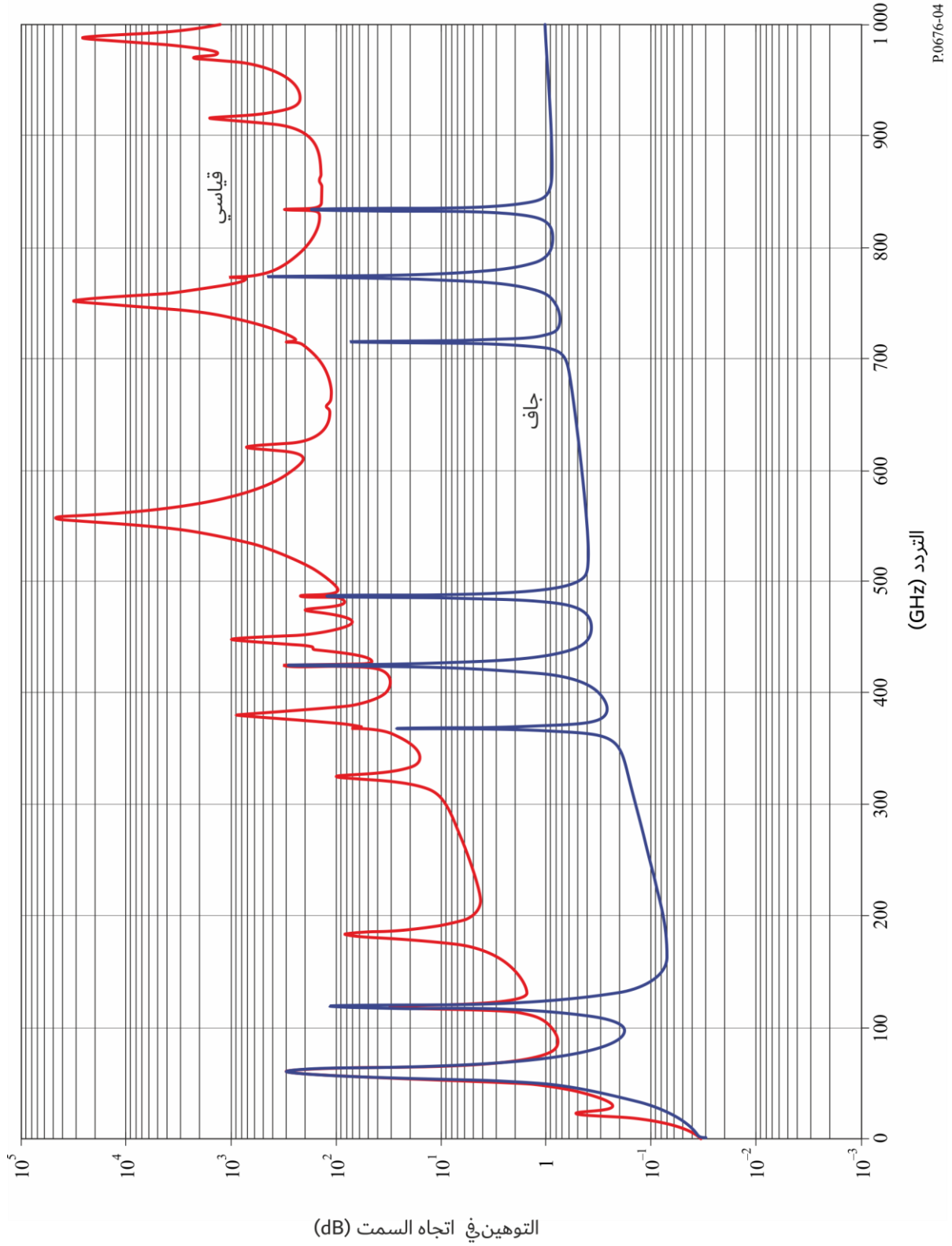
بما أن مؤشر الانكسار التروبوسفيري أكبر من 1، فإن طول المسير الجوي الفعال يتجاوز طول المسير الهندسي، وفي هذه الحالة يكون طول المسير الجوي الزائد، ΔL :

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

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.

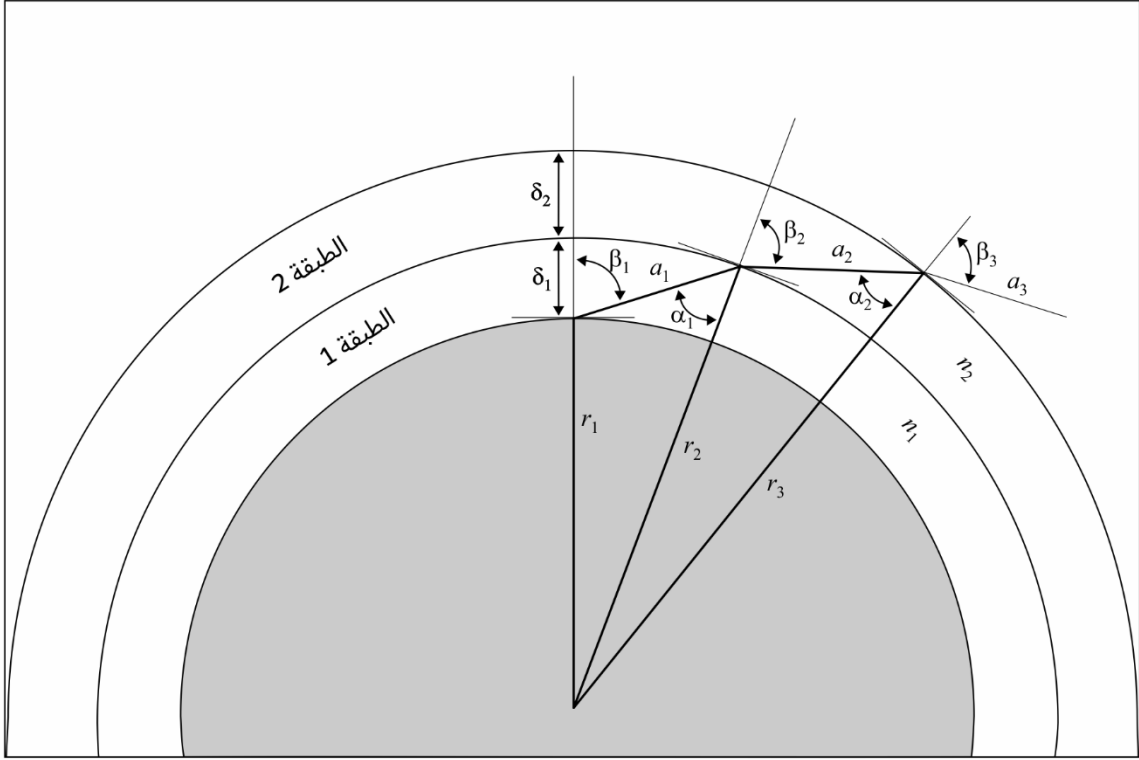
الشكل 4

توهين السمات 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:

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

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

$$(أ25) \quad N'_{Oxygen}(f) = \sum_i (Oxygen) S_i F'_i + N'_D(f)$$

$$(ب25) \quad N'_{Water Vapour}(f) = \sum_i (Water Vapour) S_i F'_i$$

حيث:

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

$$(ج25) \quad F'_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{(f_i - f) + \delta \Delta f}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} - \frac{(f_i + f) + \delta \Delta f}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right]$$

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:

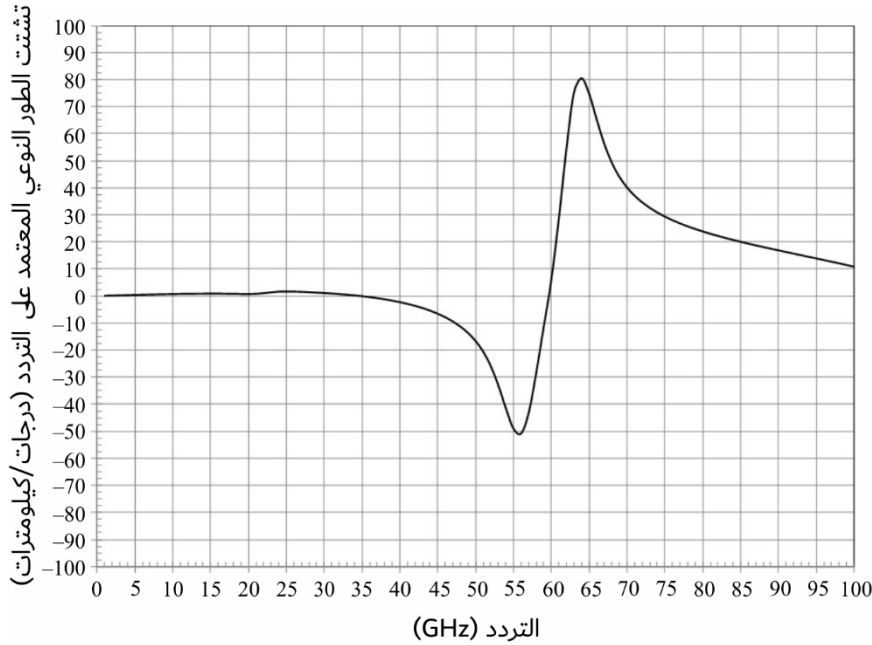
$$(25) \quad N'_D(f) = \frac{-6.14 \times 10^{-5} p \theta^2 f^2}{f^2 + d^2}$$

ويرد تعريف Δf في المعادلة (6ب)، و δ في المعادلة (7)، و d في المعادلة (9).

ويبين الشكل 6 تشتت الطور النوعي المعتمد على التردد للغلاف الجوي المعياري ($p = 1013.25 \text{ hPa}$, $\rho = 7.5 \text{ g/m}^3$, $T = 15^\circ\text{C}$).

الشكل 6

تشتت الطور النوعي المعتمد على التردد للغلاف الجوي المعياري
($p = 1013.25 \text{ hPa}$, $\rho = 7.5 \text{ g/m}^3$, $T = 15^\circ\text{C}$)



P.0676-06

4 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة هبوطاً والمتدفقة صعوداً

تعرف 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 درجات 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، $T_B(f_{\text{GHz}}, T_j)$ هي حرارة لمعان الموجات المكروية للطبقة رقم j المحددة بواسطة:

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

حيث T_j هي الحرارة الفيزيائية للطبقة رقم j^{th} . ويمكن تقريب $T_B(f_{GHZ}, T_j)$ تقريباً جيداً بواسطة T_j من أجل $f_{GHZ} < 0.42 T_j$ ؛ و γ_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 الكونية الموهنة بالتوهين الجوي وب) حرارة لمعان الموجات المكروية الجوية المتدفقة هبوطاً، على النحو التالي:

$$(27) \quad T_{downwelling} = T_B(f_{GHZ}, 2.73) 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)} + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHZ}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=1}^j a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (K)$$

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

$$(أ27) \quad \text{الخطوة 1: وضع } T_{B,Downwelling} = 0.048 \left[\frac{f_{GHZ}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHZ}}{2.73}\right) - 1} \right]$$

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

$$(ب27) \quad \text{الخطوة 2: وضع } T_{B,Downwelling,last} = T_{B,Downwelling}$$

$$(ج27) \quad T_B = 0.048 \left[\frac{f_{GHZ}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHZ}}{T_j}\right) - 1} \right] \text{ الخطوة 3: وضع}$$

$$(د27) \quad L_j = 10^{-\frac{a_j \gamma_j}{10}} \text{ الخطوة 4: وضع}$$

$$(ه27) \quad \text{الخطوة 5: وضع } T_{B,Downwelling} = [T_{B,Downwelling,last} L_j + (1 - L_j) T_B]$$

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

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

وإذا لم تكن البيانات الوصفية 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:

$$(28) \quad T_{B,upwelling} = (\epsilon T_B(f_{GHz}, T_{Earth}) + \rho T_{downwelling}) \times 10^{-\left(\frac{\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j}{10}\right)} \\ + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \left(10^{\frac{a_j \gamma_j}{10}} - 1\right) 10^{-\left(\frac{\sum_{i=j}^k a_i \gamma_i}{10}\right)} \quad (K)$$

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

$$(أ28) \quad T_{B,Upwelling} = \epsilon 0.048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_{Earth}}\right)} - 1 \right] + \rho T_{B,downwelling} \quad \text{الخطوة 1: وضع}$$

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

$$(ب28) \quad T_{B,Upwelling,last} = T_{B,Upwelling} \quad \text{الخطوة 2: وضع}$$

$$(ج28) \quad T_B = 0.048 \left[\frac{f_{GHz}}{\exp\left(\frac{0.048 f_{GHz}}{T_j}\right)} - 1 \right] \quad \text{الخطوة 3: وضع}$$

$$(د28) \quad L_j = 10^{-\frac{a_j \gamma_j}{10}} \quad \text{الخطوة 4: وضع}$$

$$(هـ28) \quad T_{B,Upwelling} = [T_{B,Upwelling,last} L_j + (1 - L_j) T_B] \quad \text{الخطوة 5: وضع}$$

حيث:

ϵ : انبعاثية سطح الأرض

ρ : انعكاسية سطح الأرض

$$\rho = 1 - \epsilon$$

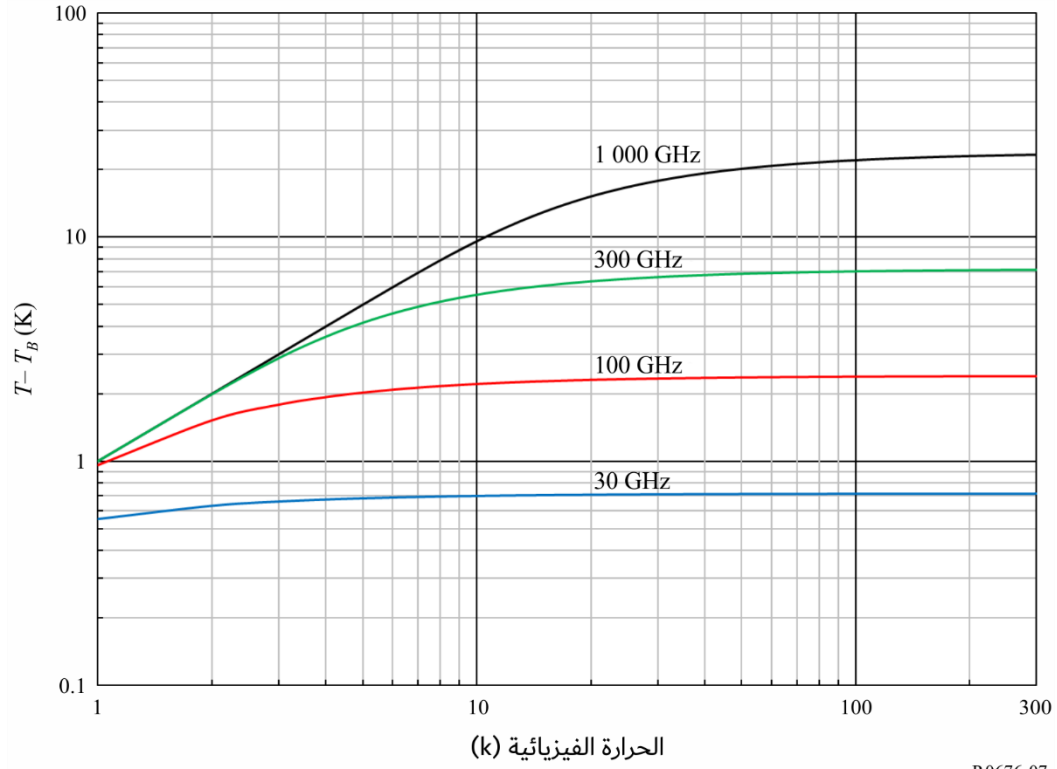
وفي غياب بيانات محلية أو إرشادات أخرى، يمكن استخدام قيمة 0,95 للانبعاثية ϵ .

ويوضح الشكل 9 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً السمات والغلاف الجوي العالمي السنوي المرجعي المعياري (أي المتوسط)

حيث $T_{Earth} = 290 \text{ K}$ و $\rho = 0.05$ و $\epsilon = 0.95$.

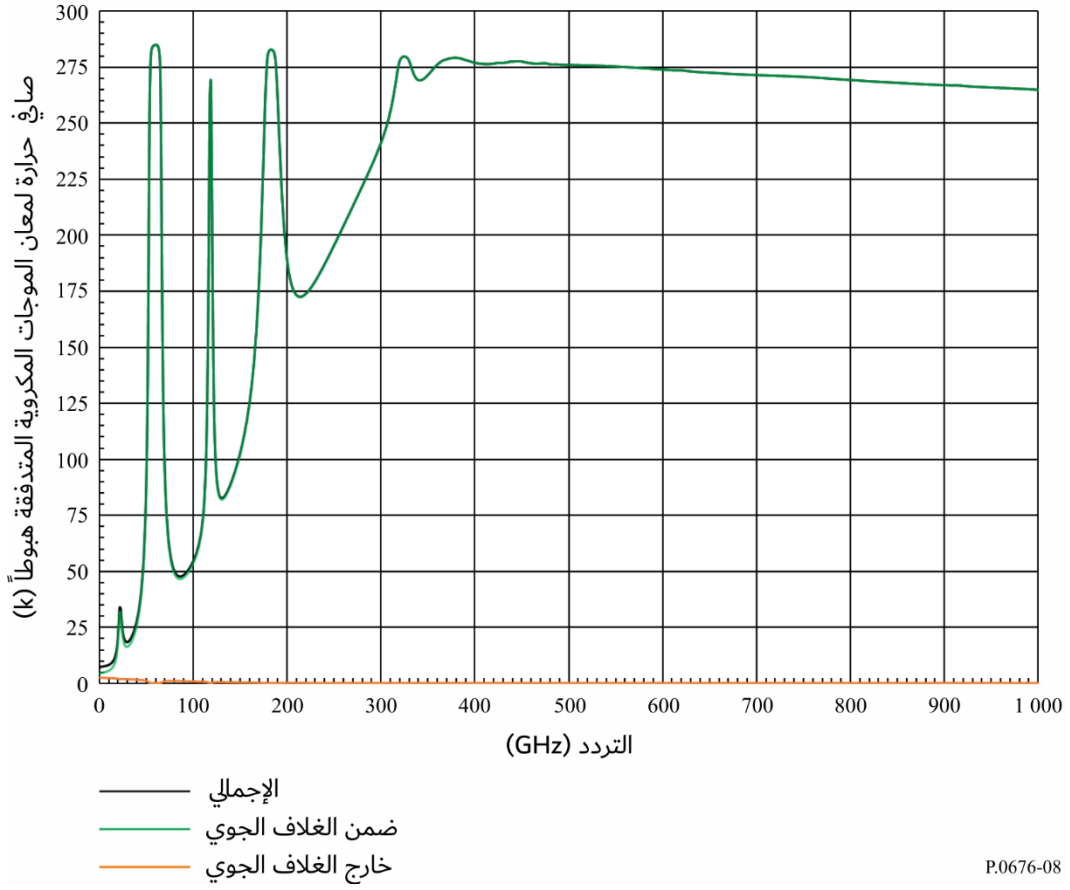
الشكل 7

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



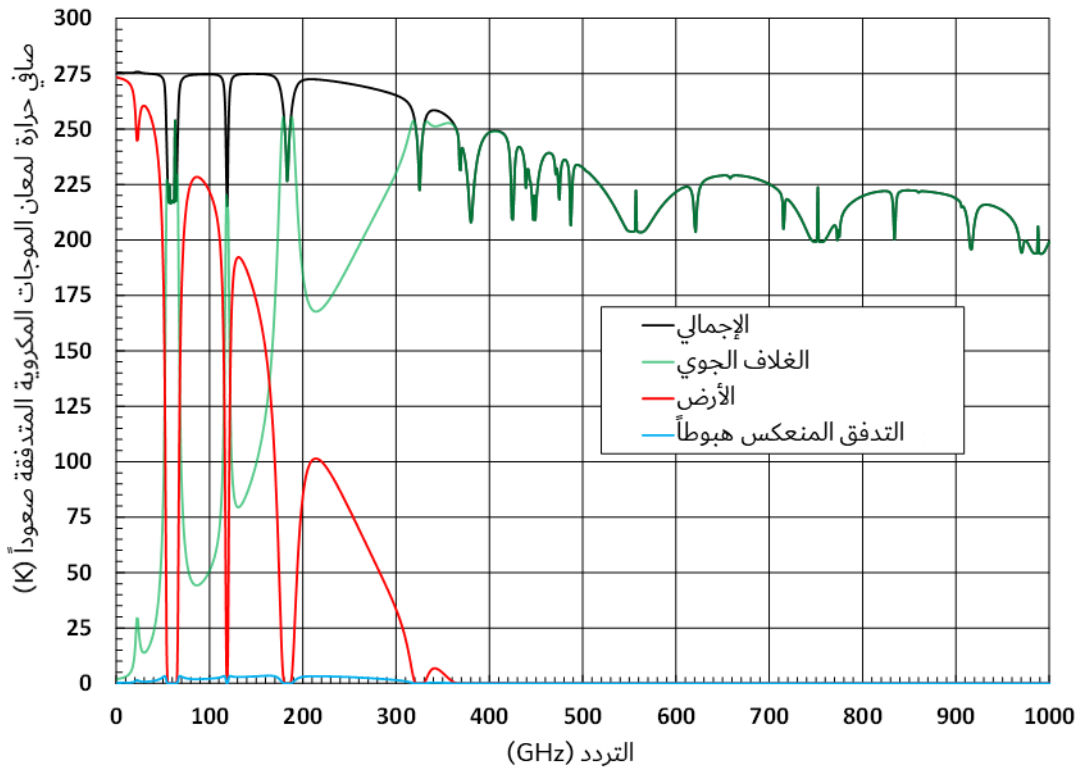
الشكل 8

حرارة لمعان الموجات الميكروية المتدفقة هبوطاً لمسير السميت 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 الرأسية 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 لسماك الطبقة الرأسية 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 (24a) إلى (24c) 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 لزاوية 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

التقييم التقريبي للتوهين بالغازات الجوية في نطاق التردد 1-350 GHz

يتضمن هذا الملحق خوارزميات مبسطة للتقدير التقريبي للتوهين بالغازات الجوية من أجل مدى التردد المحدود من 1 GHz إلى 350 GHz، وزوايا ارتفاع المسير بمقدار 5 درجات وما فوق، ومدى محدود من ظروف الأرصاد الجوية وتنوع محدود من التشكيلات الهندسية.

1 التوهين النوعي

يتطابق التوهين النوعي الذي يعزى إلى الأكسجين، γ_o (dB/km)، والتوهين النوعي الذي يعزى إلى بخار الماء، γ_w (dB/km)، مع γ_o و γ_w في المعادلة (1). ويتطابق التوهين النوعي للهواء الرطب الذي يعزى إلى الأكسجين، γ_o (dB/km)، والتوهين النوعي للهواء الرطب الذي يعزى إلى بخار الماء، γ_w (dB/km)، المستخدمان في هذه الأساليب المبسطة، مع γ_o و γ_w في المعادلة (1).

والضغط الجاف p والحرارة T وكثافة بخار الماء، ρ ، هي قيم عند سطح الأرض وفي حالة عدم وجود بيانات محلية، يمكن استخدام المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.835 لتحديد الضغط الجاف والحرارة وكثافة بخار الماء.

ويعرض الشكل 10 التوهين النوعي للهواء الجاف (الجاف) ولبخار الماء بكثافة $7,5 \text{ g/m}^3$ فقط (بخار الماء) والتوهين النوعي الكلي (الكلي) على ترددات من 1 إلى 350 GHz عند مستوى سطح البحر بالنسبة للمتوسط السنوي للأجواء المرجعية العالمية الواردة في التوصية ITU-R P.835. علاوة على ذلك، يمكن العثور على قيم وثافة بخار الماء على سطح الأرض في التوصية ITU-R P.836.

2 التوهين في المسير

1.2 المسيرات للأرض

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

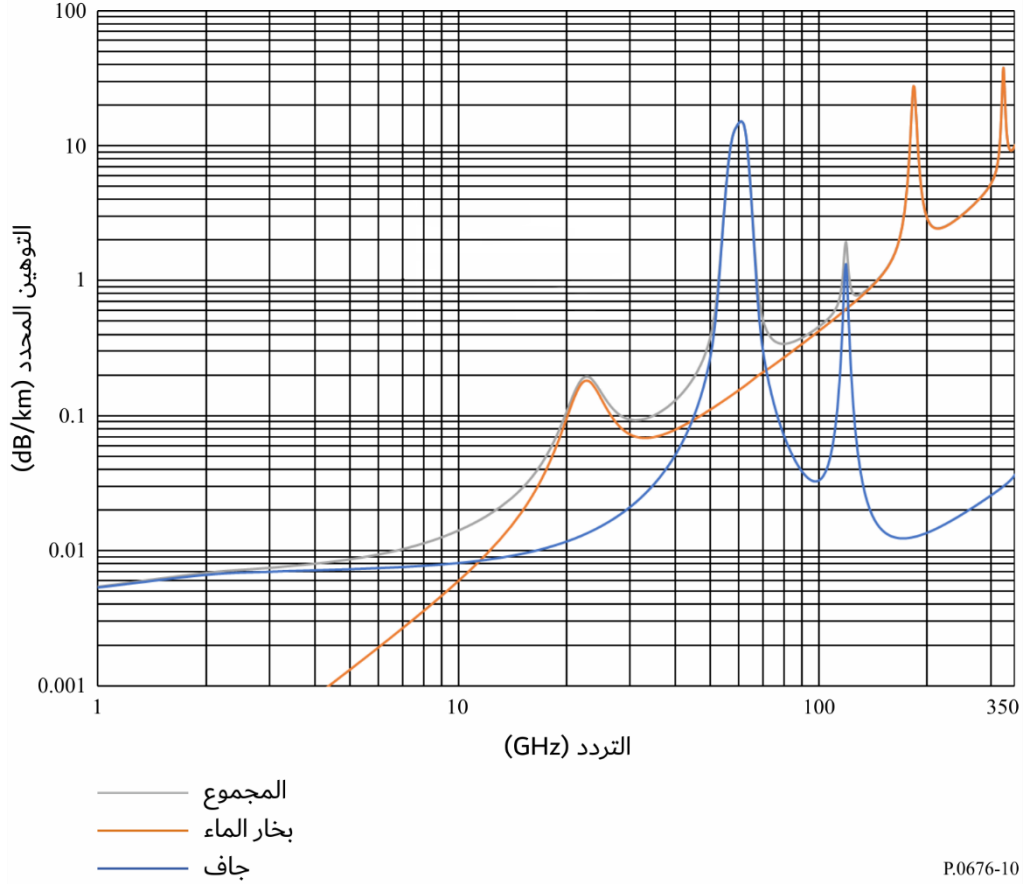
$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \text{ dB} \quad (29)$$

حيث r_0 هو طول المسير بالكيلومتر (km).

الشكل 10

التوهين النوعي نتيجة للغازات الجوية

(الضغط = 1 013,25 hPa؛ درجة الحرارة = 15 °C؛ كثافة بخار الماء = 7,5 g/m³)



2.2 المسيرات المائلة

يتضمن هذا القسم خوارزميات لتقدير إجمالي التوهين الغازي للمسيرات المائلة عبر الغلاف الجوي للأرض من خلال تحديد الارتفاعات المكافئة للأوكسجين وبخار الماء التي يجب أن يُضرب بها التوهين الخاص بالأوكسجين وبخار الماء لتقدير التوهين المقابل للأوكسجين وبخار الماء في اتجاه السم. ويتم حساب التوهين الخاص بالأوكسجين وبخار الماء على أساس الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء على ارتفاع المحطة الأرضية باستخدام الطريقة الموضحة في القسم 1 من الملحق 1؛ ويتم حساب الارتفاعات المكافئة للأوكسجين وبخار الماء على أساس الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء عند سطح الأرض. ويفترض مفهوم الارتفاع المكافئ الخطأ أسياً في التوهين الجوي مقابل الارتفاع. ويمكن استخدام هذه الخوارزميات لتقدير إجمالي التوهين الغازي للمسيرات المائلة للترددات خارج 0,5 GHz من مراكز الخطوط الطيفية لارتفاعات المحطة الأرضية التي تصل إلى 10 km فوق سطح الأرض. وبالنسبة للترددات التي تقع في حدود 0,5 GHz من مراكز الخطوط الطيفية عند أي ارتفاع لمحطة أرضية، ينبغي استخدام طريقة الأسطر المتدرجة الواردة في الملحق 1. وجرى اشتقاق المعادلات الواردة أدناه من مواصفات الظروف الجوية المرجعية الواردة في الملحق 1 بالتوصية ITU-R P.835 وتكون دقيقة في حدود 10 في المائة لمواصفات الظروف الجوية المحددة هذه. ويمكن تقدير دقة هذه الخوارزميات عند موقع محدد وفي وقت محدد من خلال مقارنة التوهين المقدّر بواسطة هذه الخوارزميات بالتوهين المحسوب باستخدام الطريقة الواردة في الملحق 1 لمواصفات الظروف الجوية التمثيلية الواردة في الملحق 2 والملحق 3 بالتوصية ITU-R P.835، أو بيانات المسبار الراديوي.

وتعطي الصيغة التالية العلو المكافئ الذي يعزى إلى مكون الأكسجين من التوهين الغازي:

$$h_o = \frac{6.1A}{1+0.17r_p^{-1.1}}(1+t_1+t_2+t_3) \quad (30)$$

حيث:

$$t_1 = \frac{5.1040}{(1+0.066r_p^{-2.3})} \exp\left(-\left(\frac{f-59.7}{2.87+12.4 \times \exp(-7.9r_p)}\right)^2\right) \quad (31)$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^7 \frac{c_i \exp(2.12r_p)}{(f-f_i)^2 + 0.025 \exp(2.2r_p)} \quad (32)$$

$$t_3 = \frac{0.0114f}{1+0.14r_p^{-2.6}} \frac{15.02f^2 - 1353f + 5.333 \times 10^4}{f^3 - 151.3f^2 + 9629f - 6803} \quad (33)$$

$$A = 0.7832 + 0.00709(T - 273.15) \quad (34)$$

حيث يظهر f_i و c_i مقابل i في الجدول 3.

الجدول 3

المعلمتان f_i و c_i

(GHz) f_i	c_i	i
118,750334	0,1597	1
368,498246	0,1066	2
424,763020	0,1325	3
487,249273	0,1242	4
715,392902	0,0938	5
773,839490	0,1448	6
834,145546	0,1374	7

مع العلم بأن:

$$f < 70 \text{ GHz} \text{ عندما } h_o \leq 10.7r_p^{0.3} \quad (\text{أ35})$$

T هي حرارة سطح الأرض بوحدة K، و ρ هي كثافة بخار الماء، على سطح الأرض بوحدة g/m^3 ، و $e = \frac{\rho T}{216.7}$ hPa، و $r_p = (p + e)/1013.25$.

ويعزى العلو المكافئ إلى مكون بخار الماء للتوهين الغازي:

$$h_w = A + B \times \sum_{i=1}^{14} \frac{a_i \sigma_w}{(f-f_i)^2 + b_i \sigma_w} \quad (\text{ب35})$$

حيث تظهر a_i و b_i و f_i مقابل i في الجدول 4، و:

$$A = 1.9298 - 0.04166(T - 273.15) + 0.0517\rho \quad (36)$$

$$B = 1.1674 - 0.00622(T - 273.15) + 0.0063\rho \quad (37)$$

$$(38) \quad \sigma_w = \frac{1.013}{1 + \exp[-8.6 (r_p - 0.57)]}$$

الجدول 4

المعلمات f_i و a_i و b_i

b_i	a_i	(GHz) f_i	i
2,56	1,52	22,235080	1
10,2	7,62	183,310087	2
2,70	1,56	325,152888	3
5,70	4,15	380,197353	4
0,91	0,20	439,150807	5
2,46	1,63	448,001085	6
2,22	0,76	474,689092	7
2,49	0,26	488,490108	8
10,0	7,81	556,935985	9
2,35	1,25	620,70087	10
20,0	16,2	752,033113	11
2,58	1,47	916,171582	12
2,44	1,36	970,315022	13
1,86	1,60	987,926764	14

و T هي حرارة سطح الأرض بوحدة K، و ρ هي كثافة بخار الماء، على سطح الأرض بوحدة g/m^3 ، و $e = \frac{\rho T}{216.7}$ hPa، و $r_p = (p + e)/1013.25$.

وحساب التوهين في اتجاه السميت بين الترددات 50 و 70 GHz دالة معقدة للتردد كما هو مبين في الشكل 12. ولا تتيح عموماً الصيغ الواردة أعلاه إلا حساباً تقريبياً لسويات التوهين المحتمل وجوده في هذا المدى من الترددات. ويستحسن استعمال إجراء الملحق 1 للحصول على مزيد من الدقة.

ويكون عندها التوهين الكلي باتجاه السميت:

$$(39) \quad A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad (\text{dB})$$

ويبين الشكل 11 التوهين الكلي باتجاه السميت عند مستوى البحر (الكلي)، إضافة إلى التوهين الناجم عن الهواء الجاف (الجاف) وعن بخار الماء (بخار الماء) وذلك استناداً إلى المتوسط السنوي العام المرجعي للجو والوارد في التوصية ITU-R P.835.

1.2.2 زوايا الارتفاع بين 5 و 90°

1.1.2.2 المسيرات أرض-فضاء

يمكن الحصول فيما يخص زوايا الارتفاع φ التي تتراوح ما بين 5° و 90° على التوهين على المسير باستعمال قانون قاطع التمام: بالنسبة لتوهين المسير استناداً إلى بيانات الأرصاد الجوية السطحية:

$$(40) \quad A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB}$$

$$A_w = h_w \gamma_w \quad \text{و} \quad A_o = h_o \gamma_o \quad \text{حيث:}$$

وفيما يخص التوهين على المسير القائم على كثافة بخار الماء المتكاملة:

$$(41) \quad A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB}$$

حيث $A_o = h_o \gamma_o$ وتعطى A_w في الفقرة 3.2.

2.1.2.2 المسيرات المائلة

من أجل تحديد قيم التوهين على مسير مائل بين محطة تقع عند ارتفاع h_1 ومحطة أخرى تقع عند ارتفاع أعلى h_2 ، وعندما يقل كلا الارتفاعين عن 10 km عن مستوى البحر يجب أن يستعاض عن قيمتي h_o و h_w في المعادلة (39) بالقيمتين h'_o و h'_w التاليتين:

$$(42) \quad h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km}$$

$$(43) \quad h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km}$$

مع التأكيد على أن القيمة ρ لكثافة بخار الماء المستعملة في المعادلة (1) هي القيمة الافتراضية على مستوى البحر المحسوبة كالاتي:

$$(44) \quad \rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2)$$

وحيث ρ_1 هي القيمة المقابلة للارتفاع h_1 للمحطة الفضائية، وحيث يفترض أن الارتفاع المكافئ لبخار الماء هو 2 km (انظر التوصية ITU-R P.835).

تستعمل المعادلات (42) و (43) تقييسات مختلفة للارتفاع المكافئ للجو الجاف ولبخار الماء. غير أنه يمكن اعتبار متوسط ضغط الجو بالنسبة إلى مستوى البحر ثابتاً في العالم بأكمله (أي أنه 1013,25 hPa) ولا تتمتع كثافة بخار الماء بمدى واسع من التغييرات المناخية وحسب بل هي مقيسة على الأرض (أي ارتفاع المحطة على الأرض). وفيما يخص قيم كثافة بخار الماء المقيسة على مستوى الأرض يرجع إلى التوصية ITU-R P.836.

2.2.2 زوايا الارتفاع بين 0 درجة و5 درجات

1.2.2.2 المسيرات أرض-فضاء

يجب، في هذه الحالة، استعمال الملحق 1. كما ينبغي استعمال الملحق 1 بشأن الارتفاعات ما دون الصفر.

2.2.2.2 المسيرات المائلة

يمكن تحديد قيم التوهين على مسير مائل بين محطة تقع عند ارتفاع h_1 ومحطة أخرى تقع عند ارتفاع أعلى h_2 (عندما يقل كلا الارتفاعين عن 10 km عن مستوى البحر) باستعمال المعادلة التالية:

$$(45) \quad A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] \\ + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB}$$

حيث:

R_e : نصف قطر الأرض الفعال بما في ذلك الانكسار، كما هو محدد في التوصية ITU-R P.834، معبراً عنه بالكيلومترات (قيمة من 8 500 km تعتبر عادة مقبولة في الجوار المباشر لسطح الأرض)

φ_1 : زاوية الارتفاع عند الارتفاع h_1

F: دالة تعرف بالصيغة التالية:

$$(46) \quad F(x) = \frac{1}{0,661 x + 0,339 \sqrt{x^2 + 5,51}}$$

$$(أ47) \quad \varphi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right)$$

$$(ب47) \quad x_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{for } i = 1, 2$$

$$(ج47) \quad x'_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{for } i = 1, 2$$

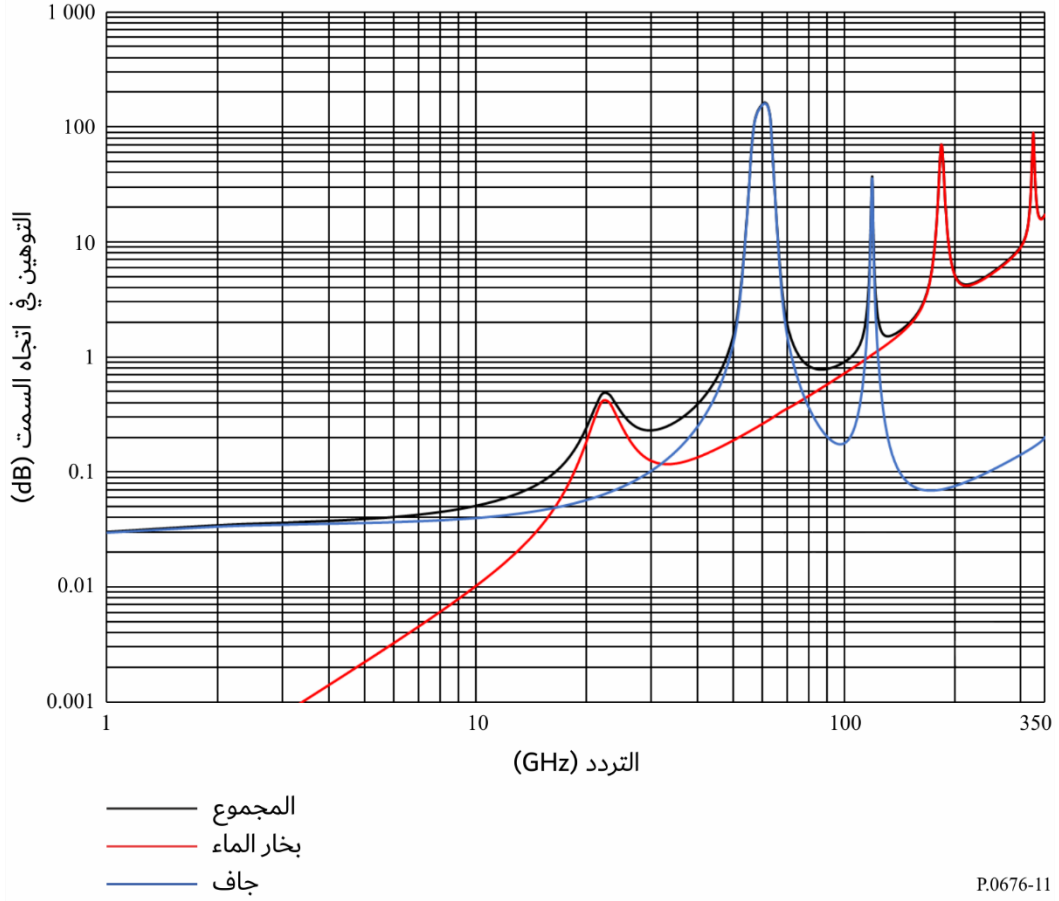
علماً بأن القيمة ρ لكثافة بخار الماء المستعملة في المعادلة (1) هي القيمة الافتراضية على مستوى البحر المحسوبة كالاتي:

$$(48) \quad \rho = \rho_1 \cdot \exp (h_1 / 2)$$

حيث ρ_1 هي القيمة المقابلة للارتفاع h_1 للمحطة المعنية، ويُفترض أن الارتفاع المكافئ لكثافة بخار الماء هو 2 km (انظر التوصية ITU-R P.835).

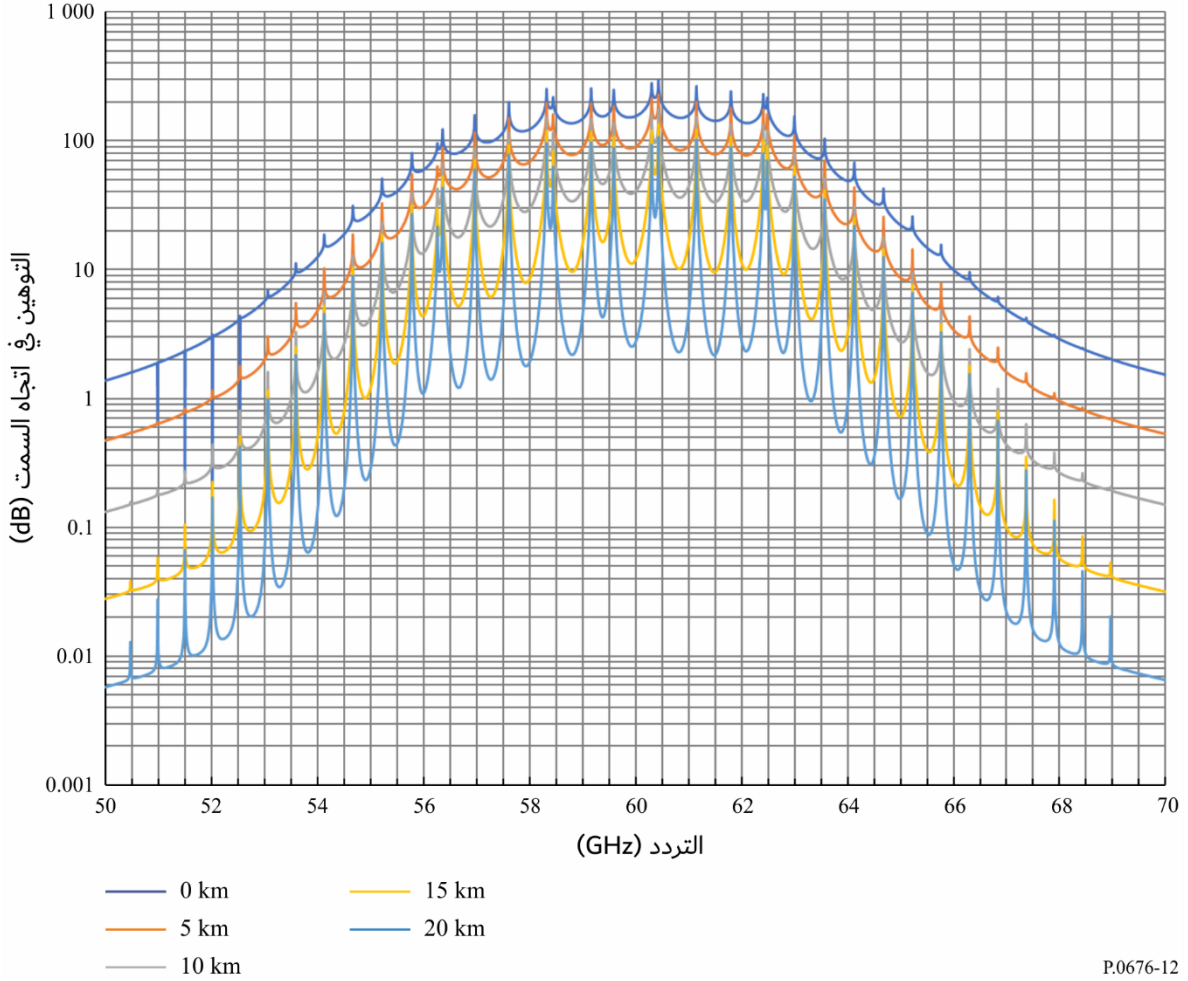
الشكل 11

التوهين الكلي الناجم عن الهواء الجاف وبخار الماء على مستوى البحر في اتجاه السمات
(الضغط = 1 013,25 hPa؛ درجة الحرارة = 15 °مئوية؛ كثافة بخار الماء = 7,5 g/m³)



الشكل 12

توهين الأوكسجين باتجاه السمات في الارتفاعات المشار إليها والمحسوبة عند فواصل تبلغ 10 MHz بما فيها مراكز الخطوط (0 km و 5 km و 10 km و 15 km و 20 km)



ويمكن الرجوع إلى التوصية ITU-R P.836 من أجل قيم ρ_1 المقيسة على مستوى الأرض. وقد تم شرح فروق صيغة الهواء الجاف وبخار الماء في الفقرة 2.2.2.2.

3.2 التوهين ببخار الماء على المسيرات في اتجاه السمات

تستند الطريقة أعلاه لحساب التوهين ببخار الماء على المسيرات المائلة إلى معرفة كثافة بخار الماء على سطح الأرض. وإذا عرف المكون المتكامل لبخار الماء، V_i ، يمكن عندئذٍ تقدير التوهين الكلي ببخار الماء على النحو التالي:

$$(49) \quad A_w = \begin{cases} \frac{0.0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0.0176 V_t \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} (ah^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \text{ dB}$$

حيث:

$$a = 0.2048 \exp \left[- \left(\frac{f - 22.43}{3.097} \right)^2 \right] + 0.2326 \exp \left[- \left(\frac{f - 183.5}{4.096} \right)^2 \right]$$

$$(50) \quad +0.2073 \exp \left[- \left(\frac{f-325}{3.651} \right)^2 \right] - 0.1113$$

$$(51) \quad b = 8.741 \times 10^4 \exp(-0.587f) + 312.2f^{-2.38} + 0.723$$

$$(52) \quad h = \begin{cases} 0 & h_s < 0 \text{ km} \\ h_s & 0 \text{ km} \leq h_s \leq 4 \text{ km} \\ 4 & h_s > 4 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{km})$$

$$(53) \quad \rho_{v,ref} = \frac{V_t}{2.38} \text{ (g/m}^3\text{)}$$

$$(54) \quad t_{ref} = 14 \ln \left(0.22 \frac{V_t}{2.38} \right) + 3 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

وحيث

: f التردد (GHz): f_{ref} 20,6 (GHz)= p_{ref} 845 (hPa)

V_t : المكون المتكامل لبخار الماء من: أ) بيانات محلية لمسابير راديوية أو أجهزة قياس راديوية أو ب) عند النسبة المئوية للوقت المطلوب (kg/m^2 أو mm) المتحصل عليها من الخرائط الرقمية الواردة في التوصية ITU-R P.836 (mm أو kg/m^2)

$\gamma_w(f, p, \rho, t)$: التوهين النوعي كدالة للتردد والضغط وكثافة بخار الماء ودرجة الحرارة يتم حسابه من مكون بخار الماء في المعادلة (1) (dB/km)

h_s : علو المحطة الأرضية فوق متوسط مستوى سطح البحر (a.m.s.l.) (km).