**التوصيـة ITU-R  P.676-12  
(2019/08)**

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

**السلسلة P**

**انتشار الموجات الراديوية**

**تمهيـد**

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد لمدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها.

ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU‑T/ITU‑R/ISO/IEC) والمشار إليها في 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](http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en) حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

|  |  |
| --- | --- |
| **سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية**  (يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>) | |
| **السلسلة** | **العنـوان** |
| **BO** البث الساتلي | |
| **BR** التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية | |
| **BS** الخدمة الإذاعية (الصوتية) | |
| **BT** الخدمة الإذاعية (التلفزيونية) | |
| **F** الخدمة الثابتة | |
| **M** الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة | |
| **P انتشار الموجات الراديوية** | |
| **RA** علم الفلك الراديوي | |
| **RS** أنظمة الاستشعار عن بُعد | |
| **S** الخدمة الثابتة الساتلية | |
| **SA** التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية | |
| **SF** تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة | |
| **SM** إدارة الطيف | |
| **SNG** التجميع الساتلي للأخبار | |
| **TF** إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت | |
| **V** المفردات والمواضيع ذات الصلة | |

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

*النشر الإلكتروني*جنيف، 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).

التوصيـة ITU-R P.676-12[[1]](#footnote-1)\*

التوهين الناجم عن الغازات الجوية والمؤثرات ذات الصلة

(المسألة ITU-R 201/3)

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

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 GHz 1 000‑1؛

ب) الأسلوبين المبسطين التقريب‍يين الواردين في الملحق 2 لتقدير التوهين الغازي المنطبق في مدى التردد GHz 350-1؛

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،

توصـي

**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 للتوهين 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.

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 سطراً سطراً في الملحق 1.

التوهين النوعي

المعادلة (1) القابلة للتطبيق على الترددات حتى GHz 1 000 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 g/m3 7,5، 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 g/m3 7,5، 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 GHz 350 بافتراض المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية وقيمة عشوائية كثافة بخار الماء على سطح الأرض بقيمة أسيه 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 (13) | المعادلة (40) | المعادلة (41) |
| مدى الترددات | GHz 1 000> | GHz 350> | GHz 350> |
| الدقة | الأفضل في مجموع كل خط على حدة | تقريب | |
| الضغط مقابل الارتفاع | قيم عشوائية | مواصفة المتوسط السنوي للظروف الجوية المرجعية العالمية | |
| درجة الحرارة مقابل الارتفاع |
| كثافة بخار الماء مقابل الارتفاع | القيمة السطحية مع مواصفة أسية سالبة مقابل الارتفاع | المحتوى المتكامل لبخار الماء بدلاً من 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 اللاطنان الصادر عن الأوكسجين تحت GHz 10، وللتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق GHz 100 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 GHz 1 000 بفواصل يبلغ كل منها GHz 1، من أجل ضغط مقداره hPa 1 013,25 ودرجة حرارة هي °15 مئوية وذلك في حالتي كثافة بخار الماء البالغة g/m3 7,5 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 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:

 (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، و*f* هو التردد (GHz) و هما الجزآن التخيليان من الانكسارية المركبة المرتبطة بالتردد:

(2أ)

(2ب)

*Si* هي شدة الخط رقم *i* للأوكسجين أو بخار الماء، و*Fi* 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)

لبخار الماء

للأوكسجين

حيث:

*p*: ضغط الجو الجاف (hPa)

*e*: الضغط الجزئي لبخار الماء معبراً عنه (hPa) (الضغط الجوي الكلي، (*ptot = p + e*

=θ 300/*T*

*T*: درجة الحرارة (K).

الشـكل 1

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

Diagram

Description automatically generated

الشـكل 2

التوهين النوعي في مدى الترددات GHz 70-50 في الارتفاعات المبينة، والمحسوب على فواصل MHz 10،  
بما في ذلك مراكز الخطوط (0 و5 و10 و15 وkm 20)

Chart, histogram

Description automatically generated

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 الأكسحين 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)

وترد البيانات الطيفية للأوكسجين في الجدول 1، والبيانات الطيفية لبخار الماء في الجدول 2. وآخر مدخلات في الجدول 2 عبارة عن شبه خط مركزه GHz 1 780، يمثل حده الأدنى المساهمة المشتركة تحت GHz 1 000 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:

 (5)

حيث *fi* هو تردد خط الأوكسجين أو بخار الماء وΔ*f* هو عرض الخط:

 (6أ)

للأوكسجين

لبخار الماء

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

 (6ب)

للأوكسجين

لبخار الماء

وδ عامل تصحيح ينتج عن تأثيرات التداخل في خطوط الأوكسجين:

 (7)

للأوكسجين

لبخار الماء

الجـدول 1

المعطيات المطيافية للتوهين بالأوكسجين

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

الجـدول 1 ( *تتمة*)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f*0 | *a*1 | *a*2 | *a*3 | *a*4 | *a*5 | *a*6 |
| 368,498246 | 67,400 | 0,048 | 16,400 | 0,0 | 0,000 | 0,000 |
| 424,763020 | 637,700 | 0,044 | 16,400 | 0,0 | 0,000 | 0,000 |
| 487,249273 | 237,400 | 0,049 | 16,000 | 0,0 | 0,000 | 0,000 |
| 715,392902 | 98,100 | 0,145 | 16,000 | 0,0 | 0,000 | 0,000 |
| 773,839490 | 572,300 | 0,141 | 16,200 | 0,0 | 0,000 | 0,000 |
| 834,145546 | 183,100 | 0,145 | 14,700 | 0,0 | 0,000 | 0,000 |

الجـدول 2

البيانات الطيفية للتوهين ببخار الماء

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

الجـدول 2 ( *تتمة*)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *f*0 | *b*1 | *b*2 | *b*3 | *b*4 | *b*5 | *b*6 |
| 841,051732 | 0134, | 8,177 | 15,90 | 33, | 5,760 | 45, |
| 859,965698 | 1325, | 8,055 | 30,60 | 68, | 4,090 | 84, |
| 899,303175 | 0547, | 7,914 | 29,85 | 68, | 4,530 | 90, |
| 902,611085 | 0386, | 8,429 | 28,65 | 70, | 5,100 | 95, |
| 906,205957 | 1836, | 5,110 | 24,08 | 70, | 4,700 | 53, |
| 916,171582 | 8,400 | 1,441 | 26,73 | ,70 | 5,150 | 78, |
| 923,112692 | 0079, | 10,293 | 29,00 | 70, | 5,000 | 80, |
| 970,315022 | 9,009 | 1,919 | 25,50 | 64, | 4,940 | 67, |
| 987,926764 | 134,6 | 257, | 29,85 | 68, | 4,550 | 90, |
| 1 780,000000 | 17506, | ,952 | 196,3 | 2,00 | 24,15 | 5,00 |

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

 (8)

حيث *d* هي معلمة العرض لطيف Debye:

 (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:

 (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 و km هو:

= (11)

حيث:

(12)

هو التوهين النوعي على العلو و هو متوسط نصف قطر الأرض (km 6 371) و هي زاوية الارتفاع الظاهرية المحلية على العلو و*n* (*h*) هو مؤشر الانكسار على العلو *h*.

وبينما يمكن تقييم المعادلة (11) بالتكامل العددي[[2]](#footnote-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.

(dB) (13)

حيث γ*i* هو التوهين النوعي (dB/km) للطبقة رقم *i* وفق المعادلة (1)، و 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 cm 10 على سطح الأرض إلى km 1~ على علو km 100~ لضمان تقدير دقيق لإجمالي التوهين الغازي في المسير المائل. وسمك الطبقة i، , ، هو:

(km) (14)

و علو الجزء السفلي من الطبقة i من أجل هو:

(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 km 100، وفي هذه الحالة و و.

وفي مسير مائل بين علو أخفض داخل الغلاف الجوي، ، وعلو أعلى داخل الغلاف الجوي، (، يمكن حساب توهين المسير المائل بإسناد 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 و:

(16أ)

(16ب)

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  ويستعاض عن الحد الأعلى بقيمة .

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

(16ج)

د ) يستعاض عن المعادلة (15) بالمعادلة التالية:

(16د)

وينبغي استخدام المعادلات من (16أ) إلى (16د) بحذر بسبب احتمال تردي الدقة في المسيرات المائلة حيث (في المسيرات بين منصتين محمولتين جواً على سبيل المثال).

*ai* هو طول المسير عبر الطبقة رقم بسماكة δ*i* و*ni* هو مؤشر الانكسار الراديوي للطبقة رقم . و *هي* دالة ضغط الهواء الجاف والحرارة والضغط الجزئي لبخار الماء للطبقة رقم باستخدام المعادلتين (1) و(2) من التوصية ITU-R P.453. و و هما زاويتا ورود الدخول والخروج عند السطح البيني بين الطبقة رقم i والطبقة رقم ، و *ri*هو نصف القطر من مركز الأرض إلى بداية الطبقة ، ، و هو نصف القطر من مركز الأرض إلى بداية الطبقة الدنيا، وعادةً ما يكون متوسط نصف قطر الأرض 6 371 ) (km. ومؤشر الانكسار، ، والتوهين النوعي، ، للطبقة رقم هما قيمتيهما عند نقطة منتصف الطبقة رقم ، أي على علو .

وطول المسير هو:

(km) (17)

وزاوية هي:

(18أ)

(18ب)

وقد ألغيت المعادلة (18أ) بسبب تردي الدقة. و هي زاوية السمت المحلية عند سطح الأرض أو بالقرب منه (مكمل زاوية الارتفاع الظاهرية، φ، أي .

ويمكن حساب بشكل متكرر من α*i* باستخدام قانون سنيل (Snell) على النحو التالي:

(19أ)

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

(19ب)

وبالمثل، يمكن حساب على النحو التالي:

(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، ) 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 GHz 1 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  = 7,5 g/m3، والغلاف الجوي "الجاف" هو متوسط الغلاف الجوي المرجعي العالمي السنوي وفيه  = 0 g/m3.

### 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 .

ومن قانون Snell بالإحداثيات القطبية:

(20)

وفي هذه الحالة، يمكن تحديد علو التماس، ، 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 km والمحطة الأرضية الفعلية على علو *h*1 km بزاوية ارتفاع ظاهرية °0، والمسير 2 هو التوهين الغازي بين محطة أرضية افتراضية على علو km وأقصى علو جوي (عادة km 100) بزاوية ارتفاع ظاهرية °0.

الشكل 3

هندسة علو التماس

Diagram

Description automatically generated

### 3.2.2 تبادلية فضاء-أرض وأرض-فضاء بالمثل

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

(21أ)

و

(21ب)

حيث هو مؤشر الانكسار على علو المحطة الأرضية و*re* هو نصف القطر من مركز الأرض إلى المحطة الأرضية (، و هو مؤشر الانكسار على علو المحطة الفضائية، و هو نصف القطر من مركز الأرض إلى المحطة الفضائية (. وإذا كان علو المحطة الفضائية أعلى من km 100 فوق سطح الأرض، فإن 1 = .

وبما أن الانتشار عبر الغلاف الجوي تبادلي بالمثل، فإن التوهين الغازي لمسير أرض-فضاء، حيث تكون زاوية الارتفاع الظاهرية في المحطة الفضائية ، يطابق التوهين الغازي لمسير أرض-فضاء التبادلي بالمثل، حيث زاوية الارتفاع الظاهرية عند المحطة الأرضية . ونتيجة لذلك، يمكن حساب التوهين الغازي لمسير أرض-فضاء هابط باعتباره التوهين الغازي المقابل لمسير أرض-فضاء الصاعد. وإذا تحققت المتراجحة ، 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:

(22أ)

(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*:

(km) (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.

الشـكل 4

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

Diagram, histogram

Description automatically generated

الشـكل 5

مسير عبر الغلاف الجوي

Chart

Description automatically generated with medium confidence

# 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، ، بواسطة:

(24)

حيث هو تشتت الطور النوعي (درجات/كيلومترات) بسبب الهواء الجاف، و هو تشتت الطور النوعي بسبب بخار الماء؛ و*f* هو التردد (GHz)؛ و هي الأجزاء الحقيقية للانكساريات المعقدة المعتمدة على التردد:

(25أ)

(25ب)

حيث:

و*Si* هي شدة خط الأكسجين أو بخار الماء *i*th من المعادلة (3)، و هو الجزء الحقيقي من عامل شكل خط الأكسجين أو بخار الماء:

(25ج)

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

و هو الجزء الحقيقي من الاستمرارية الجافة بسبب امتصاص الآزوت الناتج عن الضغط:

(25د)

ويرد تعريف 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 ( = 1 013.25 hPa, = 7.5 g/m3, = 15oC).

الشكل 6

تشتت الطور النوعي المعتمد على التردد للغلاف الجوي المعياري  
( = 1 013.25 hPa, = 7.5 g/m3, = 15oC)

Chart, line chart

Description automatically generated

# 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 بحرارة الضوضاء من خلال الدالة ، حيث 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 (km 100 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، هي حرارة لمعان الموجات المكروية للطبقة رقم j المحددة بواسطة:

(26)

حيث هي الحرارة الفيزيائية للطبقة رقم jth. ويمكن تقريب تقريباً جيداً بواسطة من أجل ؛ وγ*j* هو التوهين النوعي (dB/km) للطبقة رقم *jth* المحدد في المعادلة (1)، 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، . وفي تردد معين، ، يؤول هذا الفرق إلى قيمة التردد مضروبةً في المعامل 0,024 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:

(27)

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

الخطوة 1: وضع (27أ)

تكرار الخطوات من 2 إلى 5 من أجل إلى بإنقاص بقيمة 1 في كل تكرار:

الخطوة 2: وضع (27ب)

الخطوة 3: وضع (27ج)

الخطوة 4: وضع (27د)

الخطوة 5: وضع (27ه)

حيث K 2,73 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:

(28)

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

الخطوة 1: وضع (28أ)

تكرار الخطوات من 2 إلى 5 من أجل إلى بزيادة بقيمة 1 بعد كل تكرار:

الخطوة 2: وضع (28ب)

الخطوة 3: وضع (28ج)

الخطوة 4: وضع (28د)

الخطوة 5: وضع (28هـ)

حيث:

: انبعاثية سطح الأرض

: انعكاسية سطح الأرض

.

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

ويوضح الشكل 9 حرارة لمعان الموجات المكروية المتدفقة صعوداً السمت والغلاف الجوي العالمي السنوي المرجعي المعياري (أي المتوسط) حيث ϵ = 0.95 وρ = 0.05 و*TEarth* = 290 K.

الشكل 7

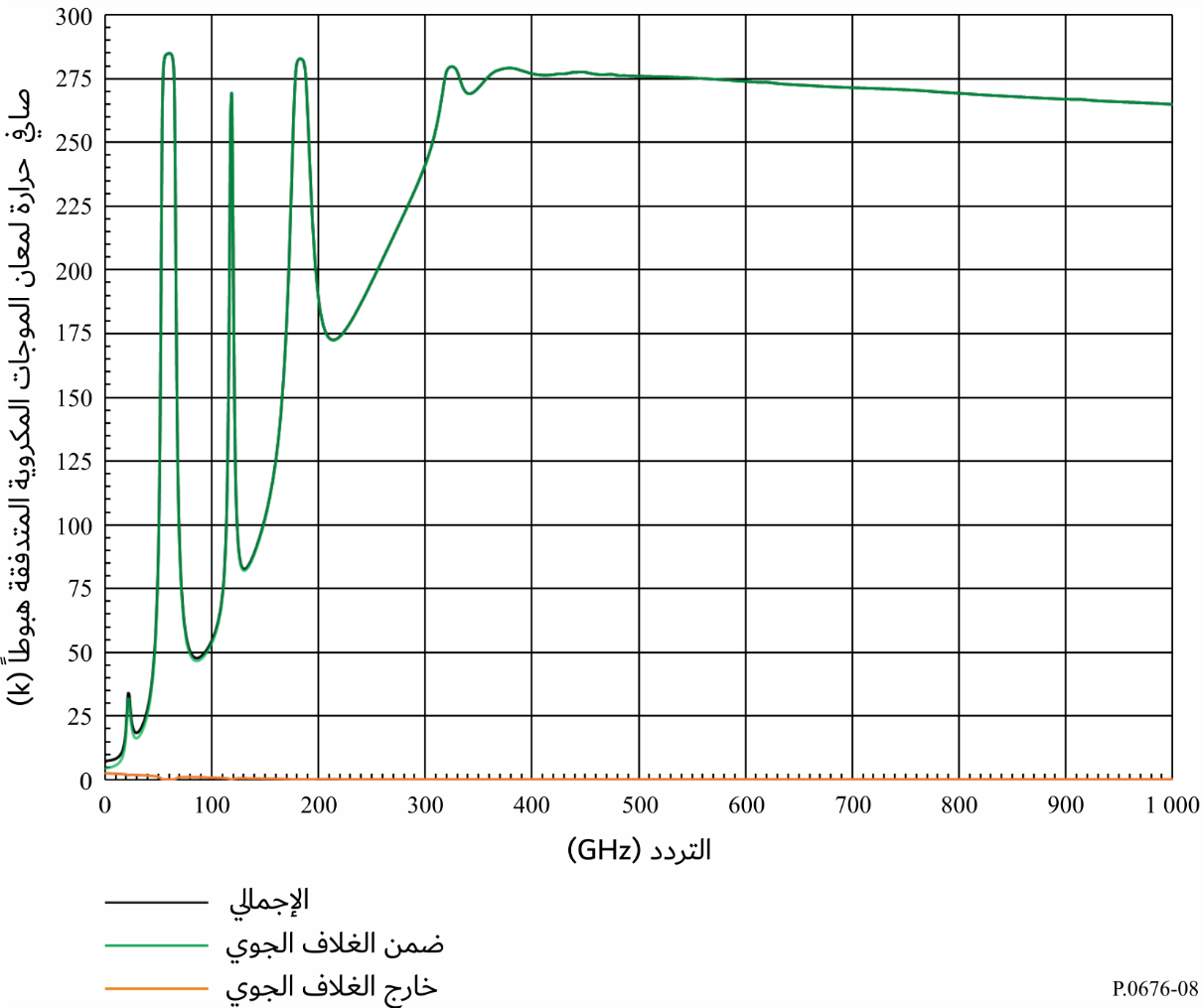
الفرق بين درجات حرارة اللمعان الفيزيائية وحرارة لمعان الموجات المكروية من مصدر جسم أسود

Chart

Description automatically generated

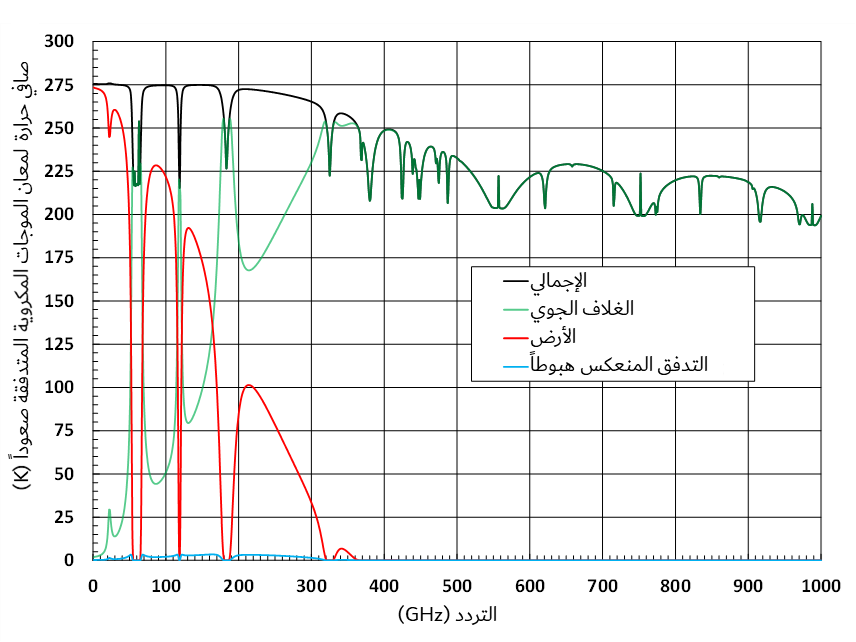
الشكل 8

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



الشكل 9

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



# 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 (*ptot* = *pdry* + *e*) إلى ضغط الهواء الجاف، *pdry*، 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 (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 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  
  
التقييم التقريب‍ي للتوهين بالغازات الجوية  
في نطاق التردد GHz 350-1

يتضمن هذا الملحق خوارزميات مبسطة للتقدير التقريبي للتوهين بالغازات الجوية من أجل مدى التردد المحدود من 1 GHz إلى GHz 350، 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، *γo* (dB/km)، والتوهين النوعي الذي يعزى إلى بخار الماء، *γw* (dB/km)، مع *γo* و*γw* في المعادلة (1). ويتطابق التوهين النوعي للهواء الرطب الذي يعزى إلى الأكسجين، *γo* (dB/km)، والتوهين النوعي للهواء الرطب الذي يعزى إلى بخار الماء، *γw* (dB/km)، المستخدمان في هذه الأساليب المبسطة، مع *γo* و*γw* في المعادلة (1).

والضغط الجاف *p* والحرارة *T* وكثافة بخار الماء، ، 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 g/m3 7,5 فقط (بخار الماء) والتوهين النوعي الكلي (الكلي) على ترددات من 1 إلى GHz 350 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:

 (29)

حيث *r*0 هو طول المسير بالكيلومتر (km).

الشـكل 10

التوهين النوعي نتيجة للغازات الجوية  
(الضغط = hPa 1 013,25؛ درجة الحرارة = °15 مئوية؛ كثافة بخار الماء = g/m3 7,5)

Chart

Description automatically generated

## 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 السمت. 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 انحطاطاً أسياً في التوهين الجوي مقابل الارتفاع. ويمكن استخدام هذه الخوارزميات لتقدير إجمالي التوهين الغازي للمسيرات المائلة للترددات خارج GHz 0,5 من مراكز الخطوط الطيفية لارتفاعات المحطة الأرضية التي تصل إلى km 10 فوق سطح الأرض. وبالنسبة للترددات التي تقع في حدود GHz 0,5 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:

 (30)

حيث:

 (31)

 (32)

 (33)

 (34)

حيث يظهر و مقابل في الجدول 3.

الجدول 3

المعلمتان و

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

مع العلم بأن:

 عندما  (35أ)

و هي حرارة سطح الأرض بوحدة K، وρ هي كثافة بخار الماء، على سطح الأرض بوحدة g/m3، و، و.

ويعزى العلو المكافئ إلى مكون بخار الماء للتوهين الغازي:

 (35ب)

حيث تظهر *ai* و و مقابل *i* في الجدول 4، و:

 (36)

 (37)

 (38)

الجدول 4

المعلمات و و

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

و هي حرارة سطح الأرض بوحدة K، وρ هي كثافة بخار الماء، على سطح الأرض بوحدة g/m3، و، و.

وحساب التوهين في اتجاه السمت بين الترددات 50 وGHz 70 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 السمت:

 (39)

ويبين الشكل 11 التوهين الكلي باتجاه السمت 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 وº90

#### 1.1.2.2 المسيرات أرض-فضاء

يمكن الحصول فيما يخص زوايا الارتفاع ϕ التي تتراوح ما بين º5 وº90 على التوهين على المسير باستعمال قانون قاطع التمام:

بالنسبة لتوهين المسير استناداً إلى بيانات الأرصاد الجوية السطحية:

 (40)

حيث:  و

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

 (41)

حيث  وتعطى *Aw* 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 km 10 عن مستوى البحر يجب أن يستعاض عن قيمتي *ho* و*hw* في المعادلة (39) بالقيمتين  و التاليتين:

 (42)

 (43)

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

 (44)

وحيث 1 هي القيمة المقابلة للارتفاع *h*1 للمحطة الفضائية، وحيث يفترض أن الارتفاع المكافئ لبخار الماء هو km 2 (انظر التوصية ITU‑R P.835).

تستعمل المعادلات (42) و(43) تقييسات مختلفة للارتفاع المكافئة للجو الجاف ولبخار الماء. غير أنه يمكن اعتبار متوسط ضغط الجو بالنسبة إلى مستوى البحر ثابتاً في العالم بأكمله (أي أنه hPa 1 013,25) 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 عند km 10 عن مستوى البحر) باستعمال المعادلة التالية:

 (45)

حيث:

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

ϕ1: زاوية الارتفاع عند الارتفاع *h*1

F: دالة تعرف بالصيغة التالية:

 (46)

 (47أ)

 (47ب)

 (47ج)

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

 (48)

حيث 1 هي القيمة المقابلة للارتفاع *h*1 للمحطة المعنية، ويُفترض أن الارتفاع المكافئ لكثافة بخار الماء هو km 2 (انظر التوصية ITU-R P.835).

الشـكل 11

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

Chart

Description automatically generated

الشـكل 12

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

Chart

Description automatically generated

ويمكن الرجوع إلى التوصية ITU-R P.836 من أجل قيم 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 السمت

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

(49)

حيث:

(50)

(51)

(km) (52)

= (g/m3)  (53)

= (°C)  (54)

وحيث

: التردد (GHz)

: (GHz) 20,6

=  (hPa) 845

*Vt*: المكون المتكامل لبخار الماء من: أ ) بيانات محلية لمسابير راديوية أو أجهزة قياس راديوية أو ب) عند النسبة المئوية للوقت المطلوب (kg/m2 أو mm) المتحصل عليها من الخرائط الرقمية الواردة في التوصية ITU‑R P.836 (kg/m2 أو mm)

γ*W* (*f*, *p*, ρ, *t*): التوهين النوعي كدالة للتردد والضغط وكثافة بخار الماء ودرجة الحرارة يتم حسابه من مكون بخار الماء في المعادلة (dB/km) (1)

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

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. \* أدخلت لجنة الدراسات 3 للاتصالات الراديوية تعديلات صياغية على هذه التوصية في عامي 2020 و2021، طبقاً للقرار ITU-R 1. [↑](#footnote-ref-1)
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. [↑](#footnote-ref-2)