

التوهين بالغازات الجوية

(المسألة ITU-R 201/3)

(1990-1992-1995-1997-1999-2001-2005)

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

(أ) ضرورة أن يقدر التوهين بالغازات الجوية على مسيرات الأرض والمسيرات المائية،

توصي

- 1 بأن تستعمل للتطبيقات العامة إجراءات الملحق 1 وذلك لحساب التوهين بالغازات الجوية في الترددات التي تصل حتى 1000 GHz (وتتوفر شفرة برامجيات MATLAB في مكتب الاتصالات الراديوية)؛
- 2 بأن يستعمل الإجراء الأبسط الوارد في الملحق 2 لتقييم طريقة التوهين بالغازات الجوية في الترددات التي تتراوح بين 1 و 350 GHz.

الملحق 1

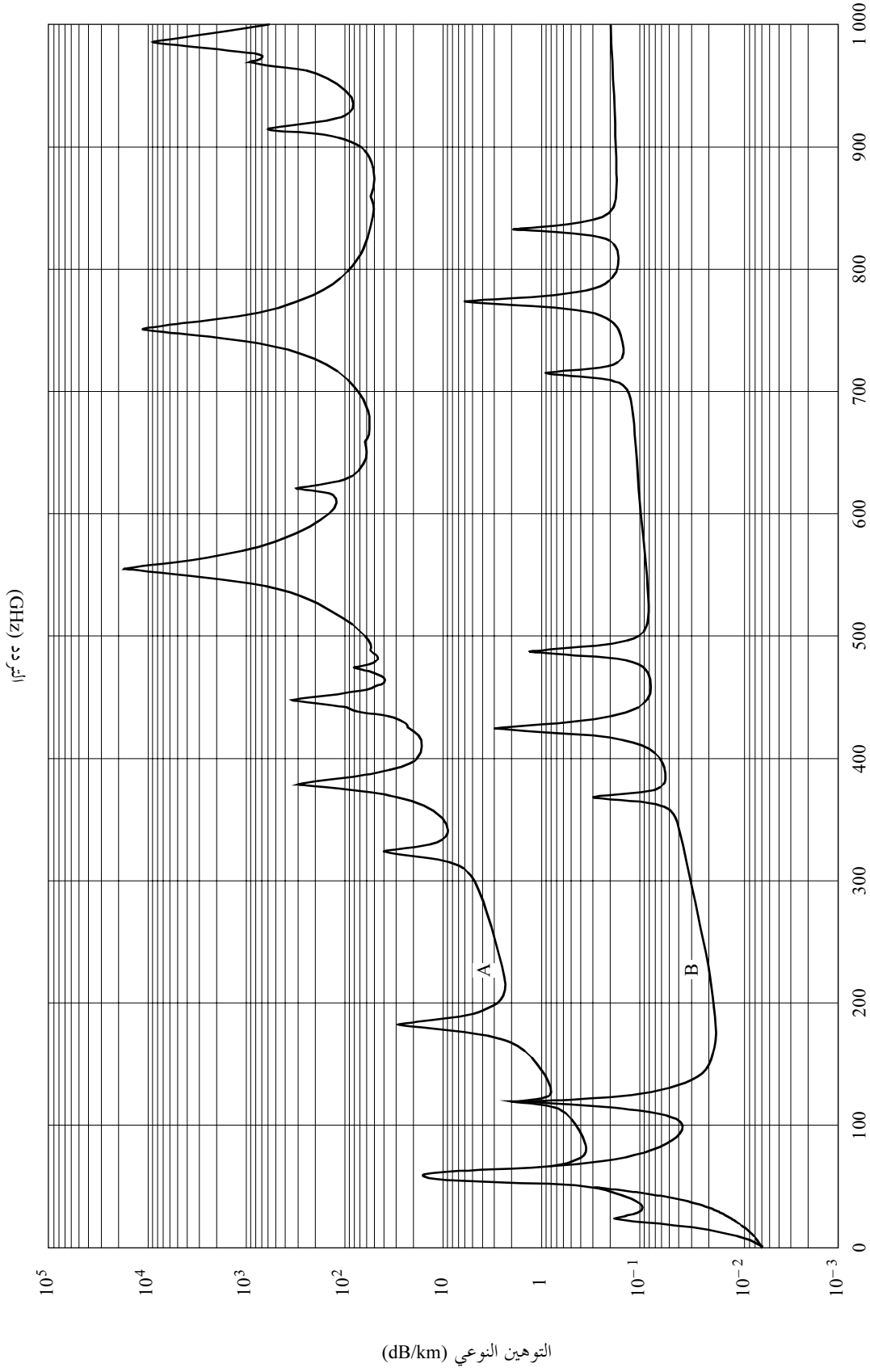
حساب التوهين بالغازات الجوية بواسطة جمع مساهمات الخطوط

1 التوهين النوعي

إن أدق طريقة لتقدير التوهين النوعي الذي يعزى إلى الهواء الجاف وبخار الماء في الترددات التي تصل إلى 1000 GHz لأي قيمة من قيم الضغط والحرارة والرطوبة هي جمع مساهمات كل خط من خطوط الطنين الصادرة عن الأوكسجين وبخار الماء مع عوامل صغيرة إضافية مطابقة لطيف Debye اللاتنان الصادر عن الأوكسجين تحت 10 GHz، وللتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق 100 GHz وللطيف المستمر لبخار الماء الذي يسمح بمراعاة القيم المقيسة لامتناس بخار الماء التي تفوق القيم المتوقعة. ويوضح الشكل 1 التوهين النوعي المحسوب من 0 إلى 1000 GHz بفواصل يبلغ كل منها 1 GHz، من أجل ضغط مقداره 1013 hPa ودرجة حرارة هي 15° وذلك في حالي كثافة بخار الماء البالغة 7,5 g/m³ والجو الجاف (المنحني B).

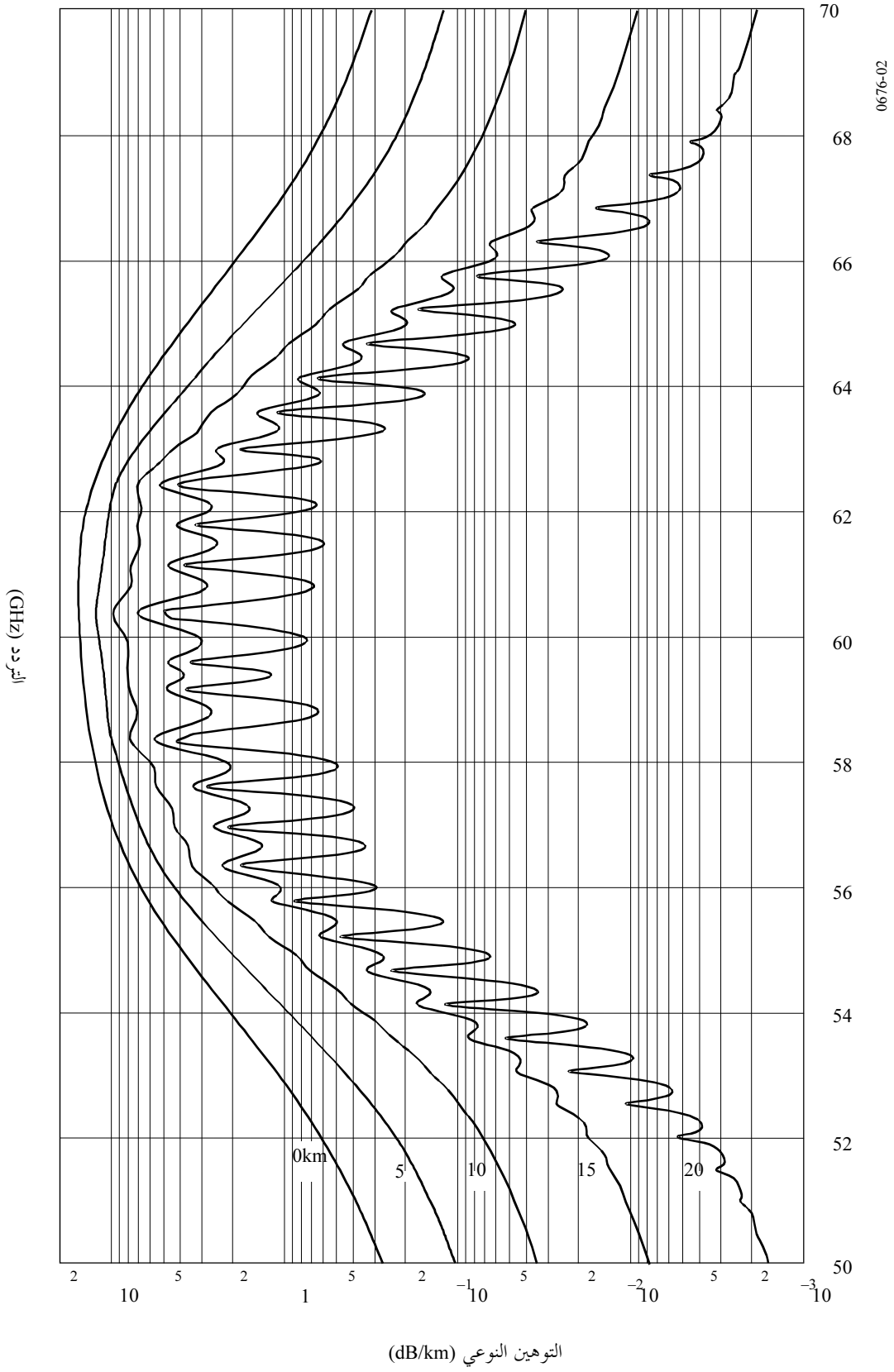
ويندمج بجوار 60 GHz العديد من خطوط امتناس الأوكسجين في ضغوط على مستوى البحر من أجل تشكيل نطاق وحيد وعريض للامتناس والذي يوضح بالتفصيل في الشكل 2. ويبين هذا الشكل أيضاً التوهين بالأوكسجين على مرتفعات أعلى. وكلما كان الضغط منخفضاً كلما زادت استبانة الخطوط.

وفيما يخص التقييم السريع والتقريبي للتوهين النوعي في ترددات تصل إلى 350 GHz وفي حالات لا تتطلب دقة كبيرة، يمكن استعمال الخوارزميات المبسطة الواردة في المرفق 2 من أجل مديات محدودة تتعلق بظروف الأرصاد الجوية.



الشكل 1 التوهين النوعي الناتج عن الامتصاص في فواصل تردد كل منها 1 ZHG جاذبها الترددات المركزية للخطوط

الشكل 1



تعطي العبارة التالية التوهين النوعي بالغازات الجوية:

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

حيث γ_o و γ_w هما توهينان نوعيان (dB/km) سببهما الهواء الجاف (التوهين الناجم عن الأكسجين وضغط الآزوت وطيف Debye اللاتنان) وبخار الماء على التوالي، وحيث f هو التردد (GHz) و $N''(f)$ هو الجزء التخيلي من الانكسارية العقدية المتعلقة بالتردد:

$$(2) \quad N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f)$$

S_i هو شدة الخط من الرتبة i ، و F_i عامل الشكل، ويتعلق المجموع بكل الخطوط؛ $N''_D(f)$ هو الطيف المستمر للجو الجاف الناجم عن الامتصاص المستحث من ضغط الآزوت وطيف Bebye. وتحدد شدة الخط على النحو التالي:

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

حيث:

p : ضغط الجو الجاف (hPa)

e : الضغط الجزئي لبخار الماء معبراً عنه بالوحدات hPa (الضغط الجوي الكلي: $P = p + e$)

$$300/T = \theta$$

T : درجة الحرارة (K).

ويناسب استعمال القيمتين الخيليتين للمظاهر الجانبية الخاصة بالضغط p والضغط الجزئي e ودرجة الحرارة T حيث جرى قياس كل منها (مثلاً بواسطة الموجات الراديوية). ومع ذلك، يجدر عند الافتقار إلى المعلومات المحلية، استعمال الأجواء المعيارية الموصوفة في التوصية ITU-R P.835. (تجدر الإشارة إلى أنه في حال حساب التوهين الجوي الكلي يستعمل نفس الضغط الجزئي لبخار الماء في كل من التوهينين الناجمين عن الهواء الجاف وبخار الماء.)

ويمكن الحصول على الضغط الجزئي لبخار الماء e اعتباراً من كثافة بخار الماء ρ كما في المعادلة التالية:

$$(4) \quad e = \frac{\rho T}{216.7}$$

ويقدم الجدول 1 المعاملين a_1 و a_2 للأكسجين، والجدول 2 المعاملين b_1 و b_2 لبخار الماء.

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 الخط و Δf هو عرض الخط:

$$(6a) \quad \begin{aligned} \Delta f &= a_3 \times 10^{-4} (p \theta^{(0.8 - a_4)} + 1.1 e \theta) && \text{للأكسجين} \\ &= b_3 \times 10^{-4} (p \theta^{b_4} + b_5 e \theta^{b_6}) && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

ويعدل عرض الخط ليتماشى مع توضيح دوبلر على النحو التالي:

$$(6b) \quad \Delta f = \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} \quad \text{للأكسجين}$$

$$= 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 \Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad \text{لبخار الماء}$$

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

$$(7) \quad \delta = (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} p \theta^{0.8} \quad \text{للأكسجين}$$

$$= 0 \quad \text{لبخار الماء}$$

ويعطي الجدولان 1 و 2 المعاملات المطيافية.

الجدول 1

المعطيات المطيافية للتهوين بالأوكسجين

a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	f_0
7,900	2,400	0,0	8,90	9,694	0,94	50,474238
7,800	2,200	0,0	9,10	8,694	2,46	50,987749
7,740	1,970	0,0	9,40	7,744	6,08	51,503350
7,640	1,660	0,0	9,70	6,844	14,14	52,021410
7,510	1,360	0,0	9,90	6,004	31,02	52,542394
7,140	1,310	0,0	10,20	5,224	64,10	53,066907
5,840	2,300	0,0	10,50	4,484	124,70	53,595749
4,310	3,350	0,0	10,70	3,814	228,00	54,130000
3,050	3,740	0,0	11,00	3,194	391,80	54,671159
3,390	2,580	0,0	11,30	2,624	631,60	55,221367
7,050	1,660-	0,0	11,70	2,119	953,50	55,783802
1,130-	3,900	0,0	17,30	0,015	548,90	56,264775
7,530	2,970-	0,0	12,00	1,660	1344,00	56,363389
7,420	4,160-	0,0	12,40	1,260	1763,00	56,968206
6,970	6,130-	0,0	12,80	0,915	2141,00	57,612484
0,510	2,050-	0,0	13,30	0,626	2386,00	58,323877
1,460-	7,480	0,0	15,20	0,084	1457,00	58,446590
2,660	7,220-	0,0	13,90	0,391	2404,00	59,164207
0,900-	7,650	0,0	14,30	0,212	2112,00	59,590983
0,810	7,050-	0,0	14,50	0,212	2124,00	60,306061
3,240-	6,970	0,0	13,60	0,391	2461,00	60,434776
0,670-	1,040	0,0	13,10	0,626	2504,00	61,150560
7,610-	5,700	0,0	12,70	0,915	2298,00	61,800154
7,770-	3,600	0,0	12,30	1,260	1933,00	62,411215
0,970	4,980-	0,0	15,40	0,083	1517,00	62,486260
7,680-	2,390	0,0	12,00	1,665	1503,00	62,997977
7,060-	1,080	0,0	11,70	2,115	1087,00	63,568518
3,320-	3,110-	0,0	11,30	2,620	733,50	64,127767
2,980-	4,210-	0,0	11,00	3,195	463,50	64,678903
4,230-	3,750-	0,0	10,70	3,815	274,80	65,224071
5,750-	2,670-	0,0	10,50	4,485	153,00	65,764772
7,000-	1,680-	0,0	10,20	5,225	80,09	66,302091
7,350-	1,690-	0,0	9,90	6,005	39,46	66,836830
7,440-	2,000-	0,0	9,70	6,845	18,32	67,369598
7,530-	2,280-	0,0	9,40	7,745	8,01	67,900867
7,600-	2,400-	0,0	9,20	8,695	3,30	68,431005
7,650-	2,500-	0,0	9,00	9,695	1,28	68,960311
0,090	0,360-	0,0	16,30	0,009	945,00	118,750343
0,000	0,000	0,6	19,20	0,049	67,90	368,498350
0,000	0,000	0,6	19,30	0,044	638,00	424,763124
0,000	0,000	0,6	19,20	0,049	235,00	487,249370
0,000	0,000	0,6	18,10	0,145	99,60	715,393150
0,000	0,000	0,6	18,20	0,130	671,00	773,839675
0,000	0,000	0,6	18,10	0,147	180,00	834,145330

الجدول 2

المعطيات المطيافية للتوهين ببخار الماء

b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	f_0
1,00	4,800	0,69	28,11	2,143	0,1130	22,235080
0,82	4,930	0,69	28,58	8,735	0,0012	67,803960
0,79	4,780	0,70	29,48	8,356	0,0008	119,995940
0,85	5,300	0,64	30,50	0,668	2,4200	183,310091
0,54	4,690	0,67	23,03	6,181	0,0483	321,225644
0,74	4,850	0,68	27,83	1,540	1,4990	325,152919
0,61	4,740	0,69	26,93	9,829	0,0011	336,222601
0,89	5,380	0,54	28,73	1,048	11,5200	380,197372
0,55	4,810	0,63	21,52	7,350	0,0046	390,134508
0,48	4,230	0,60	18,45	5,050	0,0650	437,346667
0,52	4,290	0,63	21,00	3,596	0,9218	439,150812
0,50	4,230	0,60	18,60	5,050	0,1976	443,018295
0,67	4,840	0,66	26,32	1,405	10,3200	448,001075
0,65	4,570	0,66	21,52	3,599	0,3297	470,888947
0,64	4,650	0,65	23,55	2,381	1,2620	474,689127
0,72	5,040	0,69	26,02	2,853	0,2520	488,491133
0,43	3,980	0,61	16,12	6,733	0,0390	503,568532
0,45	4,010	0,61	16,12	6,733	0,0130	504,482692
1,00	4,500	0,70	26,00	0,114	9,7010	547,676440
1,00	4,500	0,70	26,00	0,114	14,7700	552,020960
1,00	4,110	0,69	32,10	0,159	487,4000	556,936002
0,68	4,680	0,71	24,38	2,200	5,0120	620,700807
0,50	4,000	0,60	18,00	8,580	0,0713	645,866155
1,00	4,140	0,69	32,10	7,820	0,3022	658,005280
0,84	4,090	0,68	30,60	0,396	239,6000	752,033227
0,45	5,760	0,33	15,90	8,180	0,0140	841,053937
0,84	4,090	0,68	30,60	7,989	0,1472	859,962313
0,90	4,530	0,68	29,85	7,917	0,0605	899,306675
0,95	5,100	0,70	28,65	8,432	0,0426	902,616173
0,53	4,700	0,70	24,08	5,111	0,1876	906,207325
0,78	4,780	0,70	26,70	1,442	8,3400	916,171582
0,80	5,000	0,70	29,00	10,220	0,0869	923,118427
0,67	4,940	0,64	25,50	1,920	8,9720	970,315022
0,90	4,550	0,68	29,85	0,258	132,1000	987,926764
5,00	30,500	0,50	176,20	0,952	22 300,0000	1 780,000000

ينتج تواصل الجو الجاف من طيف امتصاص الأكسجين اللاطآن (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:

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

2 التوهين في المسير

1.2 مسيرات للأرض

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

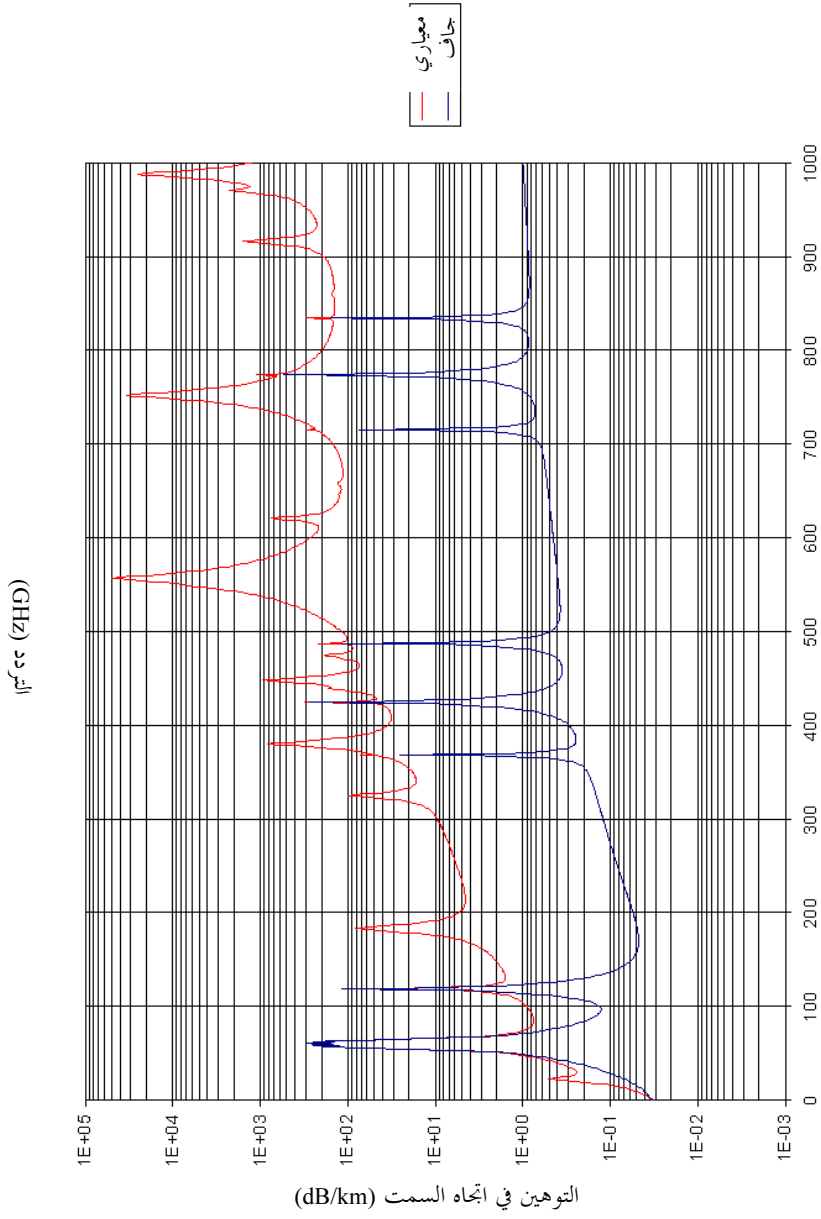
$$(10) \quad A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB}$$

حيث r_0 هو طول المسير بالكيلومتر (km).

2.2 المسيرات المائلة

يقدم هذا القسم طريقة تسمح بتكامل التوهين النوعي المحسوب بجمع خطوط الامتصاص (انظر أعلاه) من أجل قيم مختلفة للضغط والحرارة والرطوبة عبر الجو. وتفيد هذه الطريقة في تحديد التوهين في المسير بدقة من أجل أنظمة الاتصالات التي تتنوع تشكيلياتها الهندسية والموجودة داخل الجو الأرضي أو خارجه وتقوم الطريقة ببساطة على أساس تقسيم الجو إلى طبقات أفقية وتعيين خصائص معالم الأرصاد الجوية الخاصة بالضغط ودرجة الحرارة والرطوبة أثناء المسير. ويمكن عند الافتقار إلى الخصائص المحلية التي تم التوصل إليها مثلاً اعتباراً من معطيات الموجات الراديوية، استعمال الأجواء المرجعية الواردة في التوصية ITU-R P.835 إما من أجل تطبيق عالمي أو تطبيق في مواقع منخفضة الارتفاع (سنوياً) ومتوسطة الارتفاع (صيفاً وشتاء) وعالية الارتفاع (صيفاً وشتاء).

ويبين الشكل 3 التوهين باتجاه السمات المحسوب بفواصل يبلغ كل منها 1 GHz بهذه الطريقة من أجل جو مرجعي عالمي ورد في التوصية ITU-R P.835 مع طبقات أفقية تبلغ سماكة كل طبقة منها 1 km والتوهين المعبر عنه هو مجموع التوهينات المصاحبة لكل طبقة في حالة جو رطب (المنحني A) وجو جاف (المنحني B).



ويمكن حساب التوهين الكلي أثناء المسير المائل $A(h, \varphi)$ ، اعتباراً من محطة ارتفاعها h وزاوية ارتفاعها φ كالاتي حين $0 \leq \varphi$:

$$(11) \quad A(h, \varphi) = \int_h^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH$$

حيث يمكن تحديد قيمة Φ كالاتي على أساس قانون Snell بالإحداثيات القطبية:

$$(12) \quad \Phi = \arccos \left(\frac{c}{(r+H) \times n(H)} \right)$$

وحيث:

$$(13) \quad c = (r + h) \times n(h) \times \cos \varphi$$

وحيث $n(h)$ هو دليل الانكسار الراديوي للحو المحسوب بالرجوع إلى التوصية ITU-R P.453 استناداً إلى معطيات الضغط ودرجة الحرارة وضغط بخار الماء أثناء المسير (انظر التوصية ITU-R P.835).

إضافة إلى أنه عندما تكون $0 < \varphi$ يوجد ارتفاع أدنى h_{min} تصبح عنده الحزمة الراديوية موازية لسطح الأرض. ويمكن تحديد قيمة h_{min} بحل المعادلة المتسامية التالية:

$$(14) \quad (r + h_{min}) \times n(h_{min}) = c$$

ويمكن بسهولة حل المعادلة وذلك بتكرار الحساب التالي على أن تكون القيمة الأولية هي $h_{min} = h$:

$$(15) \quad h'_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - r$$

ويمكن إذن الحصول على التوهين $A(h, \varphi)$ كالاتي:

$$(16) \quad A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH + \int_{h_{min}}^h \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH$$

وينبغي عند إجراء التكامل بين المعادلتين (11) و(16) الانتباه إلى أن الصيغة الخاضعة للتكامل تصبح لا نهائية عند $\Phi = 0$. ومع ذلك يمكن استبعاد هذا التمييز بتحويل متغير مناسب كأن يستعمل في المعادلة (11) $u^4 = H - h$ وفي المعادلة (16) $u^4 = H - h_{min}$.

وتسمح الخوارزمية أدناه بإيجاد حل رقمي للتوهين الذي يُعزى إلى الغازات الجوية.

ولا بد بغية حساب التوهين الكلي لوصلة ساتلية من معرفة التوهين النوعي في كل نقطة من الوصلة وكذلك لمعرفة طول المسير الذي يتضمن التوهين النوعي. ويجب لتحديد طول المسير مراعاة منحني الشعاع الذي يعزى إلى كروية الأرض.

وإذا اتخذ الشكل 4 كمرجع a_n هو طول المسير خلال الطبقة n التي تقابل سماكتها δ_n ودليل انكسارها n_n . أما α_n و β_n فهما زاويتا الحدوث للدخول والخروج. و r_n هو الشعاع بين المركز والأرض وبداية الطبقة n . ويمكن التعبير عن a_n كالاتي:

$$(17) \quad a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2}$$

ويمكن حساب الزاوية a_n باستعمال الصيغة التالية:

$$(18) \quad \alpha_n = \pi - \arccos \left(\frac{-a_n^2 - 2 r_n \delta_n - \delta_n^2}{2 a_n r_n + 2 a_n \delta_n} \right)$$

و β_1 هي زاوية الحدت على مستوى محطة على الأرض (أي تكملة زاوية الارتفاع θ). ويمكن حساب β_{n+1} بدلالة α_n عن طريق استعمال قانون Snell والذي يصبح كالآتي:

$$(19) \quad \beta_{n+1} = \arcsin \left(\frac{n_n}{n_{n+1}} \sin \alpha_n \right)$$

حيث n_n و n_{n+1} هما دليل الانكسار للطبقتين n و $n+1$.

أما حد وظيفة التردد الباقي (المشتت) فله تأثير هامشي في النتيجة (حوالي 1%) لكن يمكن أن يحسب بالطريقة الواردة في كتيب قطاع الاتصالات الراديوية بشأن الأرصاد الجوية الراديوية. ويمكن تحديد التوهين الكلي باستعمال الصيغة التالية:

$$(20) \quad A_{gas} = \sum_{n=1}^k a_n \gamma_n \quad \text{dB}$$

وحيث γ_n هي التوهين النوعي المحسوب بواسطة الصيغة (1).

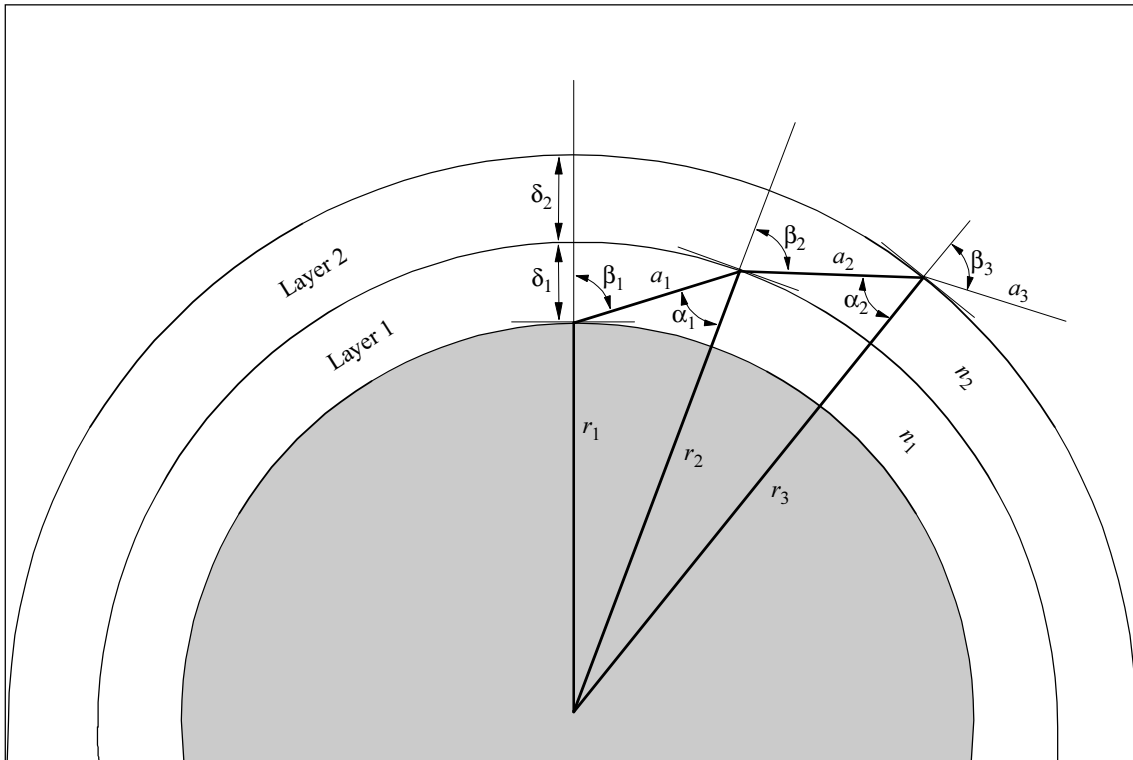
ويجب بغية ضمان الدقة في تقييم التوهين زيادة سماكة الطبقات أسياً بدلالة الارتفاع بدءاً من 10 cm كأدنى طبقة (مستوى الأرض) وحتى 1 km وعلى ارتفاع 100 m باستخدام المعادلة التالية:

$$(21) \quad \delta_i = 0.0001 \exp \left\{ \frac{i-1}{100} \right\} \quad \text{km}$$

من $i = 1 - 922$ ، مع العلم بأن $1,0 \text{ km} \cong \delta_{922}$ وأن $100 \text{ km} \cong \delta_{922}$.

وعندما يتعلق الأمر بالتطبيقات الخاصة بالاتجاه "أرض - فضاء"، ينبغي إجراء التكامل إلى ما يقرب من 30 km على الأقل وإلى 100 km عند الترددات المركزية لخطوط الأكسجين.

الشكل 4



3 آثار التشتت

تعالج آثار التشتت في كتيب قطاع الاتصالات الراديوية بشأن الأرصاد الجوية الراديوية والذي يتضمن نموذج حساب للتشتت قائم على حساب مجموع مساهمات خطوط الامتصاص. ويفترض من الناحية العملية ألا تفضي آثار التشتت تقييدات صارمة على أنظمة الاتصالات للأرض التي تعمل في موجات مليمترية والتي تصل عروض نطاقاتها بضع مئات MHz على مسافات قصيرة (مثلاً تقل عن حوالي 20 km) وخاصة في نوافذ الانتشار لترددات بعيدة مراكز خطوط الامتصاص الرئيسية. وفيما يخص أنظمة الاتصالات الساتلية ونظراً إلى طول المسيرات عبر الجو، يجب حتماً استعمال ترددات تقع ضمن نوافذ الانتشار حيث يكون التوهين بالغازات الجوية شأنه شأن التشتت المطابق ضعيفاً.

الملحق 2

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

يتضمن هذا الملحق خوارزميات مبسطة تفيد في تقييم سريع وتقريبي للتوهين بالغازات الجوية من أجل مدى محصور من ظروف الأرصاد الجوية وتنوع محدود من التشكيلات الهندسية.

1 التوهين النوعي

يمكن تقييم التوهين النوعي الذي يعزى إلى الهواء الجاف وبخار الماء اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاع 10 km بواسطة خوارزميات مبسطة ترد أدناه والتي تستند إلى ضبط للمنحنيات الناتجة عن الحساب بجمع مساهمات خطوط الامتصاص وتعطي نتائج توافق نتائج الحسابات الأدق بحوالي $\pm 10\%$ وسطياً في الترددات البعيدة عن مراكز خطوط الامتصاص الرئيسية. ويقل عادة الفرق المطلق بين نتائج هذه الخوارزميات ونتائج طريق جمع مساهمات خطوط الامتصاص عن 0,1 dB/km ويصل إلى حد أقصى هو 0,7 dB/km بجوار 60 GHz. وفيما يتعلق بالمرتفعات التي تفوق 10 km وفي الحالات التي تتطلب دقة أكبر، يجدر استعمال طريقة جمع مساهمات خطوط الامتصاص.

ويعطى التوهين γ_o (dB/km) في حالة الهواء الجاف كالاتي:

For $f \leq 54$ GHz:

$$(22a) \quad \gamma_o = \left[\frac{7.2r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34r_p^2r_t^{1.6}} + \frac{0.62\xi_3}{(54-f)^{1.16}\xi_1 + 0.83\xi_2} \right] f^2 r_p^2 \times 10^{-3}$$

For $54 \text{ GHz} < f \leq 60$ GHz:

$$(22b) \quad \gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f-58)(f-60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f-54)(f-60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f-54)(f-58) \right]$$

For $60 \text{ GHz} < f \leq 62$ GHz:

$$(22c) \quad \gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f-60}{2}$$

For $62 \text{ GHz} < f \leq 66$ GHz:

$$(22d) \quad \gamma_o = \exp \left[\frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f-64)(f-66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f-62)(f-66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f-62)(f-64) \right]$$

For $66 \text{ GHz} < f \leq 120$ GHz:

$$(22e) \quad \gamma_o = \left\{ 3.02 \times 10^{-4} r_t^{3.5} + \frac{0.283 r_t^{3.8}}{(f-118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.502 \xi_6 [1 - 0.0163 \xi_7 (f-66)]}{(f-66)^{1.4346} \xi_4 + 1.15 \xi_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3}$$

For $120 \text{ GHz} < f \leq 350$ GHz:

$$(22f) \quad \gamma_o = \left[\frac{3.02 \times 10^{-4}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} + \frac{0.283 r_t^{0.3}}{(f-118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} \right] f^2 r_p^2 r_t^{3.5} \times 10^{-3} + \delta$$

with:

$$(22g) \quad \xi_1 = \phi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515)$$

$$(22h) \quad \xi_2 = \phi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416)$$

$$(22i) \quad \xi_3 = \phi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854)$$

$$(22j) \quad \xi_4 = \phi(r_p, r_t, -0.0112, 0.0092, -0.1033, -0.0009)$$

$$(22k) \quad \xi_5 = \phi(r_p, r_t, 0.2705, -2.7192, -0.3016, -4.1033)$$

$$(22l) \quad \xi_6 = \phi(r_p, r_t, 0.2445, -5.9191, 0.0422, -8.0719)$$

$$(22m) \quad \xi_7 = \phi(r_p, r_t, -0.1833, 6.5589, -0.2402, 6.131)$$

$$(22n) \quad \gamma_{54} = 2.192\phi(r_p, r_t, 1.8286, -1.9487, 0.4051, -2.8509)$$

$$(22o) \quad \gamma_{58} = 12.59\phi(r_p, r_t, 1.0045, 3.5610, 0.1588, 1.2834)$$

$$(22p) \quad \gamma_{60} = 15.0\phi(r_p, r_t, 0.9003, 4.1335, 0.0427, 1.6088)$$

$$(22q) \quad \gamma_{62} = 14.28\phi(r_p, r_t, 0.9886, 3.4176, 0.1827, 1.3429)$$

$$(22r) \quad \gamma_{64} = 6.819\phi(r_p, r_t, 1.4320, 0.6258, 0.3177, -0.5914)$$

$$(22s) \quad \gamma_{66} = 1.908\phi(r_p, r_t, 2.0717, -4.1404, 0.4910, -4.8718)$$

$$(22t) \quad \delta = -0.00306\phi(r_p, r_t, 3.211, -14.94, 1.583, -16.37)$$

$$(22u) \quad \phi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1-r_p) + d(1-r_t)]$$

حيث:

f : التردد (GHz)

$r_p = p / 1013$

$r_t = 288 / (27 + t)$

p : الضغط (hPa)

t : درجة الحرارة (°C)، ويمكن الحصول على القيم المتوسطة لدرجات الحرارة من الخرائط الواردة في التوصية ITU-R P.1510 عند عدم توفر المعطيات الملائمة.

ويعطى التوهين γ_w (dB/km) في حالة بخار الماء كالتالي:

$$\begin{aligned}
 \gamma_w = & \left\{ \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} \right. \\
 & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} \\
 & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\
 (23a) \quad & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\
 & \left. + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right\} f^2 r_t^{2.5} \rho \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

with:

$$(23b) \quad \eta_1 = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006 \rho$$

$$(23c) \quad \eta_2 = 0.735 r_p r_t^{0.5} + 0.0353 r_t^4 \rho$$

$$(23d) \quad g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2$$

وحيث ρ هي كثافة بخار الماء (g/m^3).

ويبين الشكل 5 التوهين النوعي بين 1 و 350 GHz على مستوى البحر من أجل الهواء الجاف وبخار الماء الذي تصل كثافته إلى 7.5 g/m^3 .

2 التوهين في المسير

1.2 المسيرات للأرض

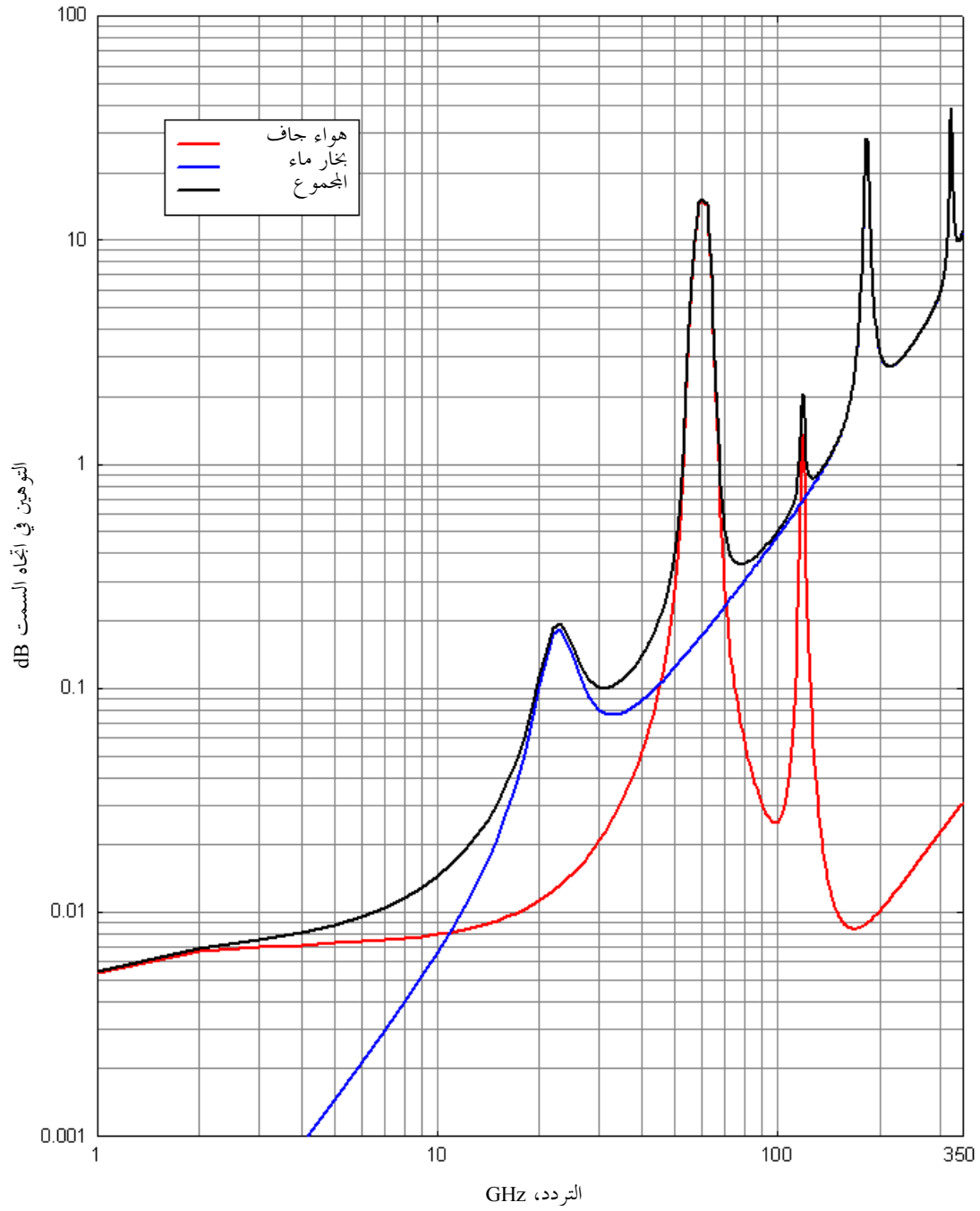
يمكن، في حالة المسير الأفقي، أو المسيرات المائلة قليلاً قريباً من الأرض، أن يكتب التوهين في المسير على النحو التالي:

$$(24) \quad A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB}$$

حيث r_0 هو طول المسير بالكيلومتر.

الشكل 5

التوهين النوعي بالغازات الجوية



الضغط: 1013 hPa

الحرارة: 15 °C

بخار الماء: 7,5 g/m³

2.2 المسيرات المائلة

تتضمن هذه الفقرة حوارزميات مبسطة لحساب التوهين بالغازات الجوية على طول مسيرات مائلة عبر جو الأرض. وهي تستند إلى تحديد ارتفاع مكافئ يمكن به مضاعفة التوهين النوعي المحسوب في الفقرة 1 وذلك للحصول على التوهين على المسير في اتجاه السميت. وتعلق الارتفاعات المكافئة بالضغط ويمكن بالتالي استعمالها في تحديد التوهين باتجاه السميت اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاع 10 km تقريباً. وتبلغ دقة نتائج توهينات السميت $\pm 10\%$ بالنسبة إلى الجو الجاف و $\pm 5\%$ بالنسبة إلى بخار الماء اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاعات تتقارب 10 km وذلك استناداً إلى معطيات الضغط ودرجة الحرارة وكثافة بخار الماء المناسبة للارتفاع المعني. أما فيما يخص الارتفاعات التي تزيد عن 10 km وخاصة بالنسبة إلى الترددات الواقعة ضمن الترددات القريبة من الترددات المركزية لخطوط الطين بأقل من 0,5 GHz ومهما كان الارتفاع، فيستحسن تطبيق إجراء الملحق 1. وتجدر الإشارة إلى أن الدالة الغوسية في المعادلة (25b) التي تصف الارتفاع المكافئ للأكسجين في نطاق التردد 60 GHz قد تؤدي إلى معدل أخطاء يفوق 10% عند بعض الترددات، ولذا فإن هذا الإجراء غير قادر على إنتاج البنية المبينة في الشكل 7. وتشتق المعادلات الواردة أدناه من توهينات السميت المحسوبة استناداً إلى إجراء الملحق 1 الذي يحسب بالأرقام تكامل التوهينات في عروض النطاق فوق 500 MHz؛ وبالتالي تمثل التوهينات الناتجة عملياً أدنى قيم تقريبية في النطاق 50-70 GHz. وفيما يخص الاتجاهات الأخرى غير اتجاه السميت يمكن تحديد التوهين على المسير باستعمال الإجراءات الموصوفة لاحقاً في هذه الفقرة.

تعطي العبارتان التاليتان الارتفاع المكافئ للهواء الجاف:

$$(25a) \quad h_o = \frac{6.1}{1+0.17r_p^{-1.1}}(1+t_1+t_2+t_3)$$

حيث:

$$(25b) \quad t_1 = \frac{4.64}{1+0.066r_p^{-2.3}} \exp \left[- \left(\frac{f-59.7}{2.87+12.4 \exp(-7.9r_p)} \right)^2 \right]$$

$$(25c) \quad t_2 = \frac{0.14 \exp(2.12r_p)}{(f-118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2r_p)}$$

$$(25d) \quad t_3 = \frac{0.0114}{1+0.14r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247+0.0001f+1.61 \cdot 10^{-6} f^2}{1-0.0169f+4.1 \cdot 10^{-5} f^2+3.2 \cdot 10^{-7} f^3}$$

مع العلم بأن:

$$(25e) \quad h_o \leq 10.7r_p^{0.3} \quad \text{when } f < 70 \text{ GHz}$$

ويكون الارتفاع المكافئ لبخار الماء:

$$(26a) \quad h_w = 1.66 \left(1 + \frac{1.39\sigma_w}{(f-22.235)^2 + 2.56\sigma_w} + \frac{3.37\sigma_w}{(f-183.31)^2 + 4.69\sigma_w} + \frac{1.58\sigma_w}{(f-325.1)^2 + 2.89\sigma_w} \right)$$

for $f \leq 350$ GHz

$$(26b) \quad \sigma_w = \frac{1,013}{1+\exp[-8,6(r_p-0,57)]}$$

حساب التوهين في اتجاه السميت بين الترددات 50 و 70 GHz دالة معقدة للتردد كما هو مبين في الشكل 7. ولا تتيح عموماً الخوارزميات الواردة أعلاه إلا حساباً تقريبياً للسويات الدنيا للتوهين المحتمل وجوده في هذا المدى من الترددات. ويستحسن استعمال إجراء الملحق 1 للحصول على مزيد من الدقة.

يستند مفهوم الارتفاع المكافئ إلى افتراض جو أسي يحدده سلم للارتفاع المكافئ هدفه وصف تناقص الكثافة وفقاً للارتفاع. وتجدر الإشارة إلى أن سلا لم الارتفاع للهواء الجاف ولبخار الماء قد تتغير مع خط العرض والفصل و/أو المناخ، وأن توزيعات بخار الماء في الجو الفعلي قد تنحرف عن التوزيع الأسي، وتكون التغيرات مقابلة للارتفاعات المكافئة. وتطبق القيم المشار إليها أعلاه حتى ارتفاع 10 km.

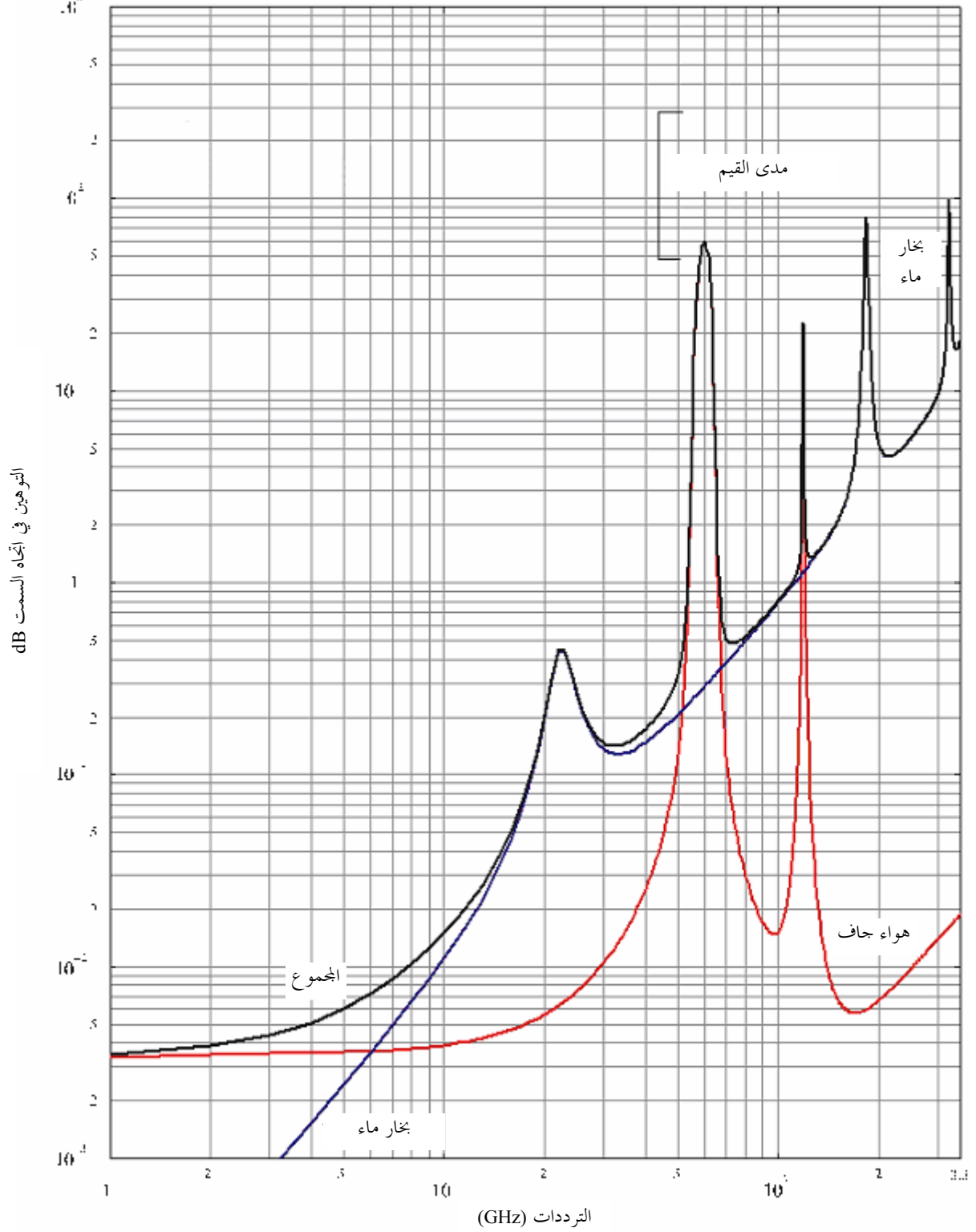
ويكون عندها التوهين الكلي باتجاه السميت:

$$(27) \quad A = \gamma_o h_o + \gamma_w h_w \quad \text{dB}$$

ويبين الشكل 6 التوهين الكلي باتجاه السميت عند مستوى البحر في حالتي التوهين الناجم عن الهواء الجاف وعن بخار الماء وذلك استناداً إلى المتوسط السنوي العام المرجعي للجو والوارد في التوصية ITU-R P.835. ويمكن الحصول على دقة أكبر بين 50 و 70 GHz من خلال المنحني 0 km في الشكل 7. وقد استعملت للحصول على هذه الدقة طريقة جمع مساهمات خطوط الامتصاص الموصوفة في الملحق 1.

الشكل 6

التوهين الكلي الناجم عن الهواء الجاف وبخار الماء على مستوى البحر في اتجاه السم

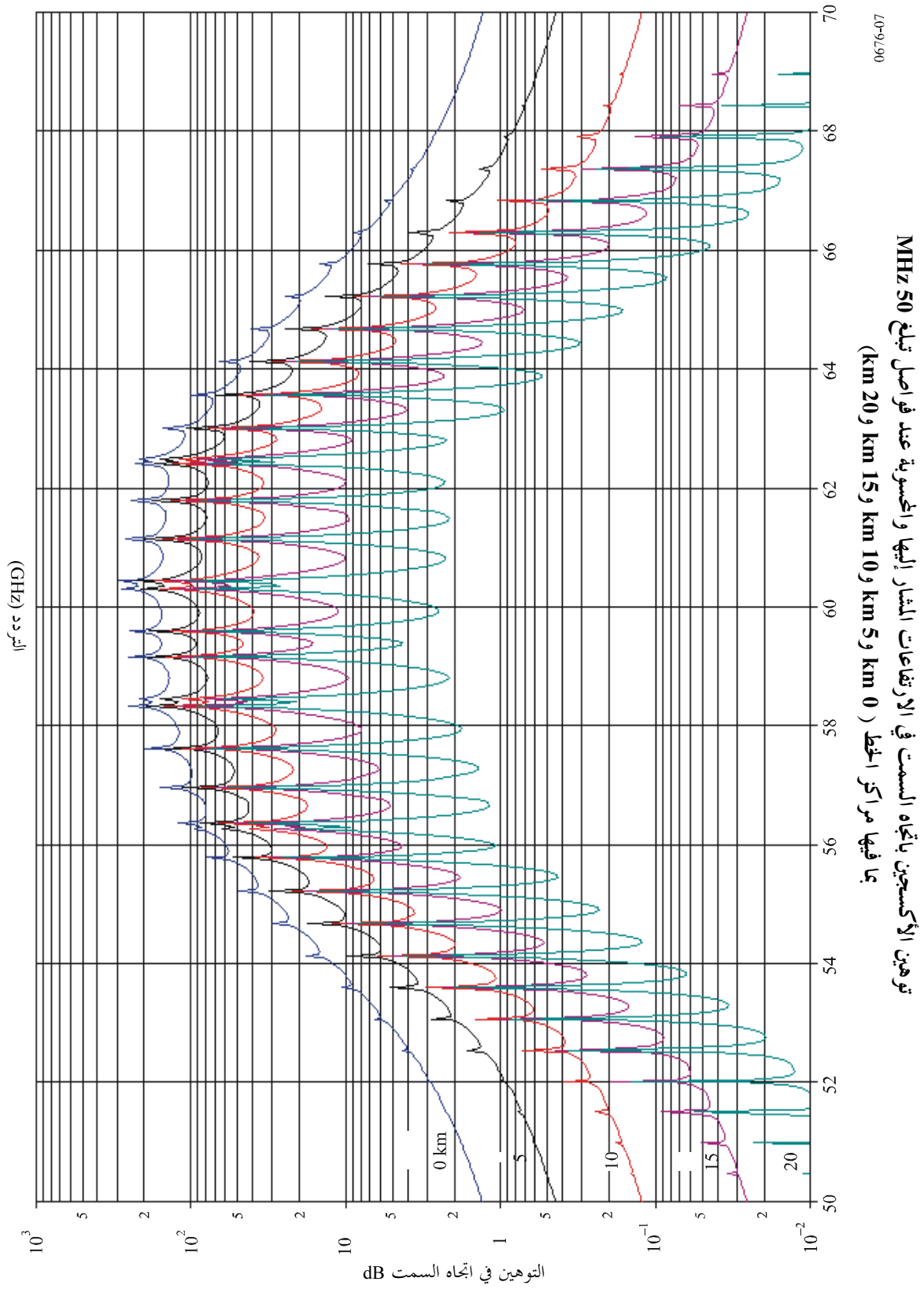


الضغط: 1013 hPa

الحرارة: 15 °C

بخار الماء: 7,5 g/m³

0676-06



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:

$$(28) \quad A = \frac{A_o + A_w}{\sin \varphi} \quad \text{dB}$$

حيث: $A_w = h_w \gamma_w$ و $A_o = h_o \gamma_o$

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

$$(29) \quad A(p) = \frac{A_o + A_w(p)}{\sin \varphi} \quad \text{dB}$$

حيث تعطى $A_w(p)$ في الفقرة 2.3.

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 (28) بالقيمتين h'_o و h'_w التاليتين:

$$(30) \quad h'_o = h_o \left[e^{-h_1/h_o} - e^{-h_2/h_o} \right] \quad \text{km}$$

$$(31) \quad h'_w = h_w \left[e^{-h_1/h_w} - e^{-h_2/h_w} \right] \quad \text{km}$$

مع التأكيد على أن القيمة ρ لكثافة بخار الماء المستعملة في المعادلة (23) هي القيمة الافتراضية على مستوى البحر المحسوبة كالتالي:

$$(32) \quad \rho = \rho_1 \times \exp(h_1/2)$$

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 (30) و (31) و (32) 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 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° و 5°

1.2.2.2 المسيرات أرض - فضاء

يجب، في هذه الحالة، استعمال الملحق 1 بهذه التوصية. كما ينبغي استعمال نفس الملحق 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 10 km عن مستوى البحر) باستعمال المعادلة التالية:

$$(33) \quad A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \varphi_2} \right] \\ + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \varphi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \varphi_2} \right] \quad \text{dB}$$

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 : زاوية الارتفاع عند الارتفاع h_1

F: دالة تعرف بالصيغة التالية:

$$(34) \quad F(x) = \frac{1}{0.661 x + 0.339 \sqrt{x^2 + 5.51}}$$

$$(35a) \quad \varphi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \varphi_1 \right)$$

$$(35b) \quad x_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_o}} \quad \text{for } i = 1, 2$$

$$(35c) \quad x'_i = \tan \varphi_i \sqrt{\frac{R_e + h_i}{h_w}} \quad \text{for } i = 1, 2$$

علماً بأن القيمة ρ لكثافة بخار الماء المستعملة في المعادلة (23) هي القيمة الافتراضية على مستوى البحر المحسوبة كالتالي:

$$(36) \quad \rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1/2)$$

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).

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 نهاية الفقرة 2.2.

3.2 التوهين ببخار الماء على المسيرات المائلة

تستند الطريقة أعلاه لحساب التوهين ببخار الماء على المسيرات المائلة إلى معرفة خصائص ضغط بخار الماء (أو كثافته) على طول المسير. وإذا عرفت الكتلة النوعية لبخار الماء V_i على طول المسير يمكن عندئذ استعمال طريقة أخرى. ويمكن التعبير عن التوهين الكلي ببخار الماء على النحو التالي:

$$(37) \quad A_w(f, \theta, P) = \frac{0.0173 V_t(P)}{\sin \theta} \frac{\gamma_W(f, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_W(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \quad \text{dB}$$

حيث:

$$\text{التردد (GHz)} = f$$

$$\text{ارتفاع الزاوية (< 5 درجات)} = \theta$$

$$\text{(GHz) 20,6} = f_{ref}$$

$$\text{780 (hPa) 780} = p_{ref}$$

$$\text{(g/m}^3\text{)} \frac{V(P)}{4} = \rho_{v,ref}$$

$$14 \ln \left(\frac{0.22 V_t(P)}{4} \right) + 3 \text{ (}^\circ\text{C)} = t_{ref}$$

معامل الامتصاص الكتلي لبخار الماء في النسبة المئوية للوقت المطلوب (mm أو kg/m^2) ويمكن حساب هذا المعامل من خصائص الموجات الراديوية أو قياسات إشعاعية أو من 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 استناداً إلى المعادلة (23a) (dB/km).