

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.676-9
(2012/02)

التوهين الناجم عن الغازات الجوية

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية

تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد المدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجميعيات 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 الكهترتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في الملحق 1 بالقرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل 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 التحديد الراديوي للموقع وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
الخدمة الثابتة الساتلية	S
أنظمة الاستشعار عن بعد	RS
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، 2012

© ITU 2012

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

التوصية ITU-R P.676-9

التوهين الناجم عن الغازات الجوية

(المسألة ITU-R 201/3)

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

مجال التطبيق

تعرض التوصية ITU-R P.676 أساليب تقدير التوهين الناجم عن الغازات الجوية على مسيرات الأرض والمسيرات المائية باستعمال:

أ) تقدير التوهين الناجم عن الغازات الجوية المحسوب بجمع فرادى خطوط الامتصاص الصالحة بالنسبة لمدى التردد 1-1000 GHz،

ب) أسلوب مبسط تقريبي لتقدير التوهين الغازي المنطبق في مدى التردد 1-350 GHz.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) ضرورة تقدير توهين الغازات الجوية على مسيرات الأرض والمسيرات المائية،

توصي

1 بأن تستعمل للتطبيقات العامة الإجراءات الواردة في الملحق 1 لحساب التوهين بالغازات الجوية على ترددات تصل حتى 1000 GHz؛

2 بأن يستعمل الإجراءات الأبسط حسابياً الواردة في الملحق 2 لإجراء تقدير تقريبي للتوهين الناجم عن الغازات الجوية في مدى الترددات بين 1 و350 GHz.

الملحق 1

حساب التوهين الناجم عن الغازات الجوية بواسطة جمع مساهمات خطوط الامتصاص

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 الأكسجين وبخار الماء مع عوامل صغيرة إضافية مطابقة لطيف Debye اللاتنان الصادر عن الأكسجين تحت 10 GHz، وللتوهين المستحث من ضغط الآزوت فوق 100 GHz وللطيف المستمر لبخار الماء الذي يسمح بمراعاة القيم المقيسة لامتصاص بخار الماء التي تفوق القيم المتوقعة. ويوضح الشكل 1 التوهين النوعي المحسوب من 0 إلى 1000 GHz بفواصل يبلغ كل منها 1 GHz، من أجل ضغط مقداره 1013 hPa ودرجة حرارة هي 15° وذلك في حالتي كثافة بخار الماء البالغة 7,5 g/m³ والجو الجاف (المنحني B).

ويندمج بجوار 60 GHz العديد من خطوط امتصاص الأكسجين في ضغوط على مستوى البحر من أجل تشكيل نطاق وحيد وعريض للامتصاص والذي يوضح بالتفصيل في الشكل 2. ويبين هذا الشكل أيضاً التوهين بالأكسجين على مرتفعات أعلى. وكلما كان الضغط منخفضاً كلما زادت استبانة الخطوط. ولا تدرج في طريقة التنبؤ خطأً خطأً بعض أنواع الجزئيات الأخرى (مثل: أنواع نظائر الأكسجين وأنواع الأكسجين 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.

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 الملحق 2 من أجل مديات محدودة تتعلق بظروف الأرصاد الجوية. 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 اللاتزان) 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 هي شدة الخط من الرتبة i ، و F_i عامل الشكل، ويتعلق المجموع بكل الخطوط (فيما يتعلق بالترددات f ، فوق 118,750343 GHz لا تدخل في الحساب إلا خطوط الأكسجين فوق 60 GHz)؛ وينبغي بدء الجمع اعتباراً من $i = 38$ وليس $i = 1$ ، هو $N''_D(f)$ 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)

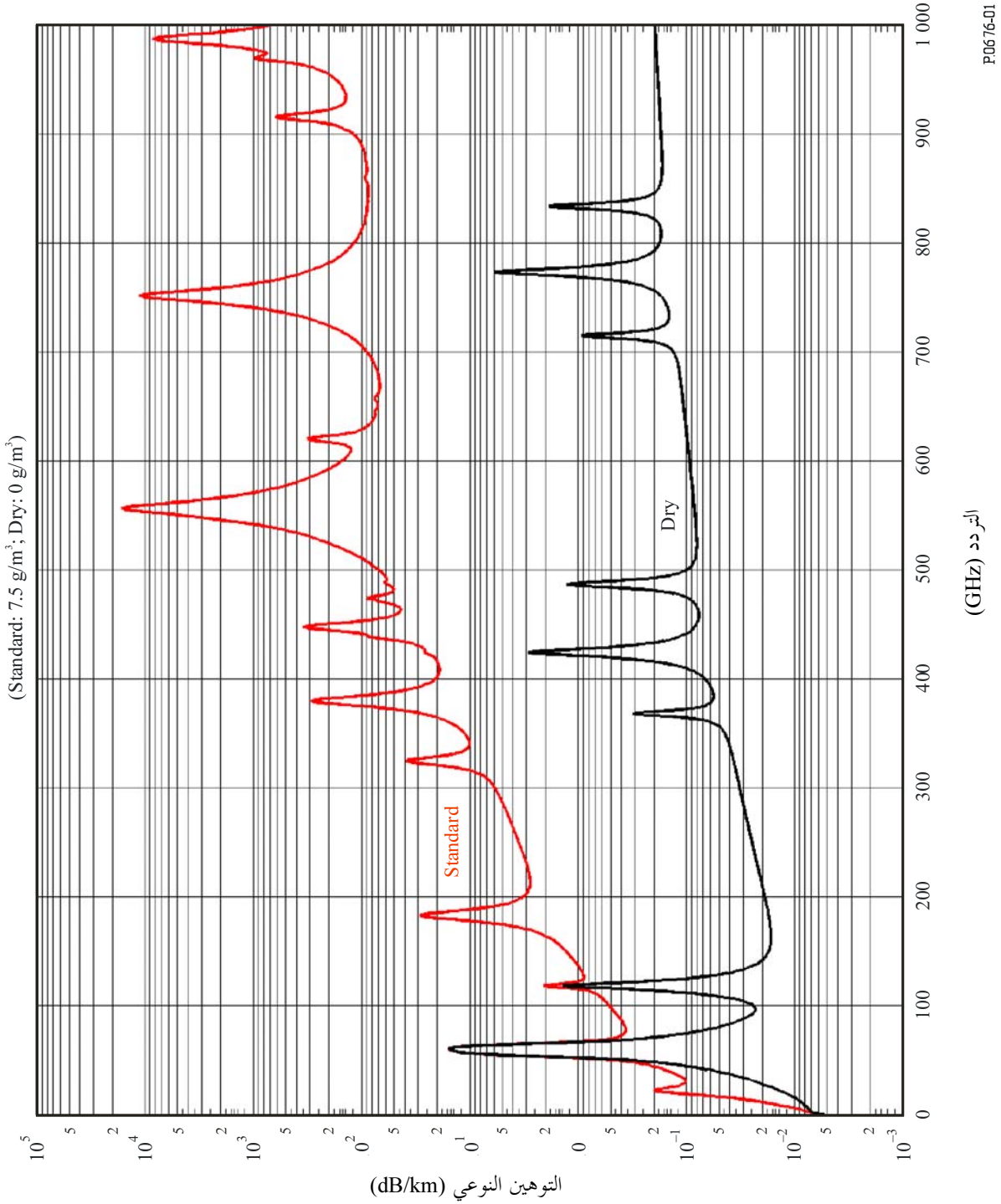
e : الضغط الجزئي لبخار الماء معبراً عنه بالوحدات hPa (الضغط الجوي الكلي: $p_{tot} = p + e$)

θ : $300/T$

T : درجة الحرارة (K).

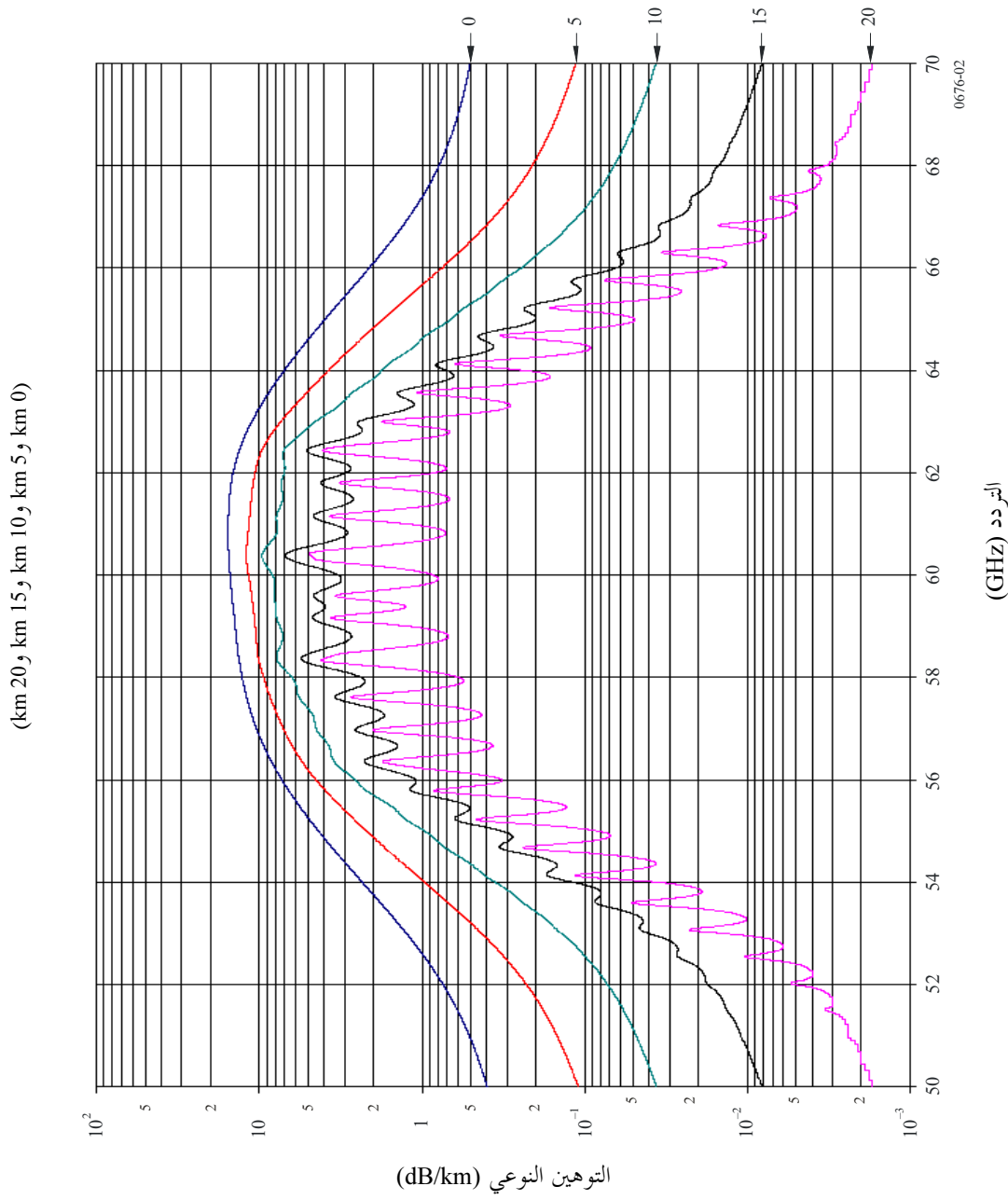
الشكل 1

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



الشكل 2

توهين نوعي في مدى الترددات 50-70 GHz في الارتفاعات المذكورة



ويناسب استعمال القيمتين المحليتين 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:

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

ويعدل عرض الخط ليتماشى مع توضيح دوبلر على النحو التالي:

$$(6b) \quad \begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\Delta f^2 + 2.25 \times 10^{-6}} && \text{للكسجين} \\ &= 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 \Delta f^2 + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f_i^2}{\theta}} && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

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

$$(7) \quad \begin{aligned} \delta &= (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} p \theta^{0.8} && \text{للكسجين} \\ &= 0 && \text{لبخار الماء} \end{aligned}$$

ويعطي الجدولان 1 و 2 المعاملات المطيافية.

الجدول 1

المعطيات المطيافية للتوهين بالأوكسجين

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

الجدول 2

المعطيات المطيافية للتوهين ببخار الماء

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
22,235080	0,1130	2,143	28,11	0,69	4,800	1,00
67,803960	0,0012	8,735	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0008	8,356	29,48	0,70	4,780	0,79
183,310091	2,4200	0,668	30,50	0,64	5,300	0,85
321,225644	0,0483	6,181	23,03	0,67	4,690	0,54
325,152919	1,4990	1,540	27,83	0,68	4,850	0,74
336,222601	0,0011	9,829	26,93	0,69	4,740	0,61
380,197372	11,5200	1,048	28,73	0,54	5,380	0,89
390,134508	0,0046	7,350	21,52	0,63	4,810	0,55
437,346667	0,0650	5,050	18,45	0,60	4,230	0,48
439,150812	0,9218	3,596	21,00	0,63	4,290	0,52
443,018295	0,1976	5,050	18,60	0,60	4,230	0,50
448,001075	10,3200	1,405	26,32	0,66	4,840	0,67
470,888947	0,3297	3,599	21,52	0,66	4,570	0,65
474,689127	1,2620	2,381	23,55	0,65	4,650	0,64
488,491133	0,2520	2,853	26,02	0,69	5,040	0,72
503,568532	0,0390	6,733	16,12	0,61	3,980	0,43
504,482692	0,0130	6,733	16,12	0,61	4,010	0,45
547,676440	9,7010	0,114	26,00	0,70	4,500	1,00
552,020960	14,7700	0,114	26,00	0,70	4,500	1,00
556,936002	487,4000	0,159	32,10	0,69	4,110	1,00
620,700807	5,0120	2,200	24,38	0,71	4,680	0,68
645,866155	0,0713	8,580	18,00	0,60	4,000	0,50
658,005280	0,3022	7,820	32,10	0,69	4,140	1,00
752,033227	239,6000	0,396	30,60	0,68	4,090	0,84
841,053973	0,0140	8,180	15,90	0,33	5,760	0,45
859,962313	0,1472	7,989	30,60	0,68	4,090	0,84
899,306675	0,0605	7,917	29,85	0,68	4,530	0,90
902,616173	0,0426	8,432	28,65	0,70	5,100	0,95
906,207325	0,1876	5,111	24,08	0,70	4,700	0,53
916,171582	8,3400	1,442	26,70	0,70	4,780	0,78
923,118427	0,0869	10,220	29,00	0,70	5,000	0,80
970,315022	8,9720	1,920	25,50	0,64	4,940	0,67
987,926764	132,1000	0,258	29,85	0,68	4,550	0,90
1 780,000000	22 300,0000	0,952	176,20	0,50	30,500	5,00

ينتج تواصل الجو الجاف من طيف امتصاص الأكسجين اللا طَّن (طيف Debye) تحت 10 GHz، والتوهين المستحث من ضغط الآزوت 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 تشكيلاتها 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:

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

حيث $n(h)$ هو دليل الانكسار الراديوي للجو 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 $A(h, \varphi)$ كالآتي:

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

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 كالآتي:

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

ويمكن حساب الزاوية a_n باستعمال الصيغة التالية:

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

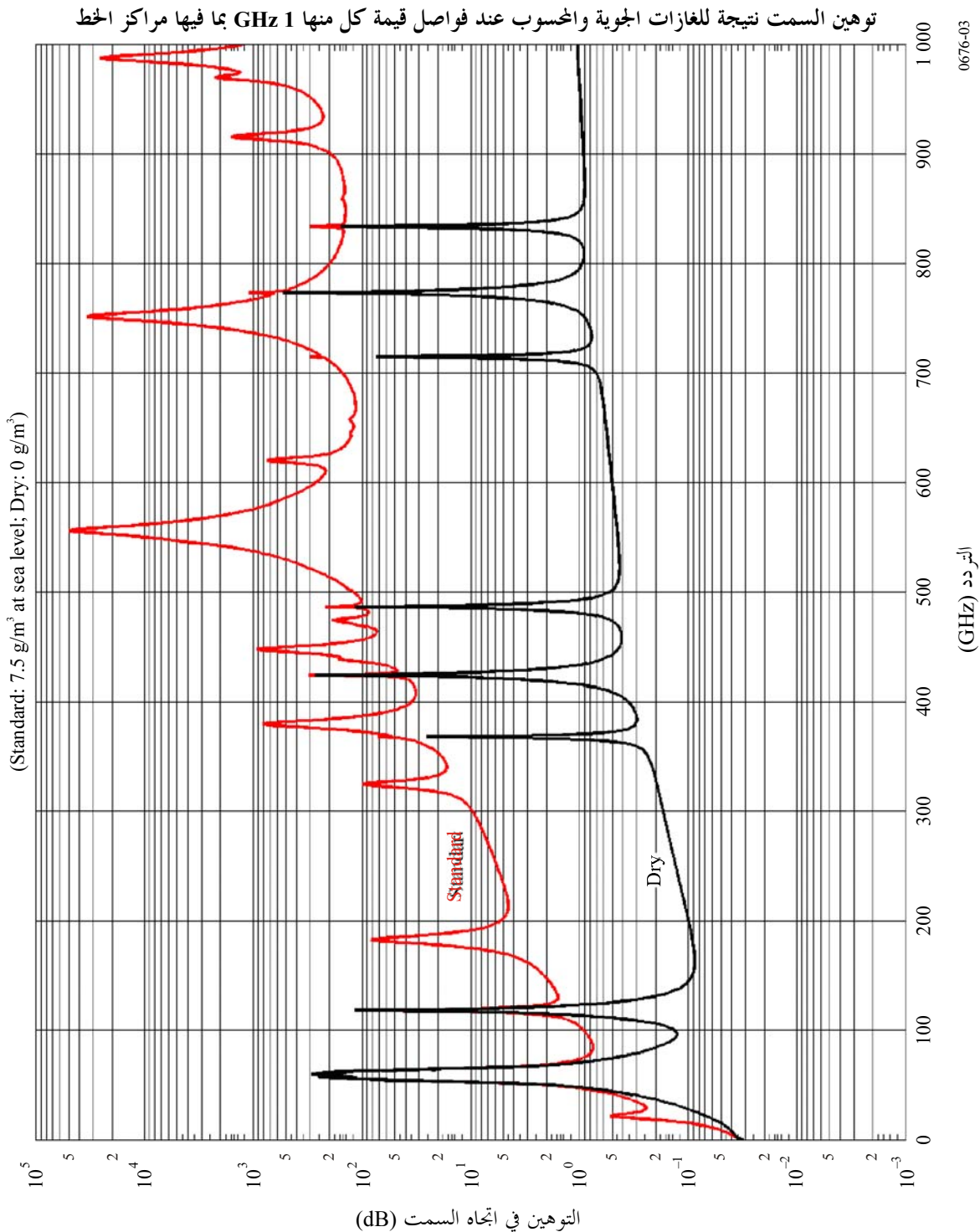
و β_1 هي زاوية الحدوث على مستوى محطة على الأرض (أي تكملة زاوية الارتفاع θ). ويمكن حساب $\beta_n + 1$ بدلالة α_n عن طريق استعمال قانون Snell والذي يصبح كالآتي:

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

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

ويمكن للمعادلة (19) أن تفقد صلاحيتها عند زوايا الارتفاع المنخفضة جداً ($\varphi < 1^\circ$)، عندما تستخدم كمدخلات بيانات المسبارات الراديوية الموجودة في بعض مناطق العالم المعرضة لظروف تعدد مسارات الانتشار. وفي هذه الحالات، توجد طبقات جوية ذات تغيرات في قيم الانكسارية الراديوية أقل من 157 N/km ومن ثم لا يمكن أن تطبق فيها خوارزمية تتبع الشعاع (المعادلات (17) إلى (19)) القائمة على البصريات الهندسية. وتصبح دالة قوس الجيب (arcsine) في المعادلة (19) معقدة في ظل هذه الظروف الشاذة حيث تصبح قيمتها عندئذ أكبر قليلاً من الواحد الصحيح (1). وجدير بالذكر أن المعادلة (19) تصلح لكل زوايا الارتفاع عند استخدام طبقات الجو المعيارية المرجعية الموضحة في التوصية ITU-R P.835 كمدخل للمعادلة، حيث أن هذه الطبقات النموذجية- لا تتضمن بالقطع تغيرات قوية سالبة من قيم الانكسارية-لا تدعم مثل ظروف الانتشار الشاذة هذه.

الشكل 3



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).

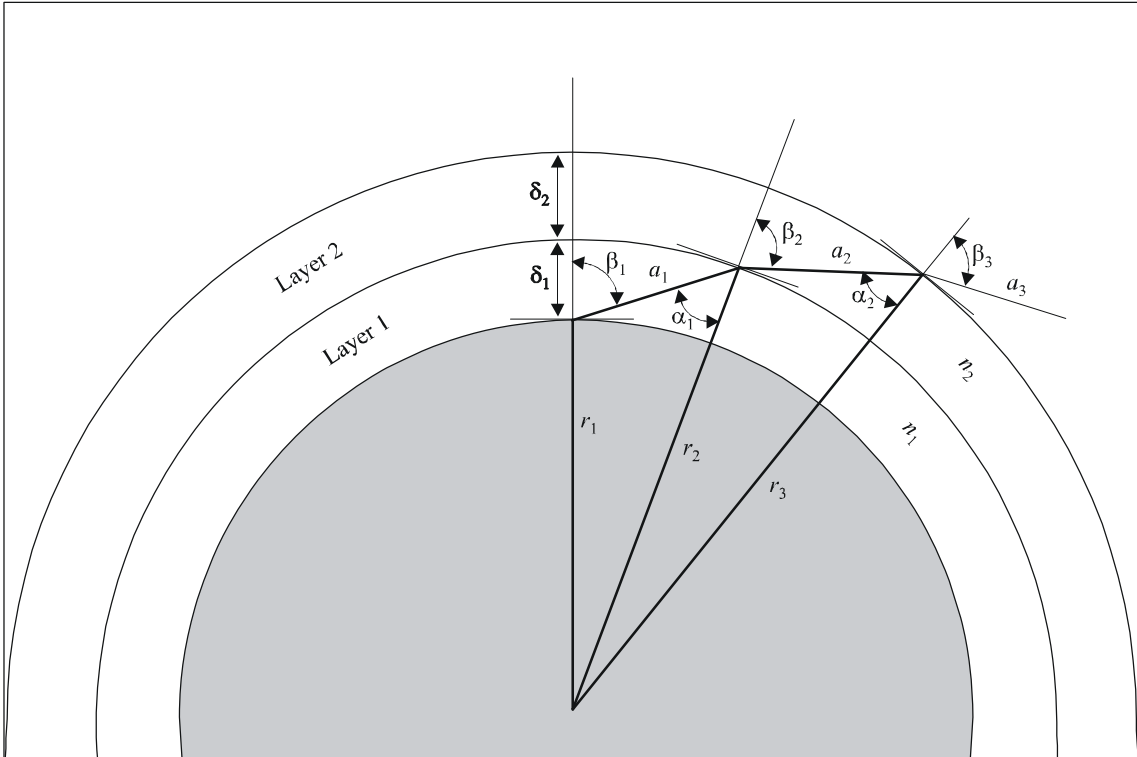
ويجب، بغية ضمان الدقة في تقييم التوهين، زيادة سماكة الطبقات أسياً بدلالة الارتفاع بدءاً من 10 cm كأدنى طبقة (مستوى الأرض) وحتى 1 km عند ارتفاع 100 km باستخدام المعادلة التالية:

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

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

وعندما يتعلق الأمر بالتطبيقات الخاصة بالاتجاه "أرض-فضاء"، ينبغي إجراء التكامل إلى ما يقرب من 30 km على الأقل وحتى 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 1-350 GHz

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

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

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

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

For 62 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 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 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)

$r_p = p_{tot}/1013$ حيث تمثل p_{tot} الضغط الجوي الإجمالي

$r_t = 288/(273 + t)$

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:

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

with:

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

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

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

حيث 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

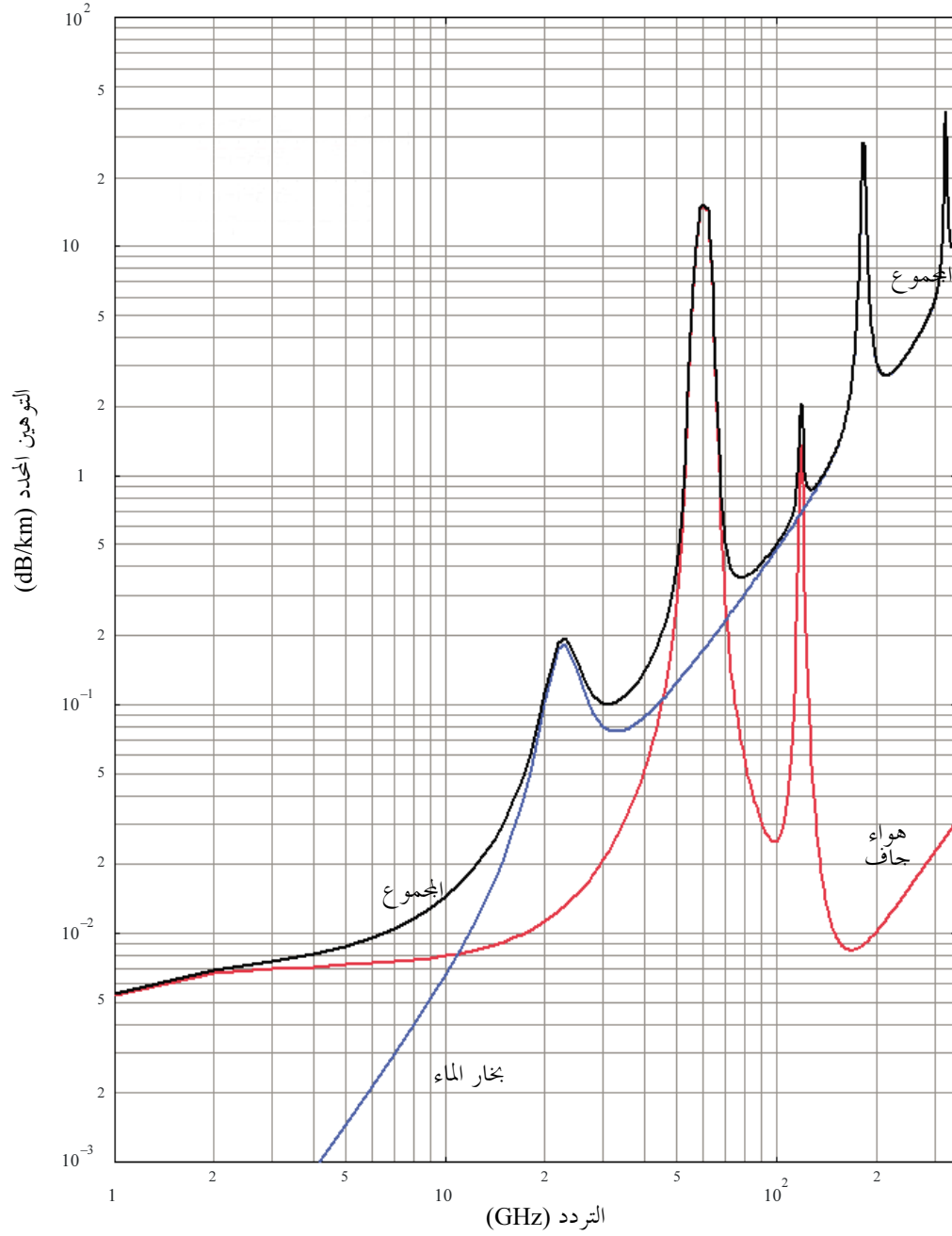
يمكن، في حالة المسير الأفقي، أو المسيرات المائلة قليلاً قريباً من الأرض، أن يكتب التوهين في المسير على النحو التالي:

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

حيث r_0 هو طول المسير بالكيلومتر (km).

الشكل 5

توهين محدد نتيجة للغازات الجوية



الضغط: 1013 hPa

الحرارة: 15 °C

كثافة بخار الماء: 7,5 g/m³

0676-05

2.2 المسيرات المائلة

تتضمن هذه الفقرة خوارزميات 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 السم. وتعلق الارتفاعات المكافئة بالضغط ويمكن بالتالي استعمالها في تحديد التوهين باتجاه السم اعتباراً من مستوى البحر وحتى ارتفاع 10 km تقريباً. وتبلغ دقة نتائج توهينات السم $\pm 10\%$ 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. وتجدد 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. وتشق المعادلات الواردة أدناه من توهينات السم 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 السم 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

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

وحساب التوهين في اتجاه السم 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.

ويستند مفهوم الارتفاع المكافئ إلى افتراض جو أسي يحدده سلم للارتفاع المكافئ هدفه وصف تناقص الكثافة وفقاً للارتفاع. وتجدر الإشارة إلى أن سلام 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 السمات:

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

ويبين الشكل 6 التوهين الكلي باتجاه السمات 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.

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:

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

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

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 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 (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 المكافئة 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 المائية

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:

$$A = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x_1) e^{-h_1/h_o}}{\cos \phi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x_2) e^{-h_2/h_o}}{\cos \phi_2} \right] + \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{R_e + h_1} \cdot F(x'_1) e^{-h_1/h_w}}{\cos \phi_1} - \frac{\sqrt{R_e + h_2} \cdot F(x'_2) e^{-h_2/h_w}}{\cos \phi_2} \right] \quad \text{dB}$$

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:

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

$$(35a) \quad \phi_2 = \arccos \left(\frac{R_e + h_1}{R_e + h_2} \cos \phi_1 \right)$$

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

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

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

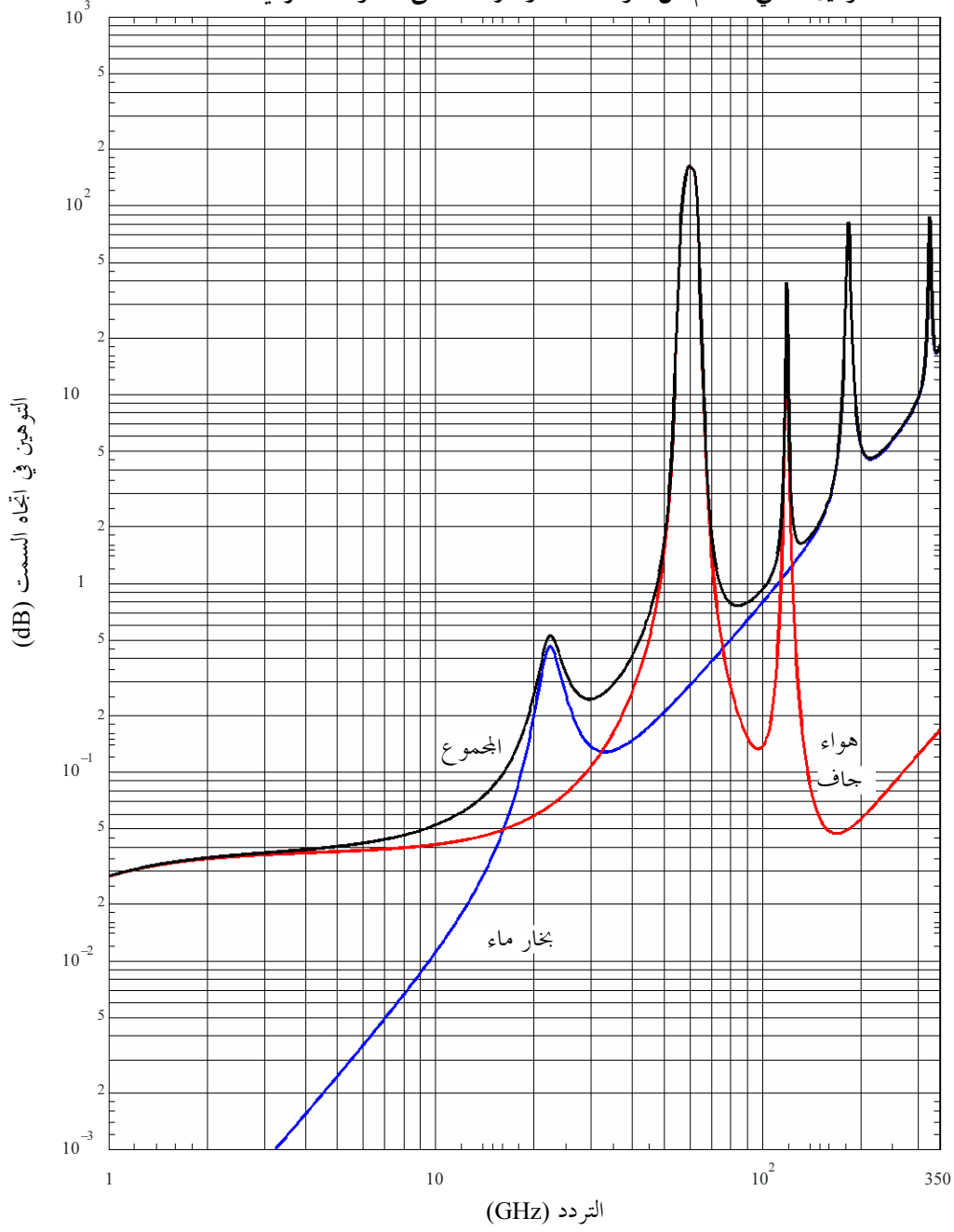
$$(36) \quad \rho = \rho_1 \cdot \exp(h_1 / 2)$$

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.

الشكل 6

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



الضغط على السطح: 1013 hPa

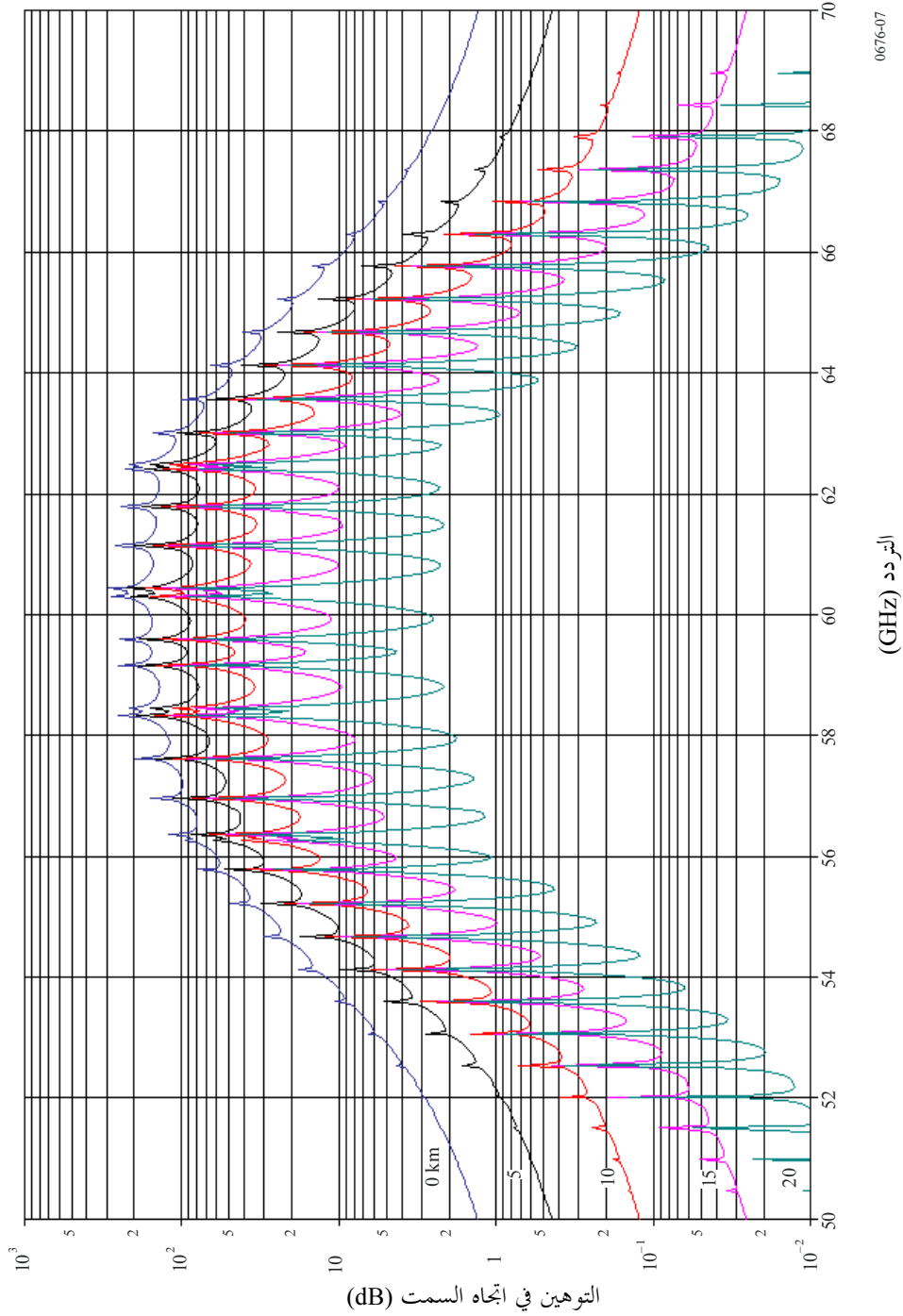
0676-06

الحرارة على السطح: 15 °C

كثافة بخار الماء على السطح: 7,5 g/m³

الشكل 7

توهين الأكسجين باتجاه السمات في الارتفاعات المشار إليها والمحسوبة عند فواصل تبلغ 50 MHz بما فيها مراكز الخط (0 km و 5 km و 10 km و 15 km و 20 km)



0676-07

التردد (GHz)

التوهين في اتجاه السمات (dB)

3.2 التوهين ببخار الماء على المسيرات في اتجاه السمات

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_t 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:

f : التردد (GHz)

θ : ارتفاع الزاوية (≤ 5 درجات)

f_{ref} : 20,6 (GHz)

p_{ref} : 780 (hPa)

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

t_{ref} : $3 + 14 \ln \left(\frac{0,22 V_t(P)}{4} \right)$ ($^{\circ}\text{C}$)

$V_t(P)$: معامل الامتصاص الكتلي لبخار الماء في النسبة المئوية للوقت المطلوب (kg/m^2 أو mm) 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).