الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.1622-1
(2022/08)

طرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم الأنظمة باتجاه أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية

الاتحاد الدولي للاتصالات

تمهيد

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

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

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهرتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني http://www.itu.int/publ/R-REC/en)

السلسلة	العنوان
BO	البث الساتلي
BR	التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية
BS	الخدمة الإذاعية (الصوتية)
BT	الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)
F	الخدمة الثابتة
M	الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة
P	انتشار الموجات الراديوية
RA	علم الفلك الراديوي
RS	أنظمة الاستشعار عن بُعد
S	الخدمة الثابتة الساتلية
SA	التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية
SF	تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة
SM	إدارة الطيف
SNG	التجميع الساتلي للأخبار
TF	إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت
V	المفردات والمواضيع ذات الصلة

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

النشر الإلكتروني
جنيف، 2023

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

التوصية ITU-R P.1622-1

طرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم الأنظمة باتجاه أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz

(2022-2003)

مجال التطبيق

تصف هذه التوصية تأثيرات الانتشار المطبقة عند تخطيط الأنظمة في الاتجاه أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz. وهي توفر طرائق التنبؤ بالانتشار للتأثيرات الناتجة عن انتثاري رايلي ومي والاضطرابات الجوية التي تحدث في الغلاف الجوي. كما تحيل إلى التوصية ITU-R P.676 التي توفر طرائق التنبؤ بخسائر الامتصاص الجوي.

مصطلحات أساسية

الامتصاص الجوي، الاضطرابات الجوية، اتساع التلألؤ، انتثار رايلي، انتثار مي

توصيات قطاع الاتصالات الراديوية ذات الصلة

التوصية ITU-R P.676

التوصية ITU-R P.1621

ملاحظة – ينبغي استخدام أحدث مراجعة/طبعة من التوصية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن الطيف بين 20 THz و375 THz مناسب لبعض الاتصالات الفضائية في بيئات قرب الأرض وبيئات الفضاء السحيق؛

ب) أن من الضروري الحصول على تقنيات مناسبة للتنبؤ بالانتشار للتخطيط الجيد لأنظمة باتجاه أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz؛

ج) أنه تم تطوير طرائق للتنبؤ بأكثر التأثيرات أهمية فيما يتعلق بالانتشار بالنسبة للأنظمة في الاتجاه أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz؛

د) أنه تم، قدر المستطاع، اختبار هذه الأساليب مقارنةً بالبيانات المتاحة وأظهرت أنها تقدم دقة متسقة مع التغيرية الطبيعية لظاهرة الانتشار ومناسبة لمعظم التطبيقات الحالية بالنسبة إلى تخطيط الأنظمة العاملة بين 20 THz و375 THz،

وإذ تعترف

بالرقم 78 من المادة 12 في دستور الاتحاد الذي ينص على أن وظيفة قطاع الاتصالات الراديوية تتضمن "... بإجراء دراسات من دون تحديد لمدى الترددات وباعتماد توصيات ..."،

توصي

باستخدام طرائق التنبؤ بالتاثيرات على الأنظمة فيما يتعلق بالانتشار الواردة في الملحقين 1 و2 عند التخطيط للأنظمة في الاتجاه أرض–فضاء، في المديات المعنية المناسبة المبينة في الملحقين 1 و2.

الملاحظة 1 – ترد في التوصية ITU-R P.1621 معلومات إضافية تتعلق ببيانات الانتشار الأساسية للترددات بين 20 THz و375 THz.

الملحق 1

1 مقدمة

يتسم الغلاف الجوي للأرض بالتعقيد والدينامية ويؤثر على أداء أي نظام عامل في مدى التردد من 20 THz إلى 375 THz بين الأرض والمركبات الفضائية التي تدور حولها. وتشمل التأثيرات على الأنظمة هذه ما يلي:

- خسارة إجمالية في اتساع الإشارة من جراء امتصاص جزيئات الغازات في الغلاف الجوي الموجودة على طول مسير الانتشار؛
- خسارة إجمالية في اتساع الإشارة وزيادة في ضوضاء الخلفية من جراء انتثار جسيمات يتراوح مقاسها ما بين كسور من طول الموجة إلى العديد من أطوال الموجة الموجودة على طول مسير الانتشار؛
- تقلبات في اتساع وطور الإشارة المستقبَلة نتيجة الاضطرابات الجوية الناجمة عن التغيرات الحرارية في الغلاف الجوي.

تُعرض التقنيات والمعادلات التمثيلية المطلوبة لتنفيذ طرائق التنبؤ الضرورية في الأقسام التالية من هذا الملحق.

2 خسائر الامتصاص

ويمكن إجراء حسابات امتصاص الغلاف الجوي باستخدام أسلوب التدرج خطاً فخط على غرار ذلك المقدم في التوصية ITU-R P.676. لكن، نظراً لوجود الآلاف من الخطوط الفردية في النطاق الطيفي من 10 THz إلى 1 000 THz (30 µm إلى 0,3 µm)، فإن هذا الأسلوب كثيف ومرهق حاسوبياً. وتُحدد نوافذ للامتصاص الجوي المنخفض داخل المجتمع الفلكي باستخدام مرشحات معيارية كما هو موضح في الجدول 1. وتوفر الترددات المركزية لهذه المرشحات تقديراً لمناطق الطيف القابلة للاستخدام للاتصالات على طول المسيرات في الاتجاه أرض–فضاء من حيث خصائص الامتصاص للغلاف الجوي فقط. وحيث إن الامتصاص يعتمد جزئياً على درجة الحرارة المحلية والضغط وكيمياء الغلاف الجوي، فإن عرض نطاق المرشحات لا يقابل بالضرورة عرض نطاق المناطق ذات الامتصاص الجوي المنخفض. وتمثل نطاقات التردد الأربعة الأعلى سلسلة متصلة من الطيف المرئي والأشعة فوق البنفسجية مع امتصاص جوي منخفض نسبياً بدلاً من مناطق الامتصاص المنخفضة المتميزة. وينبغي إجراء قياسات الامتصاص الجوي كلما أمكن ذلك قبل نشر أي محطة أرضية.

الجدول 1

المرشحات الفلكية المعيارية للترددات فوق 15 THz

المرشاح	Q	N	M	L′	L	K	H
التردد المركزي (THz)	15	30	63	79	86	136	180
طول الموجة (µm)	20,25	10,1	4,80	3,80	3,50	2,20	1,65
عرض النطاق (THz) (µm)	15,2 6,50	18,2 5,70	15,9 1,20	14,7 0,70	17,3 0,70	30,1 0,48	33,3 0,30

المرشاح	J	I_J	I_S	R	V	B	U
التردد المركزي (THz)	240	330	370	430	560	700	830
طول الموجة (µm)	1,25	0,90	0,80	0,70	0,54	0,43	0,36
عرض النطاق (THz) (µm)	74,7 0,38	90,5 0,24	115,1 0,24	138,1 0,22	93,2 0,09	164,5 0,10	163,6 0,07

3 خسائر الانتشار

يُعرف الانتشار عموماً بالتغير في اتجاه الطاقة بسبب الجسيمات الموجودة على طول مسير الانتشار. وتظهر التأثيرات الأساسية على أنظمة الاتصالات العاملة على ترددات بين 20 THz و350 THZ عندما:

- تكون هناك جسيمات يساوي قطرها الطول الموجي للإشارة المرسلة تقريباً، موجودة على طول مسير الانتشار، وتغير اتجاه الإشارة المرسلة عن مسيرها المقصود؛
- تكون هناك جسيمات يقل قطرها كثيراً عن الطول الموجي للإشارة المرسلة، موجودة في وسط الانتشار، وتغير اتجاه الطاقة الخارجية نحو المستقبل المقصود.

1.3 التوهين في الإشارة المرسلة بسبب انتشار مي

انتشار مي هو المصدر السائد للخسائر عند الترددات دون 375 THz، وينتج بشكل كبير عن جسيمات الماء المجهرية.

وعندما لا تتوفر القياسات المحلية التي تحدد خصائص الغلاف الجوي، يمكن استخدام الطريقة الموصوفة أدناه لحساب التوهين الناجم عن الانتشار على طول المسيرات في الاتجاه أرض–فضاء. وعند توفر القياسات، يمكن استخدام طريقة الحساب التفصيلية، الواردة في الملحق 2.

وتعتبر الطريقة التالية مناسبة للمحطات الأرضية الواقعة على ارتفاعات تتراوح بين 0 و5 km فوق مستوى سطح البحر والتي تعمل على ترددات بين 150 THz و375 THz، وهي الترددات التي ترتبط غالباً بالاتصالات عبر الفضاء الحر. وهذه الطريقة دقيقة في حدود 0,1 dB تقريباً بافتراض زوايا ارتفاع أعلى من 45 درجة. ومع ذلك، قد تؤدي ظروف الغلاف الجوي المحلية إلى تغايرات بعدة وحدات dB.

والمعلمات التالية مطلوبة:

λ: طول الموجة (µm)

h_E: ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح البحر (km)

θ: زاوية الارتفاع (بالدرجات)

الخطوة 1: احسب المعاملات التجريبية المعتمدة على طول الموجة:

$$a = 0.000487\lambda^3 - 0.002237\lambda^2 + 0.003864\lambda - 0.004442 \quad (1أ)$$

$$b = -0.00573\lambda^3 + 0.02639\lambda^2 - 0.04552\lambda + 0.05164 \quad (1ب)$$

$$c = 0.02565\lambda^3 - 0.1191\lambda^2 + 0.20385\lambda - 0.216 \quad (1ج)$$

$$d = -0.0638\lambda^3 + 0.3034\lambda^2 - 0.5083\lambda + 0.425 \quad (1د)$$

الخطوة 2: احسب نسبة الخمود، τ'، من الارتفاع h_E إلى ∞:

$$\tau' = a\, h_E^3 + b\, h_E^2 + c\, h_E + d \quad \text{Np} \quad (2)$$

الخطوة 3: احسب التوهين الجوي الناجم عن الانتشار، A_S، طوال المسير:

$$A_S = \frac{4.3429\lambda'}{\sin(\theta)} \quad \text{dB} \quad (3)$$

2.3 الزيادات في ضوضاء الخلفية نتيجة لانتثار رايلي للطاقة الشمسية

ويكون انتثار رايلي مهملاً في الأنظمة التي تعمل بترددات تقل عن 375 THz. وتتمثل النتيجة الأهم لانتثار رايلي في الأنظمة التي تعمل بترددات تزيد عن 375 THz في إدخال ضوضاء الخلفية إلى أجهزة الاستقبال. وتظهر ضوضاء الخلفية في كلا الاتجاهين أرض–فضاء وفضاء–أرض. ويأتي مصدر الضوضاء الأساسي للمحطات الأرضية العاملة مع المركبات الفضائية من انتثار ضوء الشمس وفق مؤثر رايلي خلال العمليات النهارية. وتصادف المركبات الفضائية الموجهة نحو الأرض أيضاً ضوضاء من أشعة الشمس المنتثرة من سطح الأرض.

4 تأثيرات الاضطرابات الجوية على الأنظمة العاملة بترددات بين 20 THz و375 THz

على غرار ما نُوقش في التوصية ITU-R P.1621، يقاس مقدار الاضطرابات الجوية في صورة مواصفة C_n^2.

ويمكن تصنيف تأثيرات الاضطرابات الجوية كالتالي:

- اتساع التلألؤ الناجم عن إعادة توزيع الطاقة داخل الحزمة؛
- التغييرات الواضحة في زاوية وصول الإشارة الواردة؛
- تنقل الحزمة مما يؤدي إلى انحراف النقطه الوسطى للحزمة بعيداً عن محور الانتشار؛
- انتشار الحزمة الناجم عن الانكسار غير المتكافئ عبر صدر الموجة مما يؤدي إلى انخفاض القدرة في مستوى فتحة هوائي الاستقبال.

1.4 اتساع التلألؤ

تتسبب الاضطرابات الجوية عند ترددات تتراوح بين 150 THz و375 THz في تقلبات غوسية موزعة في الإشعاع اللوغاريتمي، N، لأي موجة واردة، وتسمى بالتلألؤ، عن طريق إعادة توزيع قدرتها مكانياً عبر سطح صدر الموجة بشكل عشوائي في الوقت المناسب.

تُقاس شدة التلألؤ بدلالة التغاير في اتساع الحزمة. والمعلمات التالية مطلوبة لحساب شدة التلألؤ:

h_0: ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح الأرض (m)؛

λ: طول الموجة؛

θ: زاوية الارتفاع؛

Z: الارتفاع الفعلي للاضطرابات الجوية (20 000 m عادةً)؛

ويُتحصل على التلألؤ تقليدياً بدلالة التغاير، σ^2، في الدالة $\ln(N)$ بالمعادلة:

$$\sigma^2_{\ln N} = 2.253 k^{7/6} \sec^{11/6} \varphi \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) h^{5/6} \, \mathrm{d}\, h \qquad \mathrm{Np}^2 \tag{4}$$

حيث:

k: رقم الموجة ($=2\pi/\lambda$)

λ: طول الموجة (m)

φ: زاوية السمت

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m).

ويساوي ذلك ما يلي:

$$\sigma^2_{\ln N} = \frac{1.924 \times 10^8 \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,(h-h_0)^{5/6}\,\mathrm{d}\,h}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6}\theta} \quad \mathrm{Np}^2 \qquad (4ب)$$

حيث طول الموجة، λ، بوحدات µm، والمعلمات الأخرى معطاة على النحو الوارد أعلاه.

إذا رغبت في ذلك، يمكن تحويل هذا بسهولة إلى dBN من التقلب بضرب المعامل في البسط بنسبة تغير الأساس وعامل 10 ينتج عنه:

$$\sigma^2_{\mathrm{dB}N} = \left(\frac{10}{\ln(10)}\right)^2 \sigma^2_{\ln N} = \frac{3.622 \times 10^9 \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,(h-h_0)^{5/6}\,\mathrm{d}\,h}{\lambda^{7/6} \sin^{11/6}\theta} \quad \mathrm{dB}^2 \qquad (4ج)$$

في حالة عدم توفر القياسات المحلية للمواصفة C_n^2، يمكن استخدام مواصفة الدالة $C_n^2(h)$ الواردة في الفقرة 1.1.5 من التوصية ITU-R P.1621.

يقدم الجدول 2 أمثلة لترددات منتقاة في المنطقة الطيفية من 10 THz إلى 1 000 THz (30 إلى 0,3 µm). وتُحسب قيم كل من $\sigma^2_{\mathrm{dB}N}$ و $\sigma^2_{\ln N}$ لكل تردد من الترددات بافتراض مواصفة الاضطرابات الجوية الواردة في الفقرة 1.1.5 من التوصية ITU-R P.1621، وحجم الفتحة أقل من طول التماسك في الغلاف الجوي، r_0، وزاوية ارتفاع قدرها 75 درجة، ويكون هوائي المحطة الأرضية على ارتفاع 5,5 m فوق سطح الأرض ولقيمة جذر متوسط التربيع لسرعة الرياح على طول المسير الرأسي، v_{rms}، تبلغ 21 m/s و30 mls.

الجدول 2

أمثلة لإحصاءات التلألؤ في حالة $C_0 = 1.7\times10^{-14}\ \mathrm{m}^{-2/3}$

$\sigma^2_{\mathrm{dB}N}$	$\sigma^2_{\ln N}$	$\sigma^2_{\mathrm{dB}N}$	$\sigma^2_{\ln N}$	طول الموجة (µm)	التردد (THz)
(v_{rms} = 30 m/s)		(v_{rms} = 21 m/s)			
6,84	0,36	4,35	0,23	0,532	563,9
3,96	0,21	2,52	0,13	0,850	352,9
3,05	0,16	1,94	0,10	1,064	282,0
1,97	0,10	1,25	0,07	1,55	193,5

1.1.4 اتساع التلألؤ على مسيرات في الاتجاه أرض–فضاء

تغاير الإشعاع اللوغاريتمي، على المسيرات في الاتجاه أرض–فضاء، $\sigma^2_{E\text{-}S}$، يظل طفيفاً (4>>). لقد تحققت التجارب من وجود احتمال ضئيل لتجاوز هذا الحد. ويقل $\sigma^2_{\ln N}$ عادة بمستويين من حيث المقدار مع زيادة التردد من 24 THz إلى 750 THz (12,5 µm إلى 0,4 µm).

لا يُؤخذ في الاعتبار بوجه عام توسيط الفتحة في المسيرات في الاتجاه أرض–فضاء. ويعاني صدر الموجة الخارجة من الغلاف الجوي من نفس إعادة التوزيع المكاني للطاقة عبر سطحها كما يحدث في الاتجاه فضاء–أرض. ومع ذلك، فإن انكسار صدر الموجة، أثناء انتشارها عبر الفضاء، ينشر اضطرابات فردية في الاتساع والطور عبر مناطق واسعة. وبالتالي فإن نصف قطر تماسك الطور عند فتحة الاستقبال على أي مركبة فضائية يكون أكبر بكثير من الحجم المحتمل لفتحة مستقبل المركبة الفضائية (أقل من 1 m). لذلك لا يحدث توسيط للفتحة ويُتحصل على التلألؤ الذي يظهر عند المستقبل من خلال المعادلة:

$$\sigma^2_{E-s} = \sigma^2_{\ln N} \quad \text{Np}^2 \tag{5}$$

بالنسبة للتشغيل على التردد 150 THz (2,0 µm)، وعندما يكون $\sigma^2_{\ln N}$ مساوياً 0,15 و4 dB تقريباً، يحدث خبو لمدة 1% من الوقت تقريباً بتردد ومدة تساويان 150 Hz و10^{-5} s تقريباً.

2.1.4 اتساع التلألؤ على مسيرات في الاتجاه فضاء–أرض

يمكن أن يكون تأثير التلألؤ على المسيرات في الاتجاه فضاء–أرض كبيراً بما يكفي للتقييد بشدة من أداء المستقبلات. فإذا كان للمستقبل فتحة محدودة أكبر من طول التماسك في الغلاف الجوي، r_0، يتم حساب متوسط تأثير التلألؤ مكانياً عبر الفتحة مما يؤدي إلى انخفاض $\sigma^2_{\ln N}$. وفي حين أن توسيط الفتحة يمكن أن يخفف من تأثيرات اتساع التلألؤ، فإن الطور التالف يمكن أن يؤدي إلى تدهور كبير في أداء أنظمة المستقبل البصرية ذات الأسلوب المكاني الوحيد مثل الاكتشاف المتماسك أو الاكتشاف المباشر المضخم مسبقاً.

وتُعدل قيمة $\sigma^2_{\ln N}$ على المسيرات في الاتجاه فضاء–أرض، بواسطة عامل توسيط الفتحة، A. ويُعرَّف عامل توسيط الفتحة على أنه نسبة التغاير في الإشعاع اللوغاريتمي المتحصل عليه من فتحة تجميع ذات حجم محدود إلى ما يقابلها من الكمية التي يُتحصل عليها من الفتحة النقطية وتحسب من خلال:

الخطوة 1: احسب ارتفاع مقياس الاضطرابات الجوية، z_0، بالمعادلة:

$$z_0 = \left[\frac{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) h^2 \, \mathrm{d}\, h}{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h) h^{5/6} \, \mathrm{d}\, h} \right]^{6/7} \quad \text{m} \tag{6}$$

حيث:

h_0: ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح الأرض (m)

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m)

Z: الارتفاع الفعلي للاضطرابات الجوية فوق مستوى سطح الأرض (20 000 m عادةً)

الخطوة 2: احسب معامل توسيط الفتحة، A، بالمعادلة:

$$A = \frac{1}{1 + 1.1 \times 10^7 \left(\frac{D^2 \sin\theta}{z_0 \lambda} \right)^{7/6}} \tag{7}$$

حيث:

D: قطر فتحة المحطة الأرضية (m)

θ: زاوية الارتفاع

λ: طول الموجة (µm).

الخطوة 3: احسب تغاير الإشعاع اللوغاريتمي على مسير في الاتجاه فضاء–أرض، $\sigma^2_{s\text{-}E}$، بالمعادلة:

$$\sigma^2_{s\text{-}E} = A\sigma^2_{\ln N} \quad \text{Np}^2 \tag{8}$$

2.4 زاوية الوصول

تعود التقلبات التي تسببها الاضطرابات الجوية في زاوية الوصول الظاهرية للحزمة المستقبلة إلى التغايرات في مؤشرات الانكسار للجيوب الهوائية على طول مسير الانتشار. ويعد تأثير هذه التقلبات في الاتجاه أرض–فضاء مهملاً. والقيمة النمطية لجذر متوسط التربيع لتغايرات زاوية الوصول تكون في حدود 1 μrad، وبالتالي يكون لها تأثير ضئيل. بيد أنه في الاتجاه فضاء–أرض، تكون قيمة جذر متوسط التربيع للتقلبات في نطاق أكثر من عدة μrad ويجب أخذها في الاعتبار.

ويمكن استخدام الطريقة الموصوفة أدناه لحساب التغاير في زاوية الوصول، σ^2_β، على المسيرات في الاتجاه فضاء–أرض من خلال مواصفة اضطرابات جوية معينة، C_n^2، لزوايا ارتفاع أكبر من 45 درجة. والمعلمات التالية مطلوبة:

h_0: ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح الأرض (m)

θ: زاوية الارتفاع

D_R: قطر فتحة المستقبل (m)

Z: الارتفاع الفعلي للاضطرابات الجوية (20 000 m عادةً)

الخطوة 1: يُتحصل على مواصفة الاضطرابات الجوية الرأسية للغلاف الجوي. وإذا تعذر الحصول على هذه الإحصائية طويلة الأجل من مصادر بيانات محلية، يمكن الحصول على تقدير من الفقرة 1.1.5 من التوصية ITU-R P.1621.

الخطوة 2: احسب مواصفة الاضطرابات الجوية المتكاملة، ζ، من المعادلة:

$$\zeta = \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\mathrm{d}\,h \quad \text{m}^{1/3} \tag{9}$$

حيث h الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m).

في حالة عدم توفر القياسات المحلية للمواصفة المتكاملة، C_n^2، فإن التقريب التجريبي الوارد في المعادلات من (9) إلى (12) من التوصية ITU-R P.1621 يوفر نتائج مرضية لمعظم التطبيقات.

الخطوة 3: احسب التغاير في زاوية الوصول، σ^2_β، من المعادلة:

$$\sigma^2_\beta = \frac{2.914\,\zeta\,D_R^{-1/3}}{\sin\theta} \quad \text{rad}^2 \tag{10}$$

على طول المسيرات في الاتجاه فضاء–أرض، فإن تباعد الحزمة ومسافة الانتشار الطويلة عبر الفضاء الحر سيجعل صدر الموجة أكبر بكثير من r_0 بحلول الوقت الذي تصل فيه إلى اضطرابات جوية. لذلك، يتم توسيط تأثيرات الغلاف الجوي عبر عرض الحزمة. ويشير مصطلح مقاس الهوائي في المعادلة (11) إلى جزء الحزمة المرئي من المحطة الأرضية.

3.4 تنقل الحزمة

تنقل الحزمة هو إزاحة الحزمة من اتجاه الانتشار المقصود. وتنقل الحزمة مهم في الاتجاه أرض–فضاء ويمكن أن يكون في حدود عرض الحزمة. وعلى مسافة L، فإن قيمة جذر متوسط التربيع لإزاحة الحزمة المتنقلة، r_c، يُعطى بالمعادلة:

$$\sigma_{rc} = 2\,080 \cdot L \sqrt{\frac{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\mathrm{d}\,h}{D_T^{1/3}\sin(\theta)}} \quad \text{m} \tag{11أ}$$

حيث:

L: مسافة الانتشار من المحطة الأرضية إلى الساتل (km)

D_T: قطر فتحة الإرسال (m)

h_0: ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح الأرض (m)

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m)

Z: الارتفاع الفعلي للاضطرابات الجوية (20 000 m عادةً)

ويمكن حساب قيمة جذر متوسط التربيع فلإزاحة الزاوية، ω_c، للحزمة المتنقلة بحذف طول مسير الانتشار من المعادلة:

$$\sigma_{\omega c} = \frac{\sigma_{rc}}{L \times 10^3} = 2.08 \sqrt{\frac{\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\mathrm{d}\,h}{D_T^{1/3}\sin(\theta)}} \quad \text{rad} \tag{11ب}$$

في حالة عدم توفر القياسات المحلية للمواصفة C_n^2 المتكاملة، فإن التقريب التجريبي الوارد في المعادلات من (9) إلى (12) من التوصية ITU-R P.1621 يوفر نتائج مرضية لمعظم التطبيقات.

ويمكن التخفيف من تأثير تنقل الحزمة في الاتجاه أرض–فضاء من خلال استخدام حزم متعددة أو جهاز إرسال يتم التحكم فيه بجهاز تتبع. وتنقل الحزمة ليس مشكلة كبيرة في الاتجاه فضاء–أرض. وتنتشر الحزم التي تتحرك في هذا الاتجاه فقط من خلال الاضطرابات الجوية في آخر 10 إلى 20 km من المسير.

4.4 تمديد الحزمة

تمديد الحزمة هو الزيادة في قطر الحزمة، بما يتجاوز الزيادة التي تحدث بالفعل بسبب التباعد، نتيجة للانتشار من خلال الاضطرابات الجوية في الغلاف الجوي. يؤدي تمديد الحزمة إلى انخفاض مستوى القدرة الذي يصل إلى المستقبل بسبب تمديد الطاقة المرسلة على مساحة أكبر. ومع ذلك، فإن مقدار التمديد الناجم عن الغلاف الجوي يكون عادةً صغيراً جداً فيما يتعلق بالتباعد ولا يفسر كخسارة ملحوظة للإشارة سواء في الاتجاه أرض–فضاء أو الاتجاه فضاء–أرض.

الملحق 2

الحساب المفصل للتوهين الناجم عن انتثاري رايلي ومي

إذا توفرت القياسات المحلية التي تحدد خصائص الغلاف الجوي، يمكن استخدام الطريقة الموصوفة أدناه لحساب التوهين على طول المسيرات في الاتجاه أرض–فضاء. والمعلمات المطلوبة لهذا النموذج هي:

λ:طول الموجة (μm)

h_E:ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح البحر (km)

θ: زاوية الارتفاع

الخطوة 1: احسب معامل انتثار رايلي، β_R، على ارتفاعات بخطوات قيمة كل منها 1 km من ارتفاع المحطة الأرضية إلى 30 km فوق مستوى سطح البحر بالمعادلة:

$$\beta_R(h) = \sigma_R n_R(h) \times 10^3 \qquad \text{km}^{-1} \tag{12}$$

حيث:

σ_R: المقطع العرضي لانتثار رايلي (m^2)

$n_R(h)$: كثافة رقم الغلاف الجوي (m^{-3})

فوق 30 km، تكون تأثيرات انتثار رايلي مهملة. وفي حالة عدم توفر قيم مُقاسة للمقطع σ_R، تُستخدم قيم الغلاف الجوي المرجعي القياسي الواردة في الجدول 3. وفي حالة عدم توفر قيم مُقاسة للرقم n_R، تُستخدم قيم الغلاف الجوي المرجعي القياسي الواردة في الجدول 4.

الخطوة 2: احسب معامل انتثار مي (أي الهباء الجوي)، β_A، على ارتفاعات بخطوات قيمة كل منها 1 km من ارتفاع المحطة الأرضية إلى 30 km فوق مستوى سطح البحر بالمعادلة:

$$\beta_A(h) = \frac{\beta_A(0)\, n_A(h)}{n_A(0)} \qquad \text{km}^{-1} \tag{13}$$

حيث:

$\beta_A(0)$: معامل انتثار الهباء الجوي عند مستوى سطح البحر (km^{-1})

$n_A(h)$: كثافة رقم الهباء الجوي على ارتفاع h km فوق مستوى سطح البحر (m^{-3})

في حالة عدم توفر قياسات عند مستوى سطح البحر للمعامل β_A، تُستخدم قيم الغلاف الجوي المرجعي القياسي الواردة في الجدول 3. وفي حالة عدم توفر قيم مُقاسة للرقم n_A، تُستخدم قيم الغلاف الجوي المرجعي القياسي الواردة في الجدول 4.

الجدول 3

المقاطع العرضية لانتثار رايلي، σ_R، ومعامل انتثار مي عند مستوى سطح البحر، $\beta_A(0)$، لأطوال موجة متعددة

طول الموجة (µm)	σ_R [1] (m^2)	$\beta_A(0)$ [2] (km^{-1})
0,50	$6,735 \times 10^{-31}$	0,167
0,55	$4,563 \times 10^{-31}$	0,158
0,60	$3,202 \times 10^{-31}$	0,150
0,65	$2,313 \times 10^{-31}$	0,142
0,70	$1,713 \times 10^{-31}$	0,135
0,80	$9,989 \times 10^{-32}$	0,127
0,90	$6,212 \times 10^{-32}$	0,120

طول الموجة (µm)	σ_R [1] (m^2)	$\beta_A(0)$ [2] (km^{-1})
1,06	$3,320 \times 10^{-32}$	0,113
1,26	$1,600 \times 10^{-32}$	0,108
1,67	$5,210 \times 10^{-33}$	0,098
2,17	$1,800 \times 10^{-33}$	0,085
3,50	$2,681 \times 10^{-34}$	0,070
4,00	$1,571 \times 10^{-34}$	0,063

[1] يمكن إجراء استكمال داخلي لقيم σ_R، لأطوال الموجة غير المدرجة بالجدول بافتراض علاقة خطية طويلة.

[2] يمكن إجراء استكمال داخلي لقيم $\beta_A(0)$، لأطوال الموجة غير المدرجة بالجدول بافتراض علاقة بقانون الأسس.

الجدول 4

قيم كثافة رقم الهباء الجوي، n_A، وقيم كثافة رقم الغلاف الجوي، n_R، لعدة ارتفاعات فوق مستوى سطح البحر

الارتفاع (km)	n_A (m^{-3})	n_R (m^{-3})
0	$2,0 \times 10^8$	$2,548 \times 10^{25}$
1	$8,7 \times 10^7$	$2,312 \times 10^{25}$
2	$3,8 \times 10^7$	$2,093 \times 10^{25}$
3	$1,6 \times 10^7$	$1,891 \times 10^{25}$
4	$7,2 \times 10^6$	$1,704 \times 10^{25}$
5	$3,1 \times 10^6$	$1,532 \times 10^{25}$
6	$1,3 \times 10^6$	$1,373 \times 10^{25}$
7	$4,0 \times 10^5$	$1,227 \times 10^{25}$
8	$1,4 \times 10^5$	$1,093 \times 10^{25}$
9	$5,0 \times 10^4$	$9,713 \times 10^{24}$
10	$2,6 \times 10^4$	$8,599 \times 10^{24}$
11	$2,3 \times 10^4$	$7,586 \times 10^{24}$
12	$2,1 \times 10^4$	$6,487 \times 10^{24}$
13	$2,3 \times 10^4$	$5,544 \times 10^{24}$
14	$2,5 \times 10^4$	$4,739 \times 10^{24}$
15	$4,1 \times 10^4$	$4,050 \times 10^{24}$

الارتفاع (km)	n_A (m^{-3})	n_R (m^{-3})
16	$6,7 \times 10^4$	$3,462 \times 10^{24}$
17	$7,3 \times 10^4$	$2,959 \times 10^{24}$
18	$8,0 \times 10^4$	$2,530 \times 10^{24}$
19	$9,0 \times 10^4$	$2,163 \times 10^{24}$
20	$8,6 \times 10^4$	$1,849 \times 10^{24}$
21	$8,2 \times 10^4$	$1,574 \times 10^{24}$
22	$8,0 \times 10^4$	$1,341 \times 10^{24}$
23	$7,6 \times 10^4$	$1,144 \times 10^{24}$
24	$5,2 \times 10^4$	$9,760 \times 10^{23}$
25	$3,6 \times 10^4$	$8,335 \times 10^{23}$
26	$2,5 \times 10^4$	$7,123 \times 10^{23}$
27	$2,4 \times 10^4$	$6,092 \times 10^{23}$
28	$2,2 \times 10^4$	$5,214 \times 10^{23}$
29	$2,0 \times 10^4$	$4,466 \times 10^{23}$
30	$1,9 \times 10^4$	$3,848 \times 10^{23}$

الملاحظة 1 – يمكن إجراء الاستكمال الداخلي خطياً لقيم n_A وn_R للارتفاعات غير المدرجة بالجدول.

الخطوة 3: احسب معامل الخمود نتيجة للانتثار، β_T، عند كل ارتفاع من ارتفاع المحطة الأرضية إلى 30 km فوق مستوى سطح البحر بالمعادلة:

$$\beta_T(h) = \beta_R(h) + \beta_A(h) \quad \text{km}^{-1} \tag{14}$$

الخطوة 4: احسب نسبة الخمود نتيجة للانتثار، τ'_T ، من ارتفاع المحطة الأرضية إلى 30 km فوق مستوى سطح البحر بالمعادلة:

$$\tau'_T = \sum_{h=h_0}^{30} \overline{\beta_T}(h)\, \Delta h \tag{15}$$

حيث:

h_E: ارتفاع المحطة الأرضية فوق مستوى سطح البحر (km)

$\overline{\beta_T}(h)$: القيمة المتوسطة لكل من $\beta_T(h)$ و$\beta_T(h-1)$ (km^{-1})

Δh: المسافة بين h و$h\text{-}1$ (km)

الخطوة 5: احسب التوهين الإجمالي الناجم عن الانتثار، A_S، على طول المسير في الاتجاه أرض–فضاء بالمعادلة:

$$A_S = 10 \log_{10}\left(e^{\tau'_T / \sin\theta}\right) \approx \frac{4.3429}{\sin\theta}\, \tau'_T \quad \text{dB} \tag{16}$$