التوصية ITU-R P.1621-1

بيانات الانتشار المطلوبة لتصميم الأنظمة باتجاه أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz

(المسألة ITU-R 228/3)

(2005-2003)

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن الطيف البصري بين 20 THz و375 THz متاح للاتصالات في بيئات قرب الأرض وبيئات الفضاء السحيق؛

ب) أن من الضروري الحصول على بيانات انتشار مناسبة للتخطيط الجيد لأنظمة أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz؛

ج) أنه تم تطوير أساليب تسمح بحساب أكثر معلمات الانتشار أهمية المطلوبة في تخطيط أنظمة أرض–فضاء العاملة بين 20 THz و375 THz؛

د) أنه تم، قدر المستطاع، اختبار هذه الأساليب مقارنة 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

أ) 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

1 باعتماد أساليب التنبؤ بمعلمات الانتشار الواردة في الملحق 1 للتخطيط لأنظمة أرض–فضاء، في مدى صلاحيتها الخاص المحدد في الملحق.

الملاحظة 1 – ترد في التوصية ITU-R P.1622 معلومات إضافية تتعلق بأساليب التنبؤ بالانتشار للترددات بين 20 THz و375 THz.

الملحق 1

1 الاعتبارات الجوية

يتأثر أداء نظام عامل في المدى الترددي بين 20 THz و375 THz بين الأرض والمركبات الفضائية التي تدور حولها، بالغلاف الجوي للأرض. وتشمل هذه التأثيرات الجوية ما يلي:

- امتصاص جزيئات الغازات في الغلاف الجوي الموجودة على طول مسير الانتشار مما يؤدي إلى خسارة إجمالية في اتساع الإشارة؛
- انتثار جسيمات يتراوح مقاسها ما بين كسور من طول الموجة للعديد من أطوال الموجة الموجودة على طول مسير الانتشار مما يؤدي إلى خسارة ظاهرية في اتساع الإشارة؛

- انكسار الحزمة بسبب التغيرات في كثافة الغلاف الجوي على طول مسير الانتشار مما يؤدي إلى تحرك ظاهري في موضع مصدر الإرسال؛
- الاضطراب بسبب التغيرات الحرارية في الغلاف الجوي مما يؤدي إلى تقلبات في اتساع وطور الإشارة المستقبَلة.

ويكتفي هذا الملحق بتناول آثار التروبوسفير على الإشارة المطلوبة. وقد اختُبرت أساليب التنبؤ الواردة في هذا الملحق قدر الإمكان مقابل القياسات على الوصلات للأرض– الفضاء الطلق والأنظمة الفلكية. وتقدم هذه الأساليب نتائج مناسبة لتخطيط النظام الأساسي. ولكن نظراً إلى التقلب المكاني والزماني للغلاف الجوي، تقتضي الضرورة استطلاع خصائص الانتشار للمواقع المحلية قبل نشر أي نظام أرضي عامل ما بين 20 THz و375 THz.

2 الامتصاص

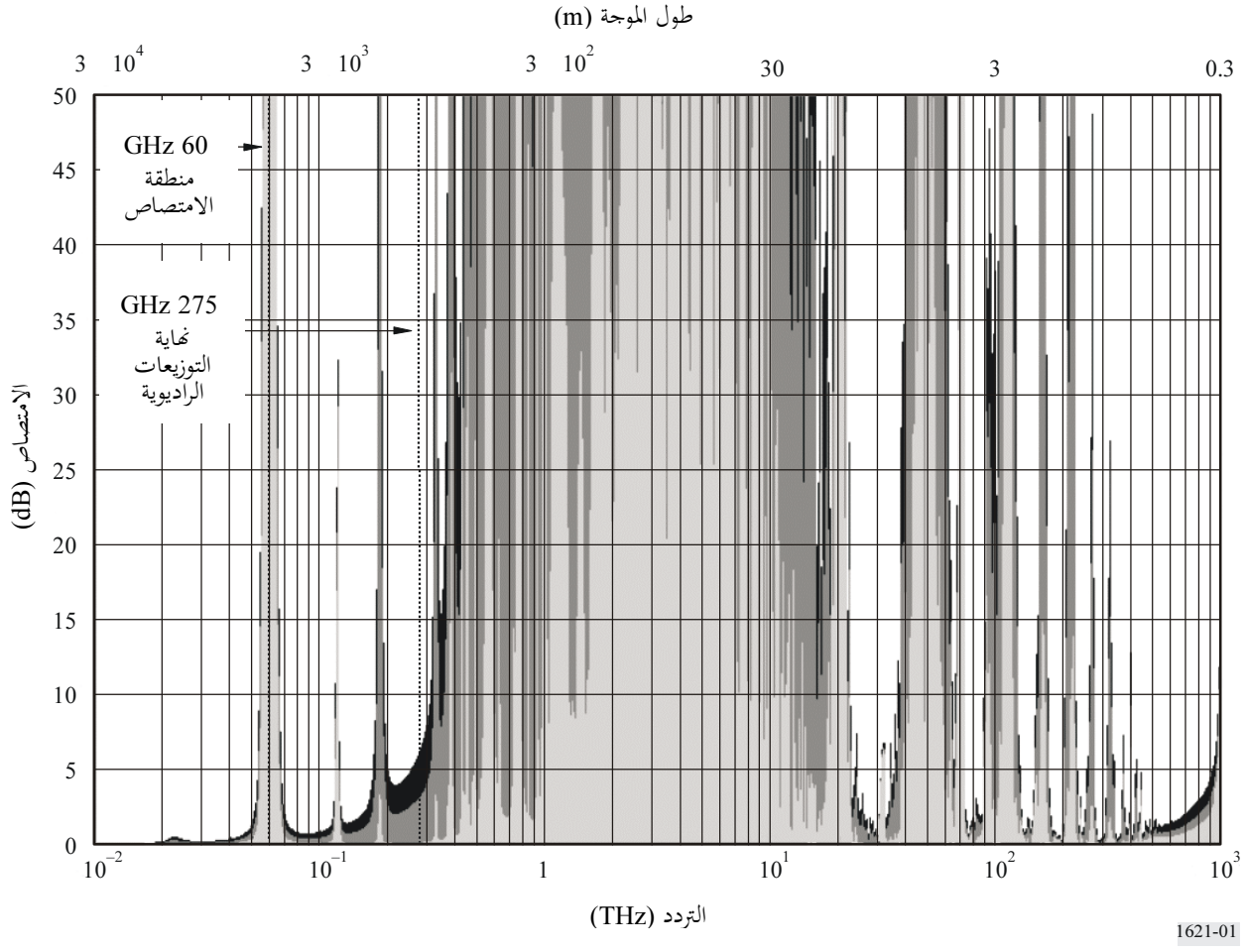
يوضح الشكل 1 اعتماد التردد على امتصاص الغلاف الجوي عبر ثلاثة مسيرات سمتية. وتبين المنطقة المظللة باللون الرمادي الفاتح الامتصاص المنخفض نسبياً المرتبط مع موقع يقع على بعد 5 km فوق مستوى سطح البحر في منطقة منخفضة الرطوبة. وتبين المنطقة الرمادية الداكنة الامتصاص الإضافي للغلاف الجوي الذي يمكن أن يحدث في موقع يقع على بعد 2 km فوق مستوى سطح البحر. وتظهر المناطق السوداء تأثيراً آخراً لامتصاص الغلاف الجوي في موقع يقع في مستوى سطح البحر ويرسل من خلال غلاف جوي معياري على النحو المنصوص عليه في التوصية ITU-R P.835. ويبين الشكل بوضوح أن الغلاف الجوي كتيم ضد عبور الطاقة الكهرمغنطيسية في جميع الترددات تقريباً بين نحو 1 THz و10 THz (300 µm و30 µm)، إلا في بعض المواقع الجافة عالية الارتفاع. وفوق التردد 10 THz تصبح الخصائص الامتصاصية للجو تارة أخرى مواتية لانتشار الطاقة الكهرمغنطيسية بين سطح الأرض والفضاء.

وتظهر في الشكل 2 بالتفصيل الخصائص الامتصاصية للمنطقة الطيفية فوق 10 THz (دون 30 µm)، لنفس المسيرات السمتية الثلاثة المميزة بسلسلة من مناطق الامتصاص المنخفض والمفصولة بمناطق عالية الامتصاص قوية ولكن ضيقة. أما فرادى المناطق منخفضة الامتصاص فهي محدودة بهيكل دقيق يضم العديد من خطوط الامتصاص الضعيف. وتحدث فرادى خطوط الامتصاص بسبب وجود مكونات الغازية في الغلاف الجوي بما فيها على سبيل المثال لا الحصر: NH_3، وCO_2، وCO، وCH_4، وNO_2، وNO، وO_2، وO_3، وSO_2، وH_2O، ومختلف مركبات الكربون الكلورية الفلورية. وتعتمد قوة خطوط الامتصاص على الحرارة والضغط.

ويمكن إجراء حسابات امتصاص الغلاف الجوي باستخدام أسلوب التدرج خطاً فخط على غرار ما جاء في الملحق 1 بالتوصية 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 مكثف حسابياً.

الشكل 1

امتصاص الغلاف الجوي على طول مسير عمودي



3 الانتشار

يؤدي انتشار الغلاف الجوي إلى انخفاض ظاهري في قوة الإشارة في جهاز الاستقبال بسبب إعادة توجيه الطاقة المرسَلة بعيداً عن مسير الانتشار المقصود. وتعتمد خصائص انتشار الغلاف الجوي على قطر الجسيمات المنتشرة الموجودة على طول مسير الانتشار.

وتتخذ خصائص الانتشار ثلاثة أشكال:

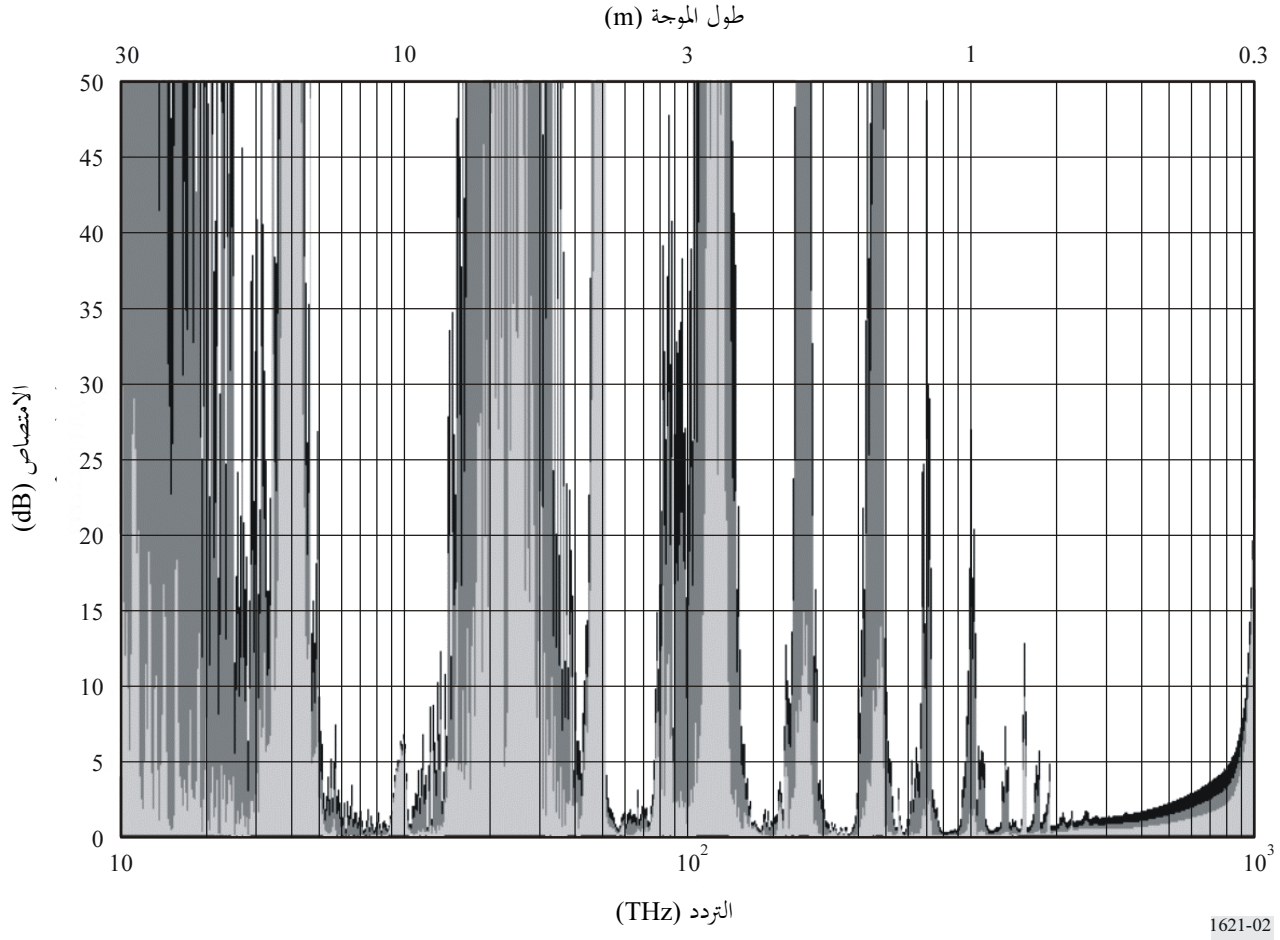
- رايلي (Rayleigh)
- مي (Mie)
- المستقل عن طول الموجة.

1.3 انتشار رايلي

يبدي الغلاف الجوي خصائص انتشار رايلي عندما يقل طول القطر الفيزيائي للجسيمات المنتشرة على طول مسير الانتشار كثيراً عن طول موجة من الموجات الكهرمغنطيسية. وفي ترددات فوق 20 THz (بطول موجة يقل عن 15 µm)، يحدث انتشار رايلي بسبب التفاعلات بين الموجات الكهرمغنطيسية والجزيئات القطبية لغازات الغلاف الجوي.

الشكل 2

الامتصاص فوق 10 THz (أدنى من 30 m) لغلاف جوي معياري على طول مسير عمودي



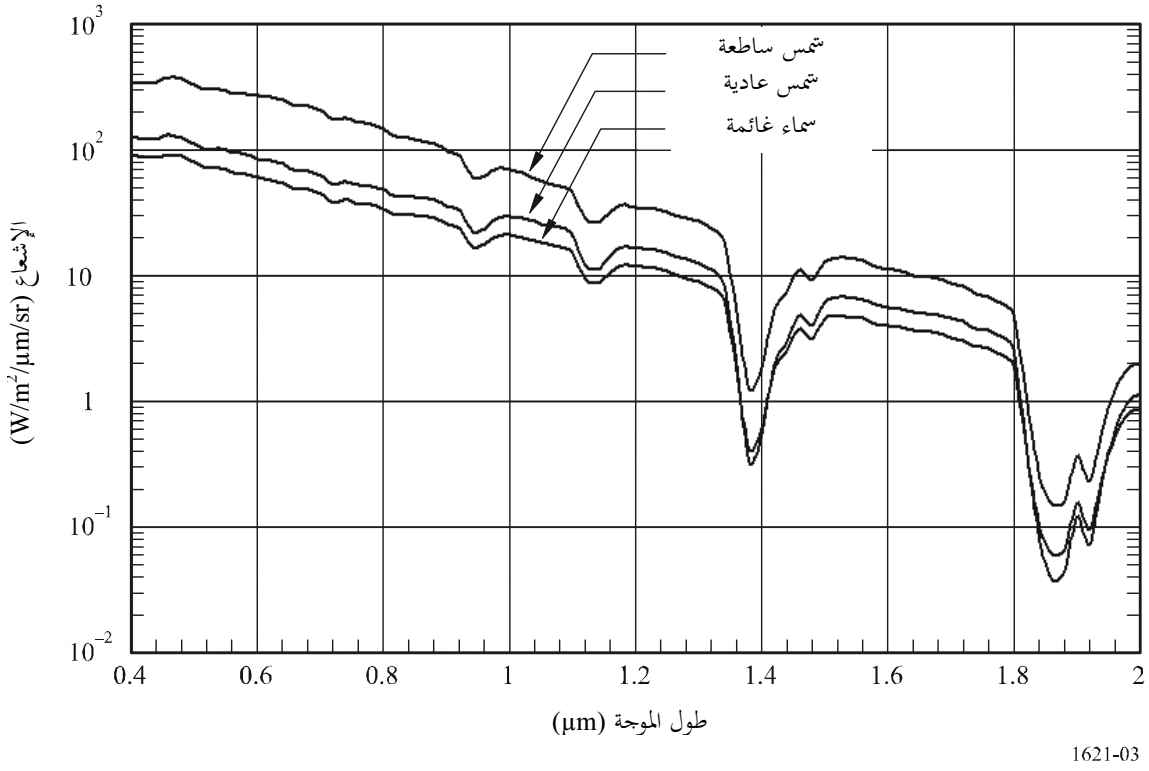
ويكون مقدار ما يعزى إلى انتشار رايلي من الخسارة الظاهرية في الإشارة مهملاً في ترددات تقل عن 375 THz (بطول موجة أكبر من 0,8 µm). بيد أن جسامة انتشار رايلي تعتمد على طول الموجة بواقع λ^{-4}. وبالاقتراب من 1 000 THz (0,3 µm)، يصبح تأثير انتشار رايلي على الإشارة المرسلة مشابهاً لانتشار مي (Mie).

وتتمثل النتيجة الأهم لانتشار رايلي في إدخال ضوضاء الخلفية إلى أجهزة الاستقبال. وتظهر ضوضاء الخلفية على طول المسيرات في كلا الاتجاهين أرض–فضاء وفضاء–أرض. ويأتي مصدر الضوضاء الأساسي للمحطات الأرضية العاملة مع المركبات الفضائية من انتشار ضوء الشمس وفق مؤثر رايلي خلال العمليات النهارية. وتصادف المركبات الفضائية الموجهة نحو الأرض أيضاً ضوضاء من أشعة الشمس المنعكسة من سطح الأرض، رغم أن تلك ليست عائدة لمؤثر رايلي.

ويقدم الشكل 3 إشعاع H ، السماء في عدة ظروف، كل منها بوحدة $W/m^2/\mu m/sr$. وتبسيطاً، يقدم الجدول 1 قيم H المعينة للترددات الأساسية التي تهم الاتصالات القائمة في الفضاء فوق التردد 20 THz. ومن القيم المعقولة للإشعاع H خلال العمليات الليلية، ~ 1×10^{-9} $W/m^2/\mu m/sr$ ~ لمعظم الترددات التي تسترعي الاهتمام.

الشكل 3

إشعاع السماء في ظروف شمسية متنوعة



الجدول 1

إشعاع، H (W/m2/µm/sr)، السماء والأرض في عدة ترددات

التردد (THz)	طول الموجة (µm)	خلفية السماء		
		شمس ساطعة	شمس عادية	ملبدة بالغيوم
566,0	0,530	303,4	101,6	71,75
352,9	0,850	122,3	42,58	30,3
310,9	0,965	64,62	25,12	18,63
283,0	1,06	54,45	25,32	17,99
200,0	1,50	13,01	6,00	4,44

بتجاهل المؤثرات الجوية، تعطى قدرة ضوضاء الخلفية، P_{back}، الواردة إلى جهاز الاستقبال بما يلي:

$$P_{back} = \frac{\pi \theta_r^2 \, A_r \, \Delta\lambda H}{4} \quad \text{W} \tag{1}$$

حيث:

θ_r: مجال الرؤية لجهاز الاستقبال (rad)

A_r: مساحة الاستقبال (m^2)

$\Delta\lambda$: عرض نطاق جهاز الاستقبال (µm)

H: الإشعاع ($W/m^2/\mu m/sr$).

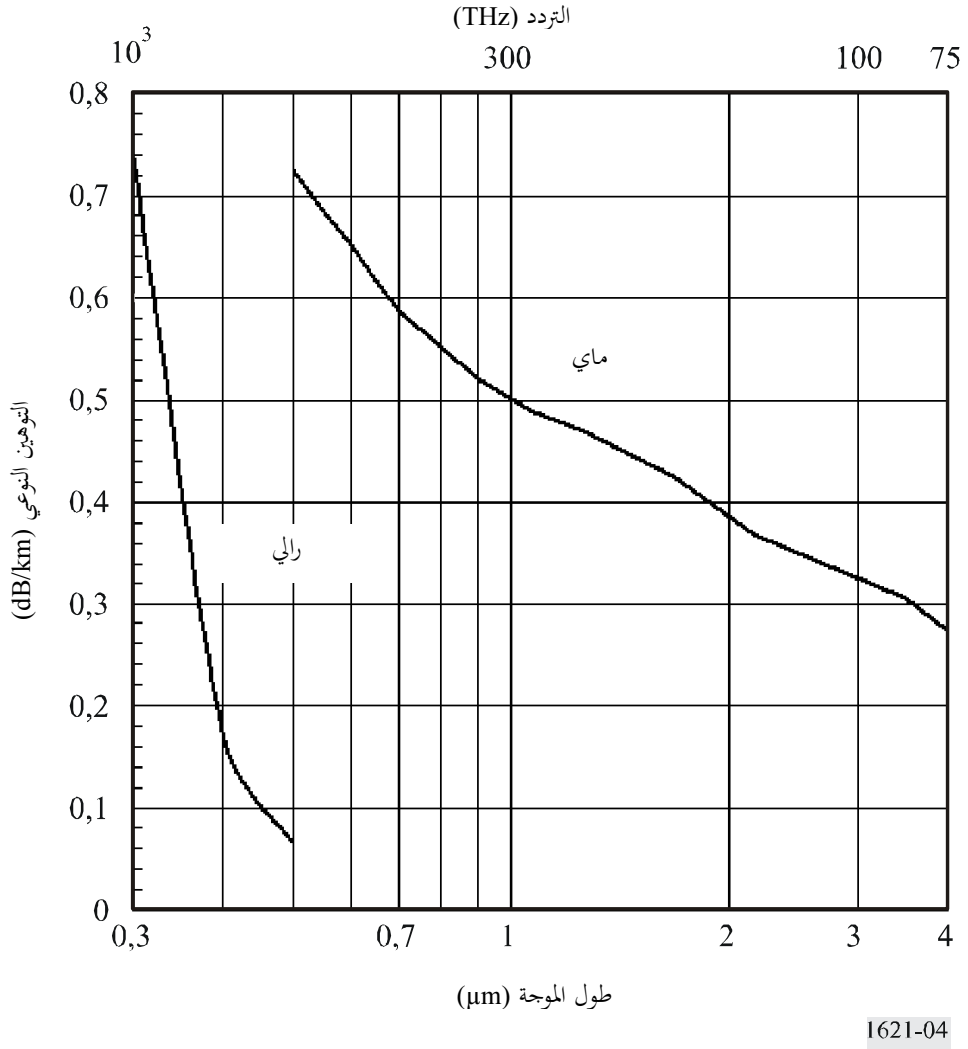
وبمعزل عن ضوضاء الخلفية بسبب تناثر رايلي، قد تظهر أيضاً مصادر أخرى لضوضاء الخلفية. وتشمل هذه المصادر، على سبيل الذكر لا الحصر، الكواكب والنجوم الساطعة والانعكاسات عن الكائنات الطبيعية أو الاصطناعية. وخلال فترات المطر الغزير، لا تُعتبر الأنظمة العاملة بين 20 THz و375 THz قابلة للتشغيل. وبالتالي، لا يعتبر البرق مصدر ضوضاء على طول مسيرات أرض–فضاء. وحسب توجه وحركة مسير الانتشار وكذلك مصادر ضوضاء الخلفية، يمكن أن يبلغ تفاوت جسامة ومدة أحداث الضوضاء أضعافاً مضاعفة.

2.3 انتشار مي (Mie)

يبدي الغلاف الجوي خصائص انتشار مي عندما يتساوى تقريباً طول القطر الفيزيائي للجسيمات المنتشرة على طول مسير الانتشار مع طول الموجة الكهرمغنطيسية. وانتشار مي هو دالة معقدة لمقاس الجسيمات وشكلها وعددها على طول مسير الانتشار. أما توزيع مقاسات الجسيمات وأشكالها على طول مسير الانتشار فهو دالة للبيانات الوصفية لمسير محتوى بخار الماء وسرعة الرياح على السواء. ويشكل الهباء الجوي والجسيمات المائية المجهرية المكونات السائدة في انتشار مي على الترددات بين 20 THz وحوالي 375 THz (15 µm و0,8 µm). وفي هذا المدى الترددي، يفوق تأثير انتشار مي كثيراً انتشار رايلي. ومن باب المقارنة، يظهر الشكل 4 التوهين النوعي لانتشار رايلي ومي في غلاف جوي معياري عند مستوى سطح البحر.

الشكل 4

التوهين النوعي لغلاف جوي معياري عند مستوى سطح البحر



3.3 الانتشار المستقل عن طول الموجة

يبدي الغلاف الجوي خصائص الانتشار المستقل عن طول الموجة عندما يزيد طول القطر الفيزيائي للجسيمات المنتشرة على طول مسير الانتشار كثيراً عن طول الموجة الكهرمغنطيسية. ويرد الوصف الأدق للانتشار المستقل عن طول الموجة من نظرية الانعراج.

والجسيمات التي تصادَف في معظم الأحيان على مسيرات أرض–فضاء هي حُلالات مائية وظواهر جوية مائية. ومؤثرات الانتشار المستقل عن طول الموجة هي مؤثرات ذات شأن. فبالغيوم أو الضباب أو المطر أو الثلج، يمكن أن يُمنع فعلياً انتشار الإشعاع الكهرمغنطيسي فوق 20 THz (دون 15 µm).

4 الانكسار

يحدث الانكسار في الغلاف الجوي عندما تنتشر الطاقة الكهرمغنطيسية من خلال وسائط ذات كثافة متفاوتة. ويتمثل ما يؤثر على نظام عامل بين 20 THz و375 THz على طول مسير أرض–فضاء في انزياح زاوي في اتجاه مسير الانتشار. الانكسار هو دالة لطول الموجة وزاوية الارتفاع وكذلك الحرارة والضغط على طول مسير الانتشار.

1.4 صيغة مؤشر الانكسار الفعال في الغلاف الجوي

يقرَّب مؤشر الانكسار الفعال في الغلاف الجوي، n_{eff}، للترددات فوق 150 THz (أطوال الموجة < 2 µm) في درجة حرارة T = 15 °C وضغط P = 1 013.25 hPa ولطول الموجة في الخواء، λ_{vac}، بما يلي:

$$n_{eff} = 1 + 10^{-8}\left(6\,432{,}8 + \frac{2\,949\,810}{146 - \lambda_{vac}^{-2}} + \frac{25\,540}{41 - \lambda_{vac}^{-2}}\right) \tag{2}$$

حيث:

λvac: طول الموجة (µm).

ويمكن تعديل مؤشر الانكسار الفعال في الغلاف الجوي لدرجات حرارة وضغوط أخرى باستخدام الصيغة التالية:

$$n_{eff}(T,P) = 1 + (n_{eff} - 1)\frac{1{,}162P(1 + P(0{,}7868 - 0{,}0113T)10^{-6})}{760{,}4696(1 + 0{,}0366T)} \tag{3}$$

حيث:

T: الحرارة (ºC)

P: الضغط الجوي (hPa).

ولا يؤثر بخار الماء سوى تأثير طفيف جداً (أقل من 1%) على مؤشر الانكسار في الغلاف الجوي في مدى الترددات المذكور أعلاه.

ويختلف مؤشر الانكسار الفعال في الغلاف الجوي، n_{eff}، عن مؤشر الانكسار الفعلي في الغلاف الجوي، n، بأخذ البيانات الوصفية للمسير العمودي في الحسبان. فتتيح قيمة n_{eff} إجراء حسابات التغير الظاهري في زاوية الارتفاع باستخدام قانون سنيل (Snell) كما يرد في الصيغة (4). واستخدام المؤشر n_{eff} مرضٍ، لأن قيم n الموجودة على طول مسير الانتشار، تتقلب بسرعة في الواقع العملي. ويجب أن تُضبط أنظمة التحصيل والتتبع تلقائياً في الوقت الفعلي لتواكب هذه التقلبات. ولذلك، لا تتطلب أنظمة التشغيل ما بين 150 THz و375 THz سوى تقريب التحصيل الأولي.

2.4 التغير الظاهري في زاوية الارتفاع

يسبب الانكسار اختلاف زاوية الارتفاع الظاهرة لمركبة فضائية عن زاوية ارتفاعها الحقيقية. ويُحسب مقدار الانكسار الذي يحدث في الغلاف الجوي يتم باستخدام قانون سنيل وقيمة n_{eff} المحسوبة في الصيغتين (2) و(3). وتُحسب زاوية الارتفاع المرصودة بما يلي:

$$\theta_{obs} = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(\theta_t)}{n_{eff}(T,P)}\right) \tag{4}$$

حيث:

θ_{obs}: زاوية الارتفاع المرصودة

θt: زاوية الارتفاع الحقيقية

neff (T, P): مؤشر الانكسار الفعال في الغلاف الجوي.

وتستند المعادلة (4) إلى افتراض أن الغلاف الجوي للأرض ذو سمك منتظم بدرجة حرارة وضغط ثابتين وبمؤشر انكسار $n_{eff}(T, P)$.

5 الاضطراب

ينشأ الاضطراب بسبب الجيوب الهوائية التي تختلف فيها مؤشرات الانكسار والموجودة على طول مسير الانتشار. وقد تختلف الجيوب (أي الخلايا المضطربة) في مقاسها من بضعة ملليمترات إلى عشرات الأمتار مع وجود كثير من المقاسات المختلفة في وقت واحد على طول المسير. وفي الترددات ما بين 20 THz و375 THz، يقاد مؤشر الانكسار للخلية بالحرارة بدلاً من الرطوبة كما هو الحال بالنسبة للترددات الراديوية التقليدية (أي ترددات لا على التعيين دون 000 3 GHz). وتختلف مؤثرات الاضطراب المحرَّض حرارياً في الاتجاهين أرض–فضاء وفضاء–أرض.

1.5 مقاييس الاضطراب

هناك أربعة مقاييس للاضطراب الجوي تصف بمجموعها خصائص الانتشار القائمة على طول مسير مائل. وفيما يلي هذه المعايير:

C_n^2: مقياس يعتمد على الارتفاع لشدة الاضطراب الناجم عن الغلاف الجوي ($m^{-2/3}$)؛

r_0: طول تماسك الغلاف الجوي يصف القطر الفعال لفتحة واحدة تستقبل الطاقة التي انتشرت من خلال الاضطراب في الغلاف الجوي (m)؛

θ_0: زاوية استواء الجبهات الموجية في الغلاف الجوي هي الفرق الزاوي الذي يبلغ فيه تغاير صدر الموجة بين اتجاهين 1 rad^2؛

τ_0: الثابت الزمني الحرج للغلاف الجوي الذي يصف المعدل الزمني للتغيرات في الاضطراب على طول مسير (مسيرات) الانتشار.

1.1.5 معلمة هيكل الاضطراب، C_n^2

يستند الأسلوب الموضح أدناه إلى نموذج Huffnagel-Valley 5/7. ويمكن استخدام هذا النموذج لحساب معلمة هيكل الاضطراب C_n^2، على طول مسير مائل. وتلزم المعلمات التالية:

v_g: سرعة رياح الأرض (m/s)؛

C_0: القيمة الاسمية للمعلمة C_n^2 على مستوى سطح الأرض (عادة ~ $1{,}7 \times 10^{-14}\ m^{-2/3}$).

الخطوة 1: تُحسب سرعة الرياح الفعالة (r.m.s.) على طول المسير العمودي، v_{rms}، باستخدام شكل مبسط من نموذج بافتون (Bufton) للرياح لحالة المدار المستقر بالنسبة إلى الأرض، مما يلي:

$$v_{rms}\ \text{m/s} = \sqrt{v_g^2 + 30{,}69\, v_g + 348{,}91} \quad (5)$$

وعندما تكون سرعة الرياح الأرض مجهولة، يمكن استخدام قيمة v_g = 2,8 m/s كتقريب يُنتج v_{rms} = 21 m/s.

الخطوة 2: تُحسب معلمة هيكل الاضطراب، C_n^2، على الارتفاع، h، مما يلي:

$$m^{-2/3}\ C_n^2(h) = 8{,}148\times10^{-56}\, v_{rms}^2 h^{10} \exp^{-h/1000} + 2{,}7\times10^{-16} \exp^{-h/1500} + C_0 \exp^{-h/100} \quad (6)$$

حيث:

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m).

ويمكن تطبيق هذا النموذج للمعلمة C_n^2 من أجل التخطيط العام للنظام في أي نقطة على الأرض. غير أن C_n^2 تتغير كثيراً من موقع إلى آخر. وتقتضي الضرورة معرفة خصائص C_n^2 المحلية قبل إعداد النظام. وتتغير C_n^2 أيضاً على نحو جدير بالاعتبار مع الارتفاع عند أقل الارتفاعات فوق سطح الأرض. لذلك، ولضمان دقة تقدير البيانات الوصفية للاضطراب في الغلاف الجوي، ينبغي أن يزداد سمك الطبقة أو مقاس خطوة التكامل في الارتفاع أسياً من 0.001 km عند أخفض طبقة (مستوى الأرض) إلى 1 km على ارتفاع 20 km، وفق المعادلة التالية:

$$h_i = \exp\left\{\frac{i-1}{20}\right\} \quad \text{m} \quad (7)$$

من $i = 1$ إلى 139، علماً بأن $h_{139} \cong 1\,000$ m و $\sum_{i=1}^{139} h_i \cong 20$ km.

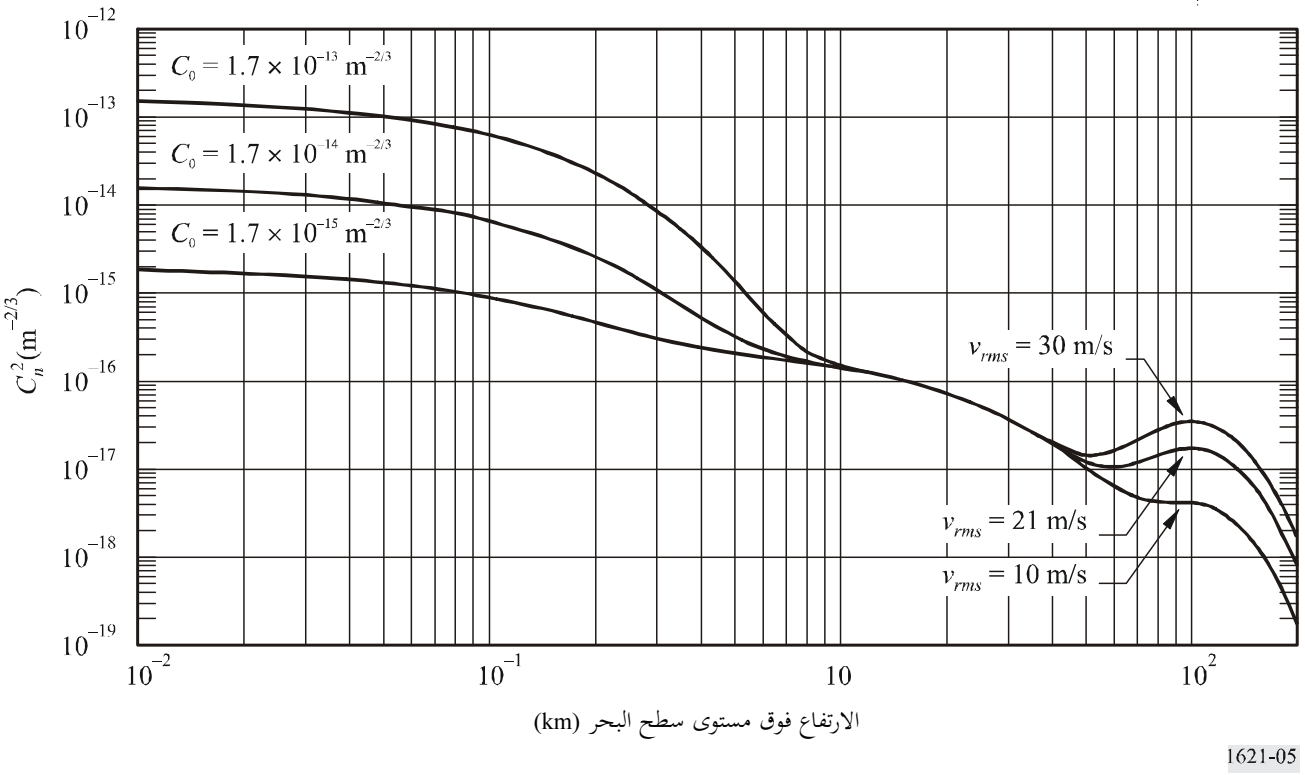
ويبين الشكل 5 المعلمة C_n^2 في أقصاها عند السطح وتناقصها بسرعة مع زيادة الارتفاع. فعلى ارتفاع يناهز 10 km فوق سطح الأرض، تزداد C_n^2 قليلاً ولكنها تنحدر بشدة. وعلى ارتفاعات منخفضة، تعتمد قيمة C_n^2 أكثر ما تعمد على C_0. وتؤثر مؤثرات الرياح أكبر الأثر على C_n^2 في ارتفاعات فوق حوالي 1 km. وتصبح C_n^2 مهملة على ارتفاعات تزيد عن 20 km فوق سطح الأرض.

2.1.5 طول تماسك الغلاف الجوي

يصف طول تماسك الغلاف الجوي، r_0، القطر الفعال، جراء الاضطراب، لفتحة ثابتة واحدة محدودة الانعراج، وهو مبيَّن في الشكل 6. والفتحة الثابتة التي يقل قطرها عن r_0 أو يساويه تجمع الطاقة من جزء متماسك من صدر الموجة. أما الفتحة الثابتة التي يزيد قطرها عن r_0 فهي ستستقبل صدر موجة متردياً عبر سطحها.

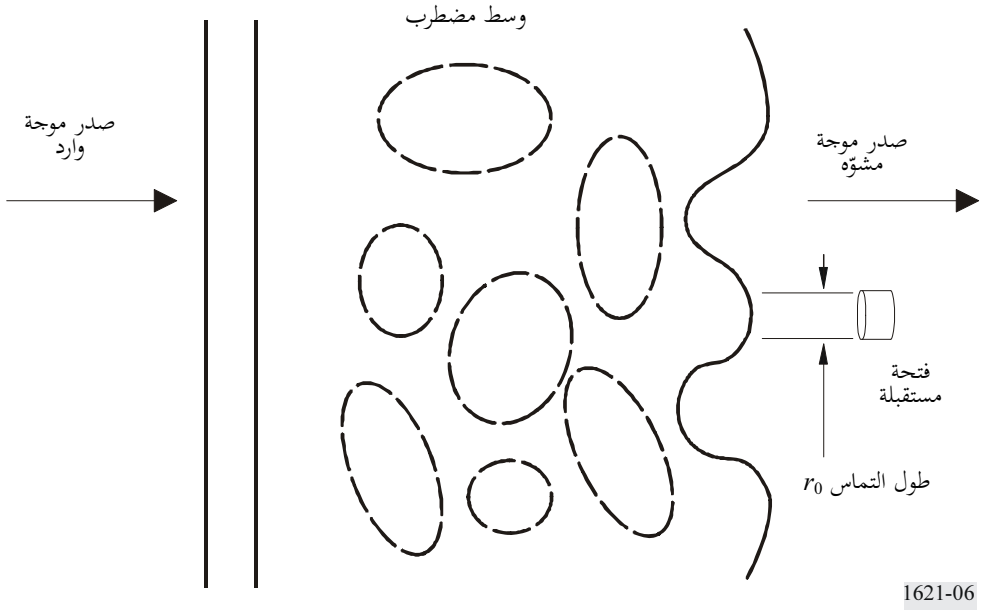
الشكل 5

المعلمة C_n^2 كدالة ارتفاع لقيم متعددة لسرعة الرياح واضطراب السطح



الشكل 6

طول التماسك



يُحسب طول التماسك تقليدياً بما يلي:

$$\mathrm{m}\, r_0 = \left(0{,}423 k^2 \sec\zeta \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\, \mathrm{d}\, h \right)^{-3/5} \tag{8a}$$

حيث:

k: رقم موجي ($2\pi/\lambda$=)

ζ: زاوية السمت

λ: طول الموجة (m)

h_0: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m).

وهذا يعادل:

$$\mathrm{m}\, r_0 = \frac{1{,}1654\times10^{-8}\lambda^{1,2}\sin^{0,6}\theta}{\left(\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\, \mathrm{d}\, h \right)^{0,6}} \tag{8b}$$

حيث:

λ: طول الموجة (μm)

θ: زاوية الارتفاع

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

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m)

Z: الارتفاع الفعال للاضطراب (20 km عادة).

وإن لم تتوفر القياسات المحلية للمعلمة C_n^2 على طول مسير الانتشار، يمكن استخدام نموذج the Hufnagel-Valley 5/7 المعطى بالمعادلة (6) وأسلوب التكامل باستخدام طبقات تتزايد أسياً على النحو الموصوف في الفقرة 1.1.5. وبدلاً من ذلك، توفر الصيغة الرقمية التالية تقريباً جيداً.

الخطوة 1: يحدَّد تكامل الحد المعتمد على الرياح، C_{wind}، بما يلي:

$$C_{wind} = (8{,}148\times10^{-17} v_{rms}^2)\left(0{,}0026\left(1-\exp^{(0{,}001 h_0^{1{,}055}-5)} \right) + 3{,}587369 \right) \quad \mathrm{m}^{1/3} \tag{9}$$

حيث:

v_{rms}: سرعة الرياح الفعالة (r.m.s.) (m/s) على النحو الوارد في المعادلة (5)

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

الخطوة 2: يحدَّد الحد المتكامل المعتمد على الارتفاع، C_{height}، بما يلي:

$$C_{height} = -6{,}5594\times10^{-19} + 4{,}05\times10^{-13}\exp^{-h_0/1500} \quad \mathrm{m}^{1/3} \tag{10}$$

الخطوة 3: يحدَّد الحد المعتمد على اضطراب السطح للتكامل، C_{turb}، بما يلي:

$$C_{turb} = -C_0(1{,}383899\times10^{-85} - 100\exp^{-h_0/100}) \quad \text{m}^{1/3} \tag{11}$$

حيث:

C_0: القيمة الاسمية للمعلمة C_n^2 على مستوى سطح الأرض (عادة ~ 1.7×10^{-14} $\text{m}^{-2/3}$)

الخطوة 4: يقرَّب تكامل البيانات الوصفية للاضطراب، $\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\text{d}\,h$ ، بما يلي:

$$\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,\text{d}\,h \approx C_{wind} + C_{height} + C_{turb} \quad \text{m}^{1/3} \tag{12}$$

الخطوة 5: يحدَّد طول التماسك، r_0، بما يلي:

$$\text{m}\, r_0 = \frac{1{,}1654\times10^{-8}\lambda^{1{,}2}\sin^{0{,}6}\theta}{(C_{wind} + C_{height} + C_{turb})^{0{,}6}} \tag{13}$$

اشتُقت الصيغة أعلاه كتقريب لارتفاع محطة أرضية بين 0 km و5 km فوق مستوى سطح البحر ولزاوية ارتفاع فوق 45°. وتفترض الصيغة أن C_n^2 (h) تصبح مهملة على ارتفاعات أعلى من 20 km فوق سطح الأرض.

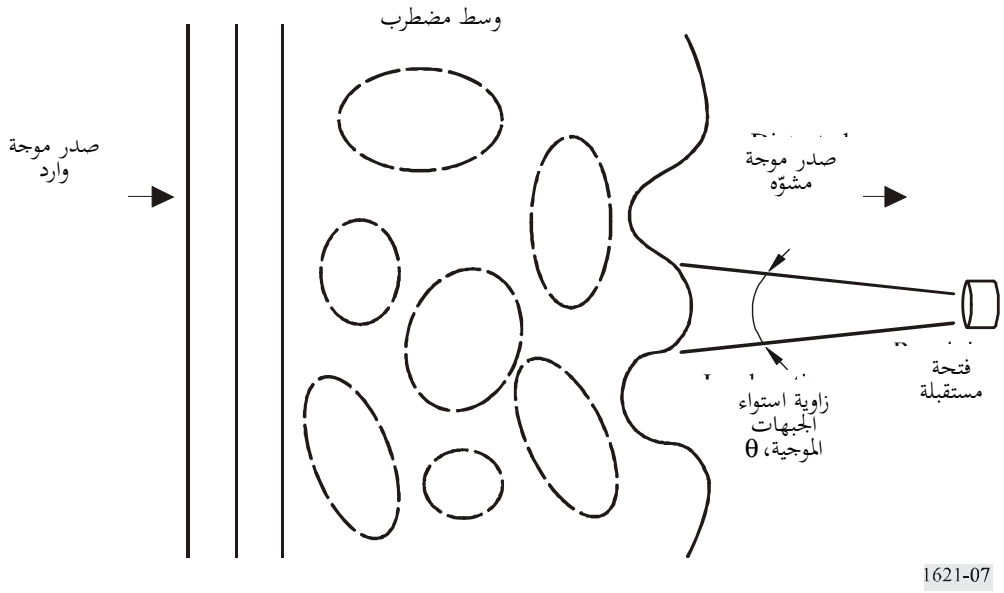
وفي ترددات دون 30 THz (بأطوال موجة أكبر من 10 µm)، يكون الأداء المحدود القريب من الانعراج ممكناً لأنظمة بفتحة واحدة يقل قطرها عن 1 m. ويتناقص طول تماسك الغلاف الجوي مع زيادة التردد. ولمعظم المواقع على الأرض، يكون طول التماسك، r_0 عند تردد أعلى من 300 THz (طول موجة أقل من 1 µm)، في حدود 5 cm، في ظل ظروف ممتازة، قد يزداد هذا الطول ليصل إلى 30 cm.

3.1.5 زاوية استواء الجبهات الموجية

إن زاوية استواء الجبهات الموجية، θ_0، الموضحة في الشكل 7، هي المدى الزاوي الذي يترابط عبره جزء من صدر الموجة، بعد اجتيازه اضطراباً في الغلاف الجوي، بدرجة معينة (1 rad عادة). وتميل زوايا استواء الجبهات الموجية إلى التراوح بين 10^{-6} و10^{-4} rad. وترتبط أكبر قيم θ_0 بزوايا ارتفاع عالية وترددات منخفضة (أطوال موجات طويلة) وقيم منخفضة للمعلمة C_n^2. وتكاد تتزايد θ_0 خطياً مع التردد (بتناقص طول الموجة) وتتناقص بسرعة بانخفاض زوايا الارتفاع دون ما يقرب من 75.

الشكل 7

زاوية استواء الجبهات الموجية



تُحسب زاوية استواء الجبهات الموجية تقليدياً بما يلي:

$$\text{rad}\,\theta_0 = \left(2{,}914 k^2 \sec^{8/3}\zeta \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)(h-h_0)^{5/3}\,\text{d}\,h \right)^{-3/5} \tag{14a}$$

حيث:

k: رقم موجي ($2\pi/\lambda$=)

ζ: زاوية السمت

λ: طول الموجة (m)

h_0: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m).

وهذا يعادل:

$$\text{rad}\,\theta_0 = \frac{3{,}663\times10^{-9}\lambda^{1,2}\sin^{1,6}\theta}{\left(\int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)(h-h_0)^{5/3}\,\text{d}\,h \right)^{0,6}} \tag{14b}$$

حيث:

λ: طول الموجة (μm)

θ: زاوية الارتفاع

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

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m)

Z: الارتفاع الفعال للاضطراب (20 km عادة).

وإن لم تتوفر القياسات المحلية للمعلمة C_n^2 على طول مسير الانتشار، يمكن استخدام أسلوب التكامل باستخدام طبقات تتزايد أسياً على النحو الموصوف في الفقرة 1.1.5. وبدلاً من ذلك، توفر الصيغة الرقمية التالية تقريباً جيداً.

الخطوة 1: يحدَّد تكامل الحد المعتمد على الرياح، : C'_{wind}، بما يلي:

$$C'_{wind} = 8{,}148\times10^{-10} v_{rms}^2 \left(\left(0{,}002 \left(1 - \exp^{(0{,}0018 h_0^{1{,}014} - 9)} \right) \right) + 2{,}0043 \right) \quad \text{m}^2 \tag{15}$$

حيث:

v_{rms}: سرعة الرياح الفعالة (r.m.s.) (m/s) على النحو الوارد في المعادلة (5)

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

الخطوة 2: يحدَّد الحد المتكامل المعتمد على الارتفاع، : C'_{height}، بما يلي:

$$C'_{height} = -7{,}0236\times10^{-23} h_0^4 + 1{,}5015\times10^{-18} h_0^3 - 8{,}9834\times10^{-15} h_0^2 + 2{,}3855\times10^{-12} h_0 + 9{,}6181\times10^{-8} \quad \text{m}^2 \tag{16}$$

الخطوة 3: يحدَّد الحد المعتمد على اضطراب السطح للتكامل، C'_{turb}، بما يلي:

$$C'_{turb} = 3{,}3\times10^5 C_0 \exp^{-0{,}000222 h_0^{1{,}45}} \quad \text{m}^2 \tag{17}$$

حيث:

C_0: القيمة الاسمية للمعلمة C_n^2 على مستوى سطح الأرض (عادة ~ 1.7×10^{-14} $\text{m}^{-2/3}$)

الخطوة 4: تحدَّد زاوية زاوية استواء الجبهات الموجية، θ_0، بما يلي:

$$\text{rad}\,\theta_0 = \frac{3{,}663\times10^{-9} \lambda^{1{,}2} (\sin\theta)^{1{,}6}}{(C'_{wind} + C'_{height} + C'_{turb})^{0{,}6}} \tag{18}$$

اشتُقت الصيغة أعلاه كتقريب لارتفاع محطة أرضية بين 0 km و5 km فوق مستوى سطح البحر ولزاوية ارتفاع فوق 45°؛ علماً بأن C_n^2 (h) تصبح مهملة على ارتفاعات أعلى من 20 km فوق سطح الأرض.

4.1.5 الخصائص الزمنية للاضطراب

تعرَّف الخصائص الزمنية للاضطراب بالثابت الزمني الحرج، τ_0، الذي يمثل الاستجابة الزمنية المطلوبة للتخفيف من آثار الاضطراب. وتتعلق قيمة τ_0 بمعلمة يشيع استخدامها هي f_G. والعلاقة بين المعلمتين هي τ_0 $1/f_G$. ويمكن استخدام الأسلوب الموضح أدناه لحساب τ_0 على مسيرات مائلة بزوايا ارتفاع أكبر من 45° وتلزم المعلمات التالية:

v_g: سرعة الرياح عند المحطة الأرضية (m/s)

λ: طول الموجة (μm)

θ: زاوية الارتفاع.

الخطوة 1: يُحصَل على البيانات الوصفية لسرعة الرياح مقابل الارتفاع، $v(h)$. وإن لم تتوفر قياسات محلية لبيانات $v(h)$، يمكن تقريبها بما يلي:

$$\text{m/s}\, v(h) = v_g + 30 \exp^{-\left(\frac{h - 9\,400}{4\,800} \right)^2} \tag{19}$$

حيث:

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m).

وإن لم تتوفر قياسات محلية للسرعة v_g، يمكن افتراض القيمة النمطية 2.8 m/s.

الخطوة 2: يُحسب الاضطراب المتكامل المرجح بالرياح بما يلي:

$$v_{5/3} = \int_{h_0}^{Z} C_n^2(h)\,(v(h))^{5/3}\,\mathrm{d}\,h \qquad \mathrm{m}^2/\mathrm{s}^{5/3} \tag{20}$$

حيث:

$C_n^2(h)$: البيانات الوصفية للاضطراب ($\mathrm{m}^{-2/3}$)

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

h: الارتفاع فوق مستوى سطح الأرض (m)

Z: الارتفاع الفعال للاضطراب (20 km عادة).

وإن لم تتوفر القياسات المحلية للمعلمة C_n^2 على طول مسير الانتشار، يمكن استخدام التقريب العام الوارد في الفقرة 1.1.5.

الخطوة 3: يُحسب الثابت الزمني الحرج، τ_0، بما يلي:

$$\mathrm{s}\ \tau_0 = \frac{2{,}729\times10^{-8}\lambda^{1,2}\sin^{0,6}\theta}{v_{5/3}^{0,6}} \tag{21}$$

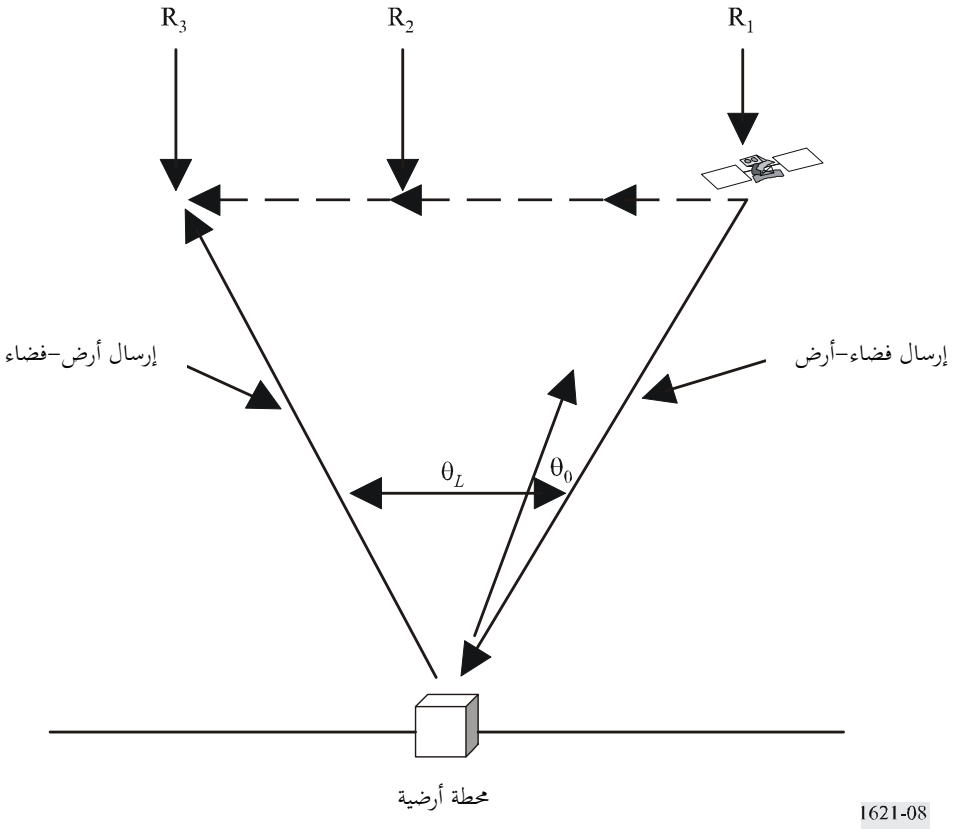
5.1.5 انحرافات السرعة

تتطلب توليفة تأخر الانتشار بين مركبة فضائية ومحطة أرضية والحزم الضيقة المحتملة مع أنظمة عاملة بين 20 THz و375 THz أن يقع الإرسال في الاتجاه أرض–فضاء والإرسال في الاتجاه فضاء–أرض بين نفس المحطتين على مسيري انتشار مختلفين. إذ تُدِر انحرافات السرعة فوائد بعض تقنيات تعويض الغلاف الجوي عندما تكون زاوية النقطة المقبلة، θ_L، أكبر من زاوية استواء الجبهات الموجية، θ_0.

ويوضح الشكل 8 الظرف قيد النظر. إذ ترسل المركبة الفضائية عند النقطة R_1، وتحدد متجهاً إلى موضع الساتل عندما تُستقبَل على الأرض وفي الوقت الذي أرسلت فيه. ولكن الساتل يكون قد تحرك إلى النقطة R_2 وقت الاستقبال. وعندما ترسل المحطة الأرضية إلى المركبة الفضائية، يجب أن تعوض عن الحركة من R_1 إلى R_2 وعن الحركة إلى نقطة R_3 الإضافية خلال تأخر الانتشار.

الشكل 8

التأثيرات الجوية على اعتبارات النقطة المقبلة



تبسَّط صيغة θ_L عند افتراض صغر θ_L كما يلي:

$$\text{rad}\,\theta_L = \frac{2(v_S - v_E)}{c} \tag{22}$$

حيث:

v_S: السرعة الموجهة المماسية للساتل (m/s)

v_E: السرعة الموجهة المماسية للمحطة الأرضية (m/s)

c: سرعة الضوء ($\approx 3 \times 10^8$ m/s).

وفي محطة أرضية على خط الاستواء وساتل مستقر بالنسبة إلى الأرض عند السمت، تبلغ زاوية النقطة المقبلة 17.4 µrad. وفي مركبة فضائية غير مستقرة بالنسبة إلى الأرض، تكون زاوية النقطة المقبلة عادة في حدود 50 µrad. وهذا أكبر من زاوية استواء الجبهات الموجية، θ_0 التي تترابط ضمنها تشوهات الطور بدرجة عالية. وبالتالي فإن تصحيح صدر الموجة المتردي على طول المسير في الاتجاه فضاء–أرض لن يطبَّق على تصحيح الاضطراب على طول المسير في الاتجاه أرض–فضاء.