

التوصية ITU-R P.1817*

بيانات الانتشار اللازمة لتصميم الوصلات البصرية للأرض في الفضاء الحر

(المسألة ITU-R 228/3)

(2007)

مجال التطبيق

توفر هذه التوصية بيانات الانتشار اللازمة لتصميم الوصلات البصرية في الفضاء الحر (FSO) وتخطيط الأنظمة البصرية في الفضاء الحر، في مدى صلاحيتها الخاص المحدد في هذه التوصية.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن الطيف البصري المرئي للأشعة دون الحمراء متاح للاتصالات الراديوية في بيئات الأرض؛

ب) أن من الضروري الحصول على بيانات انتشار مناسبة للتخطيط الجيد لأنظمة الاتصالات الراديوية البصرية في الفضاء الحر العاملة في الطيف البصري المرئي للأشعة دون الحمراء؛

ج) أنه تم تطوير أساليب تسمح بحساب أكثر معلومات الانتشار أهمية المطلوبة في تخطيط الأنظمة البصرية في الفضاء الحر العاملة في الطيف البصري المرئي للأشعة دون الحمراء؛

د) أنه تم، قدر المستطاع، اختبار هذه الأساليب مقارنة بالبيانات المتاحة وأظهرت أنها تقدم دقة متسقة مع التغييرات الطبيعية لظاهرة الانتشار ومناسبة لمعظم التطبيقات الحالية بالنسبة إلى تخطيط الأنظمة العاملة في الطيف البصري المرئي للأشعة دون الحمراء،

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 المدى الترددات وبعتماد توصيات..."،

توصي

1 أنه ينبغي اعتماد أساليب التنبؤ بمعلومات الانتشار الواردة في الملحق 1 بالنسبة إلى الأنظمة البصرية في الفضاء الحر، في مدى صلاحيتها الخاص المحدد في الملحق.

الملاحظة 1 - يمكن الحصول على معلومات إضافية تتعلق بأساليب التنبؤ الانتشار للترددات في الطيف البصري المرئي للأشعة دون الحمراء في توصية قطاع الاتصالات الراديوية المعنية بأساليب التنبؤ المطلوبة لتصميم الوصلات البصرية للأرض في الفضاء الحر.

* ينبغي أن ترفع هذه التوصية إلى عناية لجنتي الدراسات 1 و9 للاتصالات الراديوية.

الملحق 1

1 الاعتبارات الجوية

- تتعرض الوصلات البصرية في الفضاء الحر للإعاقة بسبب الامتصاص وانتشار الضوء بسبب جو الأرض. ويتفاعل الجو مع الضوء بسبب تركيبة الجو التي تتكون عادة من مجموعة من مختلف الأصناف الجزيئية والجسيمات الصغيرة العالقة التي تُعرف بالأهباء. وينتج عن هذا التفاعل طائفة واسعة من الظواهر منها الامتصاص الانتقائي للترددات والانتشار والتأكل.
- ينتج الامتصاص الانتقائي للترددات، عند أطوال موجات بصرية محددة، عن التفاعل بين الفوتونات والذرات أو الجزيئات، مما يؤدي إلى اندثار الفوتونات الواردة وارتفاع درجة الحرارة والبث الإشعاعي.
 - ينتج الانتشار الجوي عن التفاعل بين الفوتونات والذرات والجزيئات في وسط الانتشار. ويتسبب الانتشار في إعادة توزيع الإشعاع مع تغيير طول الموجة أو بدونه.
 - ينتج التأكل عن الاضطراب الحراري داخل وسط الانتشار الذي ينتج عن خلايا موزعة عشوائياً. ولهذه الخلايا أحجام مختلفة (من 10 سنتيمترات إلى كيلومتر واحد) ودرجات حرارة وأدلة انكسارية تتسبب في الانتشار وتعدد المسيرات وتفاوت زوايا الوصول. ونتيجة لذلك، يتقلب اتساع الإشارة المستقبلة عند ترددات تتراوح بين 0,01 و 200 Hz. ويتسبب التأكل كذلك في تشوه مقدمة الموجة، ومن شأن ذلك أن يؤدي إلى إزالة تبئير الحزمة.
- بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤثر ضوء الشمس في أداء الوصلات البصرية في الفضاء الحر عندما تكون الشمس في اتجاه خطي مع الوصلة البصرية في الفضاء الحر.

2 الامتصاص الجزيئي

الامتصاص الجزيئي هو نتيجة تفاعل بين الإشعاع البصري وذرات الوسط وجزيئاته (N_2 أو O_2 أو H_2 أو H_2O أو CO_2 أو O_3 أو Ar، إلخ). ويعتمد معامل الامتصاص على نوع جزيئات الغاز وتركيزها. وتحدد الاختلافات الطيفية لمعامل الامتصاص طيف الامتصاص. ومرد طبيعة هذا الطيف يعود إلى اختلافات في مستويات طاقة الغاز الممكنة التي تولدها أساساً التحولات الإلكترونية واهتزازات الذرات ودوران الجزيئات. ومن شأن ارتفاع الضغط أو الحرارة أن يوسع خطوط امتصاص الطيف من خلال استثارة مستويات أعلى من الطاقة وظاهرة "دوبلر". والامتصاص الجزيئي عبارة عن ظاهرة انتقائية تؤدي إلى نوافذ إرسال جوية شفافة نسبياً وإلى نطاقات امتصاص جوي غير شفافة نسبياً.

ونوافذ الإرسال في المدى البصري هي التالية:

- أشعة دون الحمراء مرئية وقريبة جداً: من 0,4 إلى 1,4 μm
- أشعة دون الحمراء قريبة أو من النمط I: من 1,4 إلى 1,9 μm ومن 1,9 إلى 2,7 μm
- أشعة دون الحمراء متوسطة أو من النمط II: من 2,7 إلى 4,3 μm ومن 4,5 إلى 5,2 μm
- أشعة دون الحمراء بعيدة أو من النمط III: من 8 إلى 14 μm
- أشعة دون الحمراء شديدة أو من النمط IV: من 16 إلى 28 μm

للجزيئات الغازية مستويات طاقة خاصة بكل صنف ويمكن تكميته، ويمكنها أن تمتص الطاقة (أو الفوتونات) تحت تأثير إشعاع كهرومغناطيسي وارد والتحول من مستوى الطاقة الأولي، e_i ، إلى مستوى أعلى للطاقة، e_f . وبالتالي، يتم توهين طاقة الإشعاع بخسارة فوتون واحد أو أكثر.

يحدث هذا الإجراء فقط إذا كان تردد الموجة الواردة يقابل تماماً إحدى ترددات الرنين للجزيء المعني، على الشكل التالي:

$$(1) \quad \nu_0 = \frac{e_f - e_i}{h}$$

حيث:

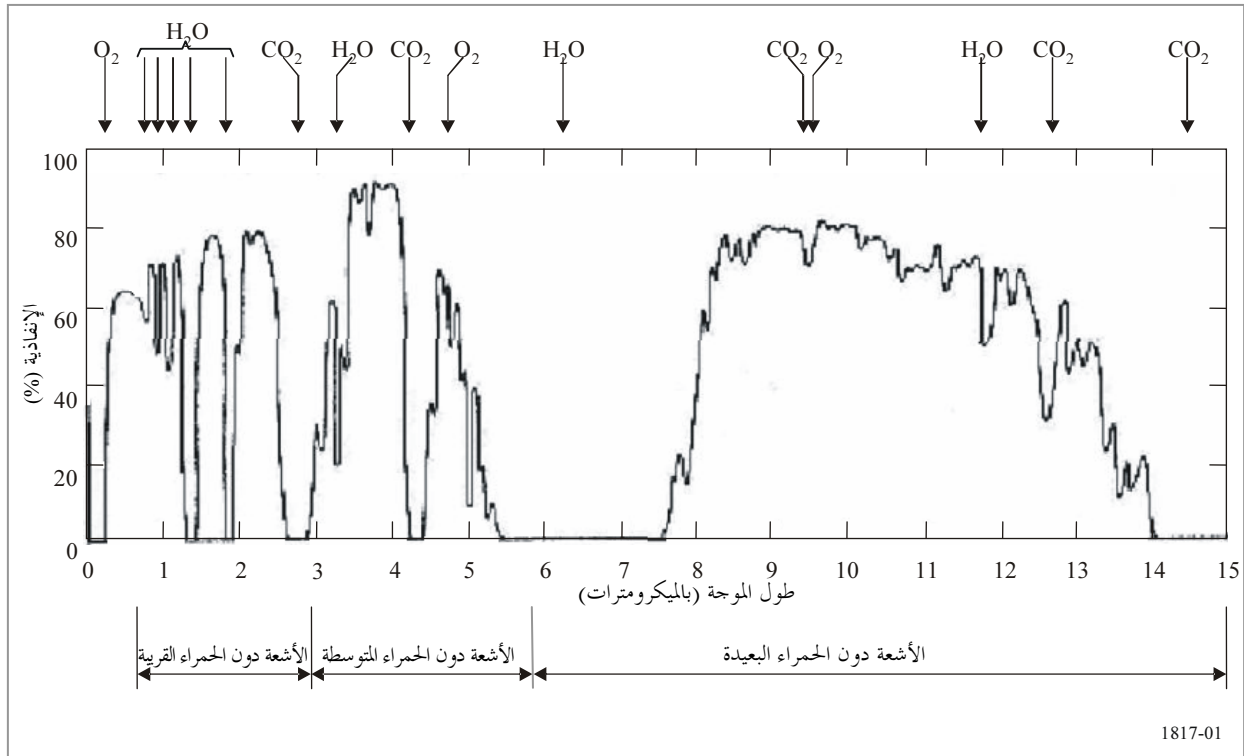
ν_0 : تردد الموجة الواردة (Hz)

h : ثابت "بلانك"، مع $h = 6,6262 \times 10^{-34}$ جول ثانية.

والمعلومات الأساسية التي تحدد الامتصاص الذي يولده الرنين الجزيئي هي مستويات الطاقة الممكنة لكل صنف من الأصناف الجزيئية وإمكانية التحول من مستوى الطاقة e_i إلى مستوى الطاقة e_f وكثافة خطوط الرنين والملاح الطبيعية لكل خط. وبشكل عام، تقوم ظاهرة "دوبلر" بتعديل ملمح كل خط امتصاص عندما تتحرك الجزيئات بالنسبة إلى الموجة الواردة ووفقاً لأثر التصادم بسبب تفاعل الجزيئات. وتؤدي هذه الظواهر إلى توسيع طيفي للخط الطبيعي لكل جزيء. فيما يتعلق ببعض الجزيئات، مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) أو بخار الماء (H_2O) أو النيتروجين (N_2) أو الأكسجين (O_2)، من الممكن تمديد ملامح خط الامتصاص بفعالية بعيداً عن كل خط من الخطوط المركزية. وتؤدي هذه الخاصية إلى سلسلة امتصاص. ويبين الشكل 1 الإنفاذية الجوية الاسمية المقاسة الناجمة عن الامتصاص الجزيئي عند وصلة أفقية يصل ارتفاعها إلى 1 820 متراً فوق مستوى البحر.

الشكل 1

إنفاذية الجو بسبب الامتصاص الجزيئي



1817-01

الانتشار الجزيئي

3

ينتج الانتشار الجزيئي عن تفاعل الضوء مع الجسيمات الجوية التي تكون أحجامها أصغر من طول موجة الضوء الوارد. ويساهم انتشار جزيئات الغاز الجوي (انتشار رايلي) في التوهين الإجمالي للإشعاع الكهرومغناطيسي.

ومعامل الزوال بسبب الانتثار الجزئي، $\beta_m(\lambda)$ ، هو:

$$(2) \quad \beta_m(\lambda) = \frac{24\pi^3}{\rho\lambda^4} 10^3 \left(\frac{[n(\lambda)]^2 - 1}{[n(\lambda)]^2 + 2} \right) \left(\frac{6+3\delta}{6-7\delta} \right)$$

حيث:

$\beta_m(\lambda)$: معامل الانتثار الجزئي (km^{-1})

λ : طول الموجة (μm)

ρ : الكثافة الجزيئية (m^{-3})

δ : عامل منع استقطاب الهواء ($\cong 0.03$)

$n(\lambda)$: معامل انكسار الهواء.

والقيمة التقريبية للمعامل $\beta_m(\lambda)$ هي:

$$(3) \quad \beta_m(\lambda) = A\lambda^{-4}$$

حيث:

$$(4) \quad A = 1.09 \times 10^{-3} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad \text{km}^{-1} \text{ m}^4$$

و

P : الضغط الجوي (mbar)

P_0 : 1 013 mbar

T : درجة حرارة الجو (K)، و

T_0 : 273,15 K.

من الممكن إهمال الانتثار الجزئي عند أطوال الموجات دون الحمراء، ويؤثر انتشار رايلي أساساً في أطوال الموجات فوق البنفسجية وصولاً إلى أطوال الموجات المرئية. ويعود اللون الأزرق لخلقية السماء الصافية إلى هذا النوع من الانتثار.

4 امتصاص الهباء

الأهباء عبارة عن جسيمات مجهرية صلبة أو سائلة عالقة في الجو مع سرعة هبوط بطيئة جداً (مثل الجليد والغبار والدخان، إلخ.). ويتراوح حجم هذه الجسيمات عادة بين 10^{-2} و $100 \mu\text{m}$. وتشكل جسيمات الضباب والغبار وزبد الأمواج البحرية أمثلة للأهباء.

تؤثر الأهباء في شروط التوهين الجوي بسبب طبيعتها الكيميائية وحجمها وتركيزها. في البيئات البحرية، تتكون الأهباء أساساً من قطرات مياه (الرغوة أو الضباب أو الرذاذ أو المطر) وبلورات الأملاح والعديد من الجسيمات القارية المنشأ. ويتوقف حجم الجسيمات القارية وكثافتها على المسافة التي تفصلها عن السواحل المجاورة وعلى الخصائص التي تتميز بها هذه السواحل.

ومعامل الخمود الناجم عن امتصاص الهباء، $\alpha_n(\lambda)$ ، هو:

$$(5) \quad \alpha_n(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_a \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n'' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1}$$

حيث:

λ : طول الموجة (μm)

$dN(r)/dr$: توزيع حجم الجسيمات لكل وحدة حجم (cm^{-4})

n'' : الجزء التخيلي لمعامل الانكسار n للهباء المعني

r : نصف قطر الجسيمات (cm)

$Q_d(2\pi r/\lambda, n'')$: امتصاص المقطع العرضي لنمط معين من الهباء.

تتنبأ نظرية "مي" (Mie) بالحقل الكهرمغناطيسي المحيّد من جانب الجسيمات الكروية المتجانسة. ويتوقف المقطعان العرضيان للامتصاص (Q_a) والانتثار (Q_d) على حجم الجسيمات ومعامل الانكسار وطول الموجة الواردة. ويمثل هذان المقطعان الجزء من الموجة الواردة حيث تكون القدرة (المنثثة) الممتصة مساوية للقدرة الواردة.

أما معامل انكسار الهباء فيتوقف على تركيبه الكيميائي وطول الموجة. ويشار إلى ذلك بالمعادلة $n = n' + n''$ ، حيث n' هي دالة قدرة الانتثار الجسيم n'' هي دالة امتصاص الجسيم.

في المناطق الطيفية للأشعة دون الحمراء المرئية والقرية، يكون الجزء التخيلي لمعامل الانكسار منخفضاً جداً ويمكن إهماله عند حساب التوهين (الخمود) الإجمالي. أما في حالة الأشعة دون الحمراء البعيدة، فينبغي أخذ الجزء التخيلي لمعامل الانكسار في الاعتبار.

5 انتشار الهباء

يحدث انتشار الهباء (انتثار "مي") عندما يكون حجم الجسيم من نفس حجم مقدار طول موجة الضوء الوارد. والتوهين دالة للتردد والرؤية، وترتبط الرؤية بتوزيع حجم الجسيم. وتشكل هذه الظاهرة للمعامل الأكثر تقييداً لنشر الأنظمة البصرية في الفضاء الحر على مسافات طويلة. وفي المنطقة البصرية، تكون هذه الظاهرة أساساً نتيجة الغشاوة والضباب. ويمكن أن يصل التوهين في النظام البصري إلى 300 dB/km، على نقيض منطقة الموجات المليمترية حيث يبلغ التوهين بالمطر عادة بضعة وحدات dB/km.

يحصل على معامل الزوال الناجم عن انتشار الهباء، β_n ، بالعلاقة التالية:

$$(6) \quad \beta_n(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{dN(r)}{dr} dr \quad \text{km}^{-1}$$

حيث:

λ : طول الموجة (μm)

$dN(r)/dr$: توزيع حجم الجسيمات لكل وحدة حجم (cm^{-4})

n' : الجزء الفعلي لمعامل الانكسار n للهباء

r : نصف قطر الجسيمات (cm)

$Q_d(2\pi r/\lambda, n')$: امتصاص المقطع العرضي لنوع معين من الهباء.

تتنبأ نظرية "مي" بمعامل الانتثار Q_d الناجم عن الأهباء، بافتراض أن الجسيمات كروية ومنفصلة بما فيه الكفاية بحيث يمكن حساب المجال المنتشر، مع افتراض الانتثار البعيد (الوحيد) للمجال.

يتوقف المقطع العرضي للانتثار (Q_d) بشكل كبير على حجم الهباء مقارنة بطول الموجة، وهو عبارة عن دالة تستند كثيراً إلى انتقاء الترددات للجسيمات التي يقل نصف قطرها عن طول الموجة أو يكون مساوياً لها. وهو يبلغ قيمة قصوى (3,8) لنصف قطر جسيم مساوٍ لطول الموجة، ويبلغ في هذه الحالة الانتثار حداً أقصى. ومع تزايد حجم الجسيمات، يقارب المقطع العرضي للانتثار قيمة تساوي 2 تقريباً.

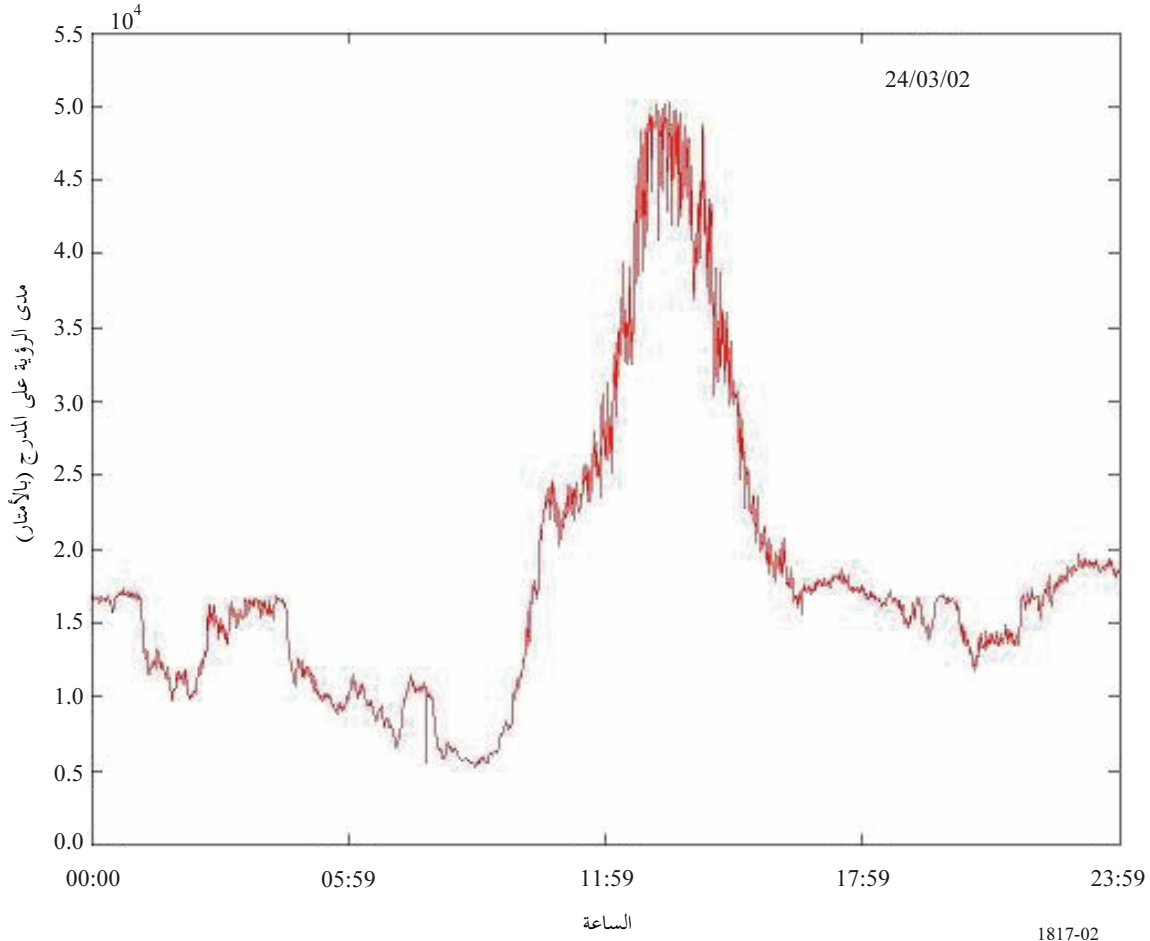
وبما أن تركيز الرذاذ وتركيبته وتوزيع حجمه يتفاوت من حيث الزمن والحيز، من الصعب التنبؤ بالتوهين من جانب هذه الأهباء. وبالرغم من أن التركيز مرتبط بشكل وثيق بالرؤية البصرية، لا يوجد توزيع واحد لحجم الجسيمات بالنسبة إلى رؤية معينة.

تصف الرؤية شفافية الجو كما يقدرها مراقب بشري. ويتم قياسها بالنسبة إلى مدى الرؤية على مدارج الطائرات (RVR) وهي عبارة عن المسافة التي ينبغي لحزمة ضوئية أن تقطعها عبر الجو إذا كان لكثافتها (أو التدفق الضوئي) أن تنخفض حتى 0,05 مثل قيمتها الأصلية. كما يمكن قياسها باستخدام مقياس إنفاذية الجو (transmissometer) أو مقياس للانتشار (diffusimeter).

يقدم الشكل 2 مثالاً عن الاختلافات في مدى الرؤية على مدرج الطائرات في منطقة La Turbie بفرنسا، خلال يوم يتمتع برؤية ممتازة.

الشكل 2

الاختلافات في مدى الرؤية على المدرج في منطقة La Turbie بفرنسا،
خلال يوم يتمتع برؤية ممتازة



على التبادل، من الممكن قياس الرؤية على طول مسير الإرسال باستخدام كاميرا CCD وهدف مرجعي بالأسود والأبيض. ويعطى مدى الرؤية، V_r ، لهذه الطريقة، بالعلاقة التالية:

$$(7) \quad V_r = \frac{\ln(0.02)}{\ln(C/C_0)} d$$

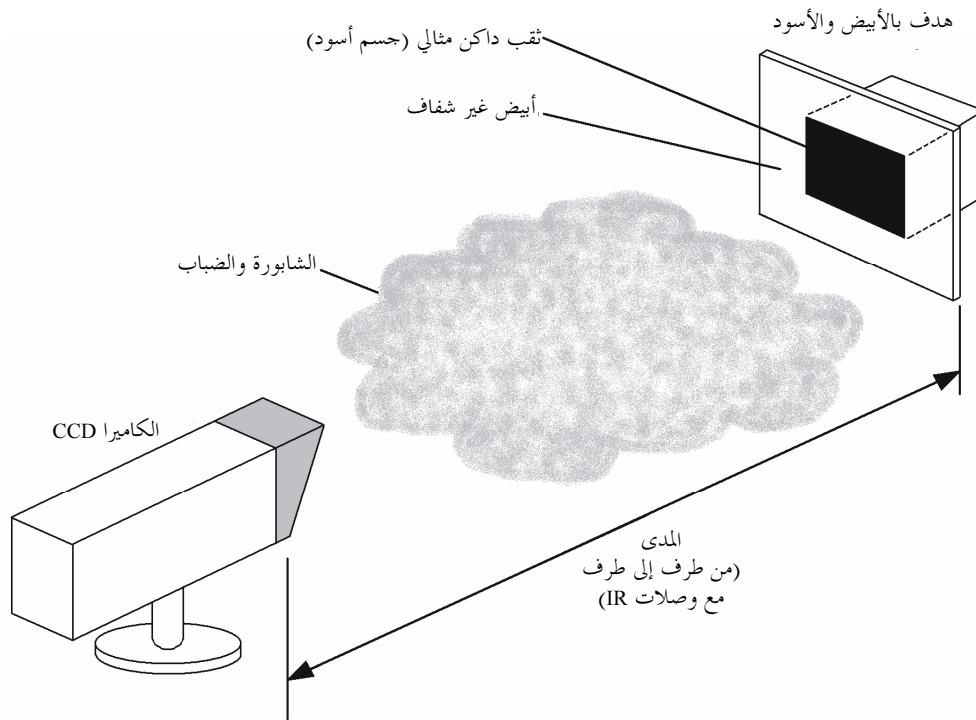
C هو التباين المقياس بين منطقتي الأسود والأبيض للهدف و C_0 هو معدل التباين الذاتي للهدف (المقاس بالقرب منه)، و d هي المسافة بالنسبة إلى الهدف. تعطى القيمة C بالعلاقة:

$$(8) \quad C = \frac{L_w - L_b}{L_w + L_b} = 0.02 = e^{-b_{EX} \cdot V_r}$$

حيث العنصران L_w و L_b هما لونية الجزأين الأبيض والأسود للهدف والعنصر b_{EX} هو معامل الخمود والعنصر V_r هو مدى الرؤية. يبين الشكل 3 الهدف المثالي مع الجزء الأسود من الهدف وسطح تجويف في لوح مطلي باللون الأبيض والسطح الداخلي للثقب المطلي باللون الأسود لتجنب أي ضوء انتشار مباشرة.

الشكل 3

قياس الرؤية التجريبية



1817-03

إن جميع الخصائص البصرية للأهباء، وتحديدًا الضباب، مرتبطة بتوزيع حجم الجسيمات الذي يمكن اعتبارها المعلمة الأساسية لتحديد الخصائص المادية والبصرية للضباب.

وعادة، يتم تمثيل هذا التوزيع بالوظائف التحليلية مثل التوزيع اللوغاريتمي العادي للأهباء وتوزيع غاما المعدل للضباب. ويُستخدم التوزيع الأخير لنمذجة مختلف أنواع الضباب والسحب ويعطى بالعلاقة التالية:

$$(9) \quad N(r) = ar^{\alpha} \exp(-br)$$

حيث $N(r)$ هو عدد الجسيمات لكل حجم وحدة ولكل تزايد وحدة لنصف القطر r ، وتكون a و b معلمات تصف توزيع حجم الجسيمات.

تأخذ العقد الحاسوبية (انظر التذييل 1) في الاعتبار عادة حالتين من الجسيمات: ضباب التأفق الثقيل والضباب الإشعاعي المعتدل، يتم نمذجتهما بتوزيع حجم غاما المعدل كما هو مبين أعلاه. وترد في الجدول 1 المعلومات النمطية لتوزيع غاما المعدل.

الجدول 1

معلومات متعددة لتوزيع حجم جسيمات ضباب التأفق الثقيل والضباب الإشعاعي المعتدل

V (m)	r_m (μm)	W (g/m^3)	N (cm^{-3})	b	a	α	
130	10	0,37	20	0,3	0,027	3	ضباب التأفق الثقيل
450	2	0,02	200	3	607,5	6	الضباب الإشعاعي المعتدل

حيث:

N : العدد الإجمالي لجسيمات الماء لكل وحدة حجم (cm^3)

r_m : نصف القطر المشروط (μm) الذي يبلغ عنده التوزيع حداً أقصى

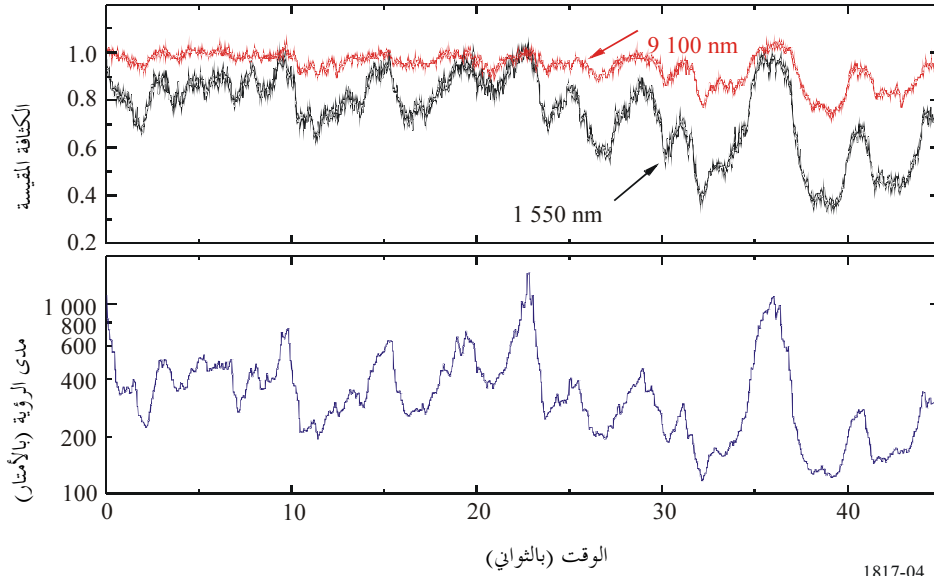
W : محتوى الماء السائل (g/m^3)

V : الرؤية المصاحبة لنوع الضباب (m).

يمكن أن يشهد مستوى الإشارة المستقبلية تقلبات هامة قصيرة الأجل بسبب التغيرات التي تتعرض لها الرؤية. ويبين الشكل 4 الكثافات المقاسة المستقبلية للوصلات IR البعيدة والمتوسطة، إلى جانب رؤية الوصلة خلال مهلة زمنية مدتها دقيقة واحدة.

الشكل 4

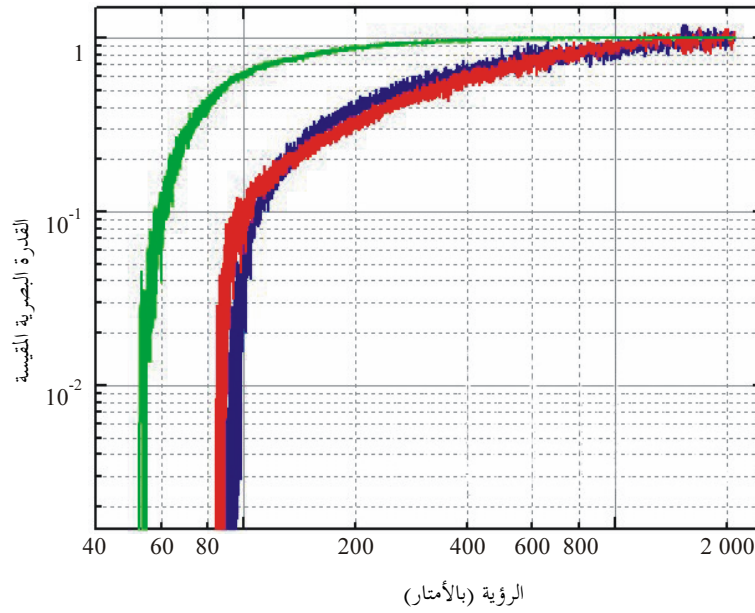
(a) الكثافات المستقبلية في الوقت الفعلي للوصلات IR البعيدة والمتوسطة
ومدى الرؤية (b) المسجل في آن معاً خلال مدة دقيقة واحدة



يبين الشكل 5 القدرة البصرية المقاسة كدالة لمدى الرؤية، مقاسة عند أطوال موجات تبلغ nm 9 100 و nm 1 550 و nm 780.

الشكل 5

القدرة البصرية المستقبلية المقاسة مقارنة برؤية الوصلة من أجل ثلاثة أطوال موجات مختلفة



الإرسال المقاس

- 780 nm
- 1550 nm
- 9100 nm

1817-05

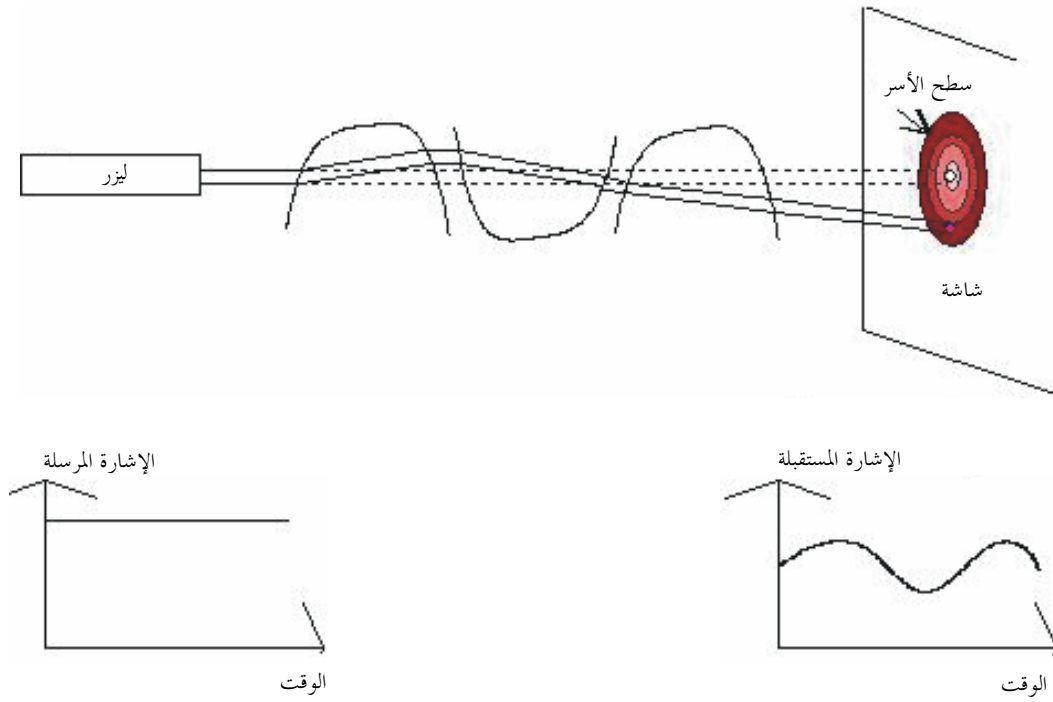
في العديد من حالات الضباب الكثيف، يكون توزيع الجسيمات غير منتظم. في هذه الحالة، يمكن أن توفر الوصلات IR البعيدة تيسر عال، لأن مقدار الضوء الذي يبلغ $10 \mu\text{m}$ يمكنه أن يتغلب على الخسارة في الضباب الكثيف وأن يحافظ على تيسر الوصلة في حين أنه يتعذر ذلك على الضوء بطول موجة أقصر.

6 التآلؤ

يمكن تشكيل الخلايا الموزعة عشوائياً وذات معامل انكسار داخل وسط الانتشار تحت تأثير الاضطراب الحراري. ويمكن لهذه الخلايا أن تتسبب في الانتشار وتعدد المسيرات والتفاوت في زاوية الوصول، مما يتسبب في تقلب مستوى الإشارة المستقبلية على ترددات تتراوح بين 0,01 و 200 Hz. وبالمثل، يتسبب تفاوت الجبهة الموجية بتغير الحزمة وفك تبنيها اللذين يختلفان باختلاف الزمن. ويطلق على مثل هذه التفاوتات التآلؤ. ويتوقف اتساع التآلؤ وتردده على حجم الخلايا مقارنة بقطر الحزمة. وتشير الأشكال التالية إلى هذه الظاهرة بالإضافة إلى تغيرات (الاتساع والتردد) الإشارة المستقبلية. وتنحرف الحزمة (الشكل 6) عندما تكون أوجه التغير كبيرة مقارنة مع المقطع العرضي للحزمة وتوسع الحزمة (الشكل 7) عندما تكون أوجه التغير صغيرة مقارنة مع المقطع العرضي للحزمة. ينتج التآلؤ عن مزيج من التغيرات (الشكل 8).

الشكل 6

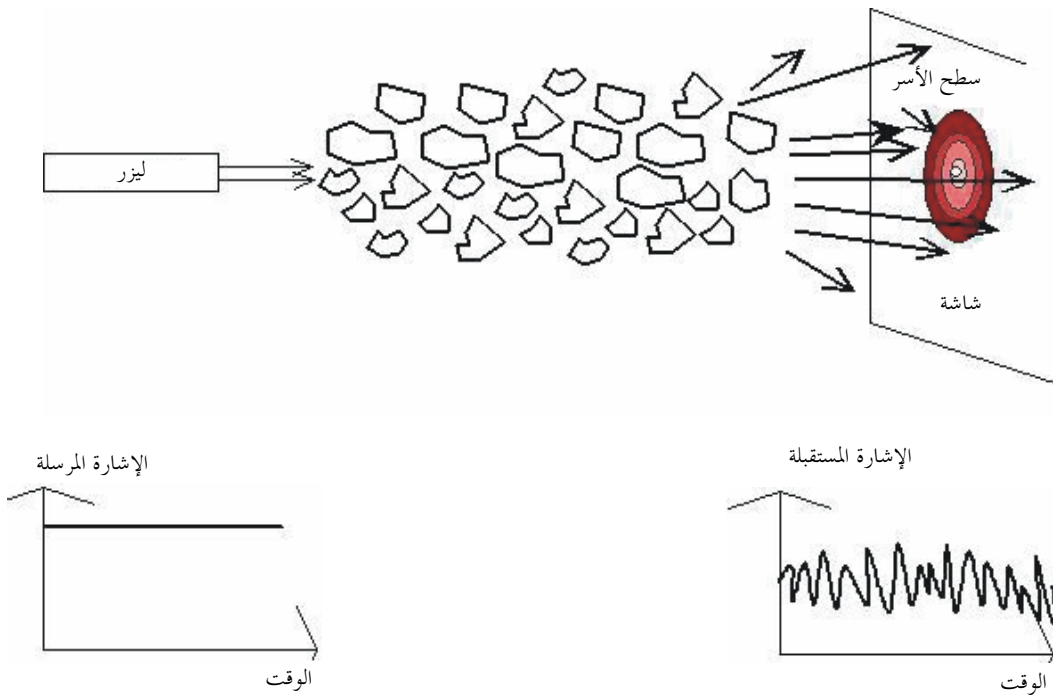
انحراف الحزمة تحت تأثير الخلايا المضطربة التي يفوق حجمها قطر الحزمة



الشكل 7

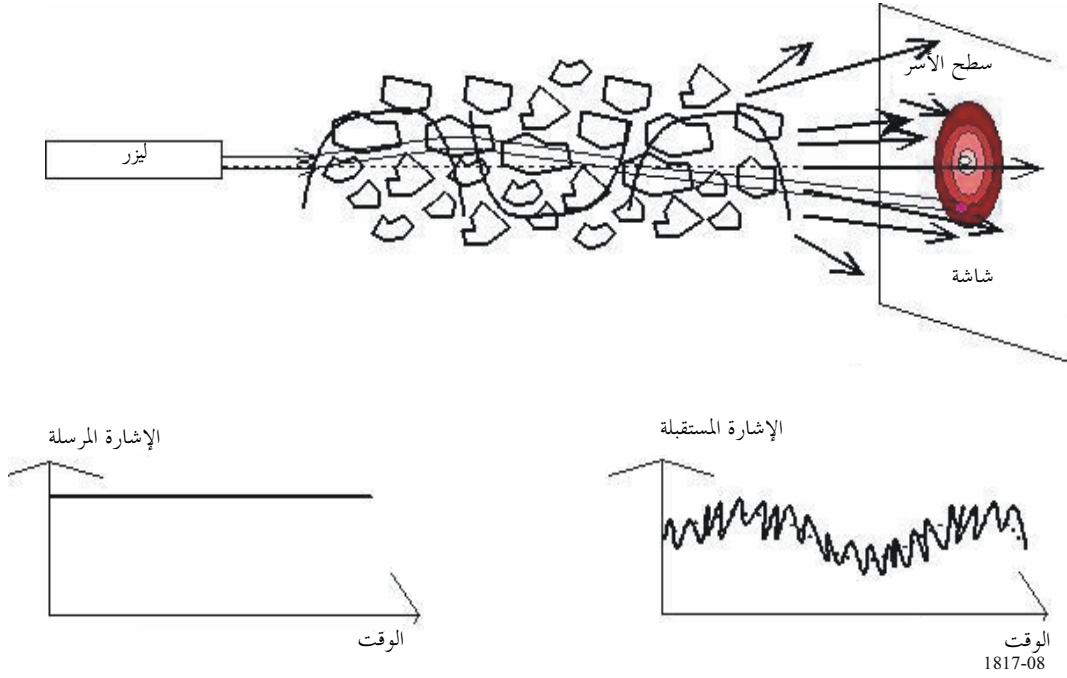
انحراف الحزمة تحت تأثير الخلايا المضطربة التي يقل حجمها عن قطر الحزمة

(توسيع الحزمة)



الشكل 8

آثار مختلف أحجام التغيرات على انتشار الحزمة بالليزر (التألق)



7 التوهين بالمطر

يتم عموماً تقريب التوهين المحدد (dB/km) بسبب المطر بالعلاقة:

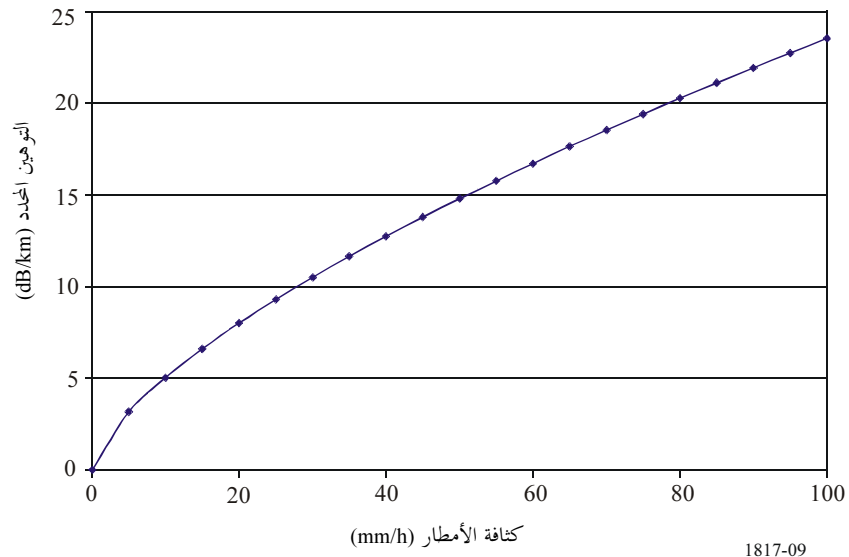
(10)

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^{\alpha}$$

يوضح الشكل 9 التغيرات النمطية للتوهين المحدد (dB/km) بسبب الأمطار المرصودة في المدى البصري ومدى الأشعة دون الحمراء.

الشكل 9

التوهين المحدد بسبب الأمطار المرصودة في المدى البصري ومدى الأشعة دون الحمراء



توفر التوصية ITU-R P.837 معدل سقوط الأمطار، R_p (mm/h)، الذي تم تجاوزه لنسبة مئوية معينة من المتوسط السنوي، p ، ولأي موقع من المواقع.

8 التوهين بالثلج

يعطى التوهين المحدد (dB/km) بسبب الثلج كدالة لمعدل سقوط الثلج بالعلاقة التالية:

(11)

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b$$

حيث:

γ_{snow} : التوهين المحدد (dB/km) بسبب الثلج

S : معدل سقوط الثلج (mm/h)

a و b : دالتا طول الموجة، λ (nm)، وترددان في الجدول 2:

الجدول 2

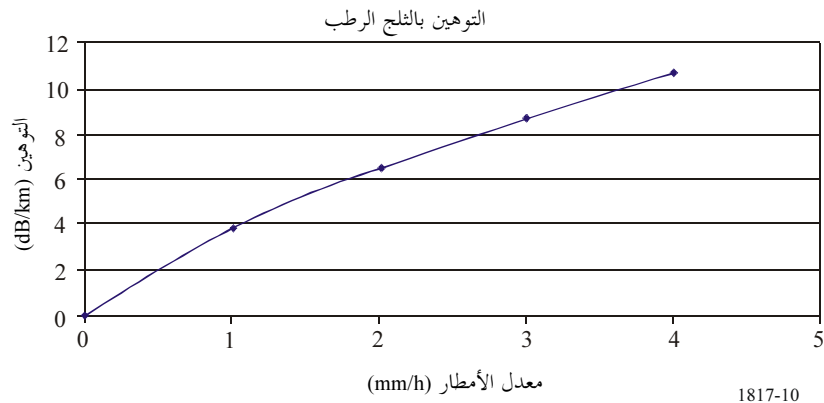
المعلمتان "a" و "b" للثلج الرطب والجاف

b	a	
0,72	$0,0001023\lambda_{nm} + 3,7855466$	الثلج الرطب
1,38	$0,0000542\lambda_{nm} + 5,4958776$	الثلج الجاف

يرد في الشكلين 10 و 11 التوهين المقدر كدالة لمعدل تساقط الثلج λ الذي يبلغ 1,55 μm .

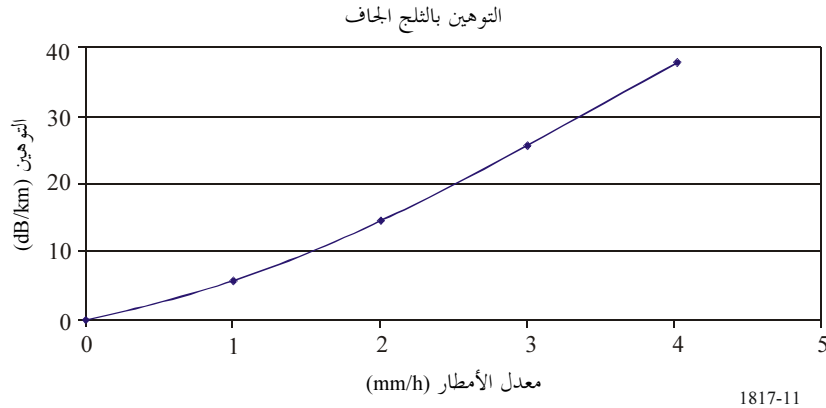
الشكل 10

التوهين بالثلج الرطب مقابل معدل تساقط الثلج $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$



الشكل 11

التوهين بالثلج الجاف مقابل معدل تساقط الثلج $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$



9 ظاهرة الضوء المحيط

يحدث الاقتران الشمسي عندما تكون الشمس أو صورة منعكسة منها داخل مجال الرؤية الآنية لمستقبل بصري (IFOV) أو بالقرب منه. ويكون المجال IFOV المستقبل عادة بحجم انحراف الإرسال على الأقل. والهدف هو حساب احتمال أن يكون موقع الشمس موازياً للوصلة البصرية، وتكون الطاقة الشمسية المتغلغلة في المستقبل أكبر من الطاقة التي يرسلها المرسل. وهناك طريقة لتقدير هذا الأثر في مشروع توصية جديدة ITU-R P.1814.

10 التوزيع التراكمي للتوهين

توضح في الشكل 12 التوزيعات التراكمية للتوهين المقاس عند 850 nm على مسير يبلغ 850 متراً بسبب جميع الظواهر الجوية المائية مثل الضباب أو المطر أو الثلج أو البراغ، الجمهورية التشيكية، خلال فترة سنة واحدة. وقد تم تصنيف جميع أحداث التوهين وفقاً لظروف الأحوال الجوية التي تسببت بإحداث خبو معين. وقد تم تحديد ظروف الأرصاد الجوية باستخدام صورة للمنطقة التقطت بالكاميرا بين المرسل والمستقبل واستخدام البيانات التي تم الحصول عليها من محطة أوتوماتية للأرصاد الجوية موجودة بالقرب من المستقبل. وكانت أحداث الخبو التي سببها الضباب أو الثلج أكثر خطورة.

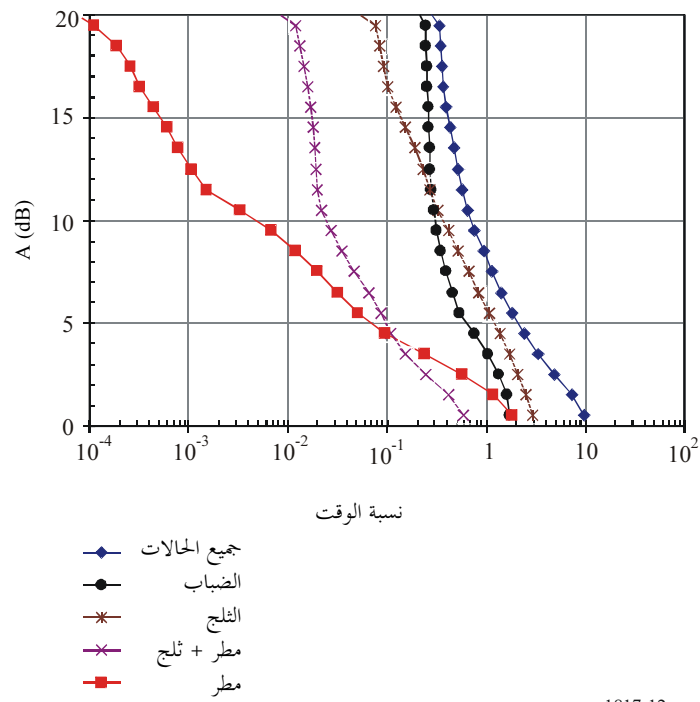
11 الأنظمة الهجين/البصرية في الفضاء الحر

يقارن الشكل 15 قياسات التوهين عند 58 GHz ووصلة بصرية على المسير نفسه بسبب جميع ظواهر الأرصاد الجوية والمطر فقط. وكان للمسير البصري توهين أقل من مسير الموجة المليمترية أثناء تساقط الأمطار. ويمكن أن تحسّن الأنظمة الراديوية/البصرية الهجين (RF/FSO) أداء الوصلة FSO بالنظر إلى واقع مفاده أن المطر يوهن المسير RF ولكنه لا يتأثر بالضباب. وعلى العكس، يقوم الضباب بتوهين المسير البصري لدرجة كبيرة ولكنه لا يتأثر بالمطر نسبياً.

تعطي التوزيعات التراكمية السنوية المشار إليها في الشكل 13 تقديراً لأداء النظام RF/FSO الهجين الافتراضي. ويعتبر النظام هجين حيثما يكون للمسيرات الراديوية والبصرية هامش الخبو نفسه، $FM = 20 \text{ dB}$. وتستخدم تقنية تنوع بسيطة ويكون إما الجزء الراديوي أو البصري الهجين نشطاً استناداً إلى القيم الآنية لتوهين المسير الراديوي والبصري. ويُفترض أن الجزء RF من النظام يخفف أحداث انعدام المطر، أما الجزء FSO فيخفف أحداث تساقط المطر. ويتم تقدير نسبة التيسر (AR) للنظام الهجين من إحصاءات المطر للجزء FSO، كما يتبين من الجدول 3.

الشكل 12

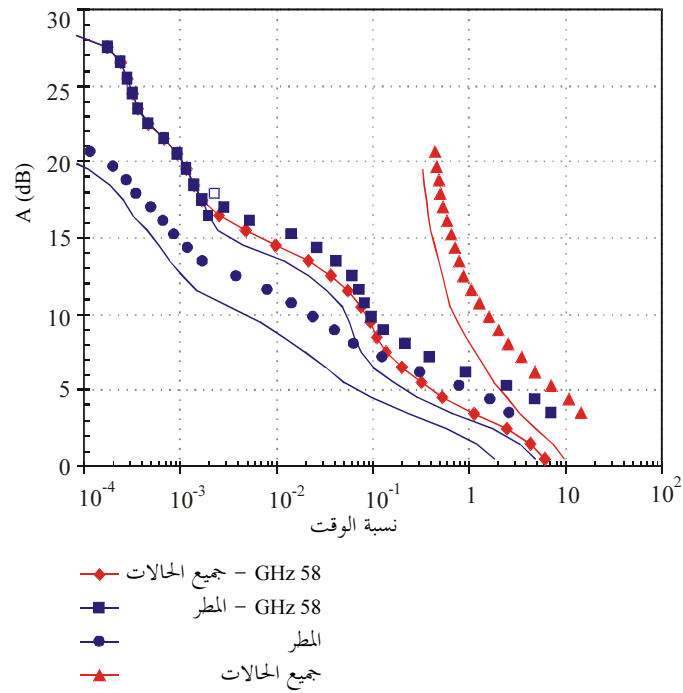
التوزيعات التراكمية للتوهين لشروط المسيرات المختلفة



1817-12

الشكل 13

التوهينان RF و FSO يتجاوزان نسب مئوية مختلفة من الوقت



1817-13

الجدول 3

مقارنة معدل التيسر للنظام RF وFSO والأنظمة RF/FSO المهجين الافتراضية

النظام	نسبة التيسر %
الجزء FSO (850 nm)	99,7
الجزء RF (58 GHz)	99,999
النظام RF/FSO	99,9999

12 قياس الرؤية

تحدّد الرؤية V (km) باعتبارها المسافة إلى الغرض حيث ينخفض بيان الصورة إلى 2% من قيمته الأصلية. وتقاس الرؤية عند 550 nm أي طول الموجة الذي يقابل الكثافة القصوى للطيف الشمسي ويتم الحصول عليها بعلاقة "كوشمايدر":

$$(12) \quad V(\text{km}) = \frac{3.912}{\gamma_{550 \text{ nm}}}$$

حيث $\gamma_{550 \text{ nm}}$ هو معامل خمود الوسط (الجو والرذاذات).

يستخدم نوعان من المحاسيس لقياس الرؤية: مقياس إنفاذية الجو (*transmissometer*) ومقياس الانتثار (*diffusimeter*).

ترد في الجدول التالي مدونة الرؤية الدولية التي تظهر التوهين (dB/km) لعدة حالات جووية:

- حالات الطقس التي تتراوح من فترات من الصحو التام إلى الضباب الكثيف.
- الأمطار (mm/h): الرذاذ والمطر والعواصف.
- الرؤية تتراوح بين 50 متراً و50 كيلو متراً.

مدونة الرؤية الدولية					
حالات الطقس	الأمطار		الرؤية (m)	التوهين (dB /km)	
	mm/h				
			0		
ضباب كثيف			50	315	
ضباب سميك			200	75	
ضباب معتدل			500	28.9	
ضباب خفيف	ثلج	عاصفة	100	770	
ضباب خفيف جداً				1 000	13.8
		مطر قوي	25	1 900	6.9
				2 000	6.6
غشاوة خفيفة		مطر متوسط	12.5	2 800	4.6
				4 000	3.1
غشاوة خفيفة جداً		مطر خفيف	2.5	5 900	2
				10 000	1.1
هواء نقي		رذاذ	0.25	18 100	0.6
				20 000	0.54
هواء نقي جداً			23 000	0.47	
			50 000	0.19	

التذييل 1

للملحق 1

نمذجة الحاسوب

انطلاقاً من الوصف النظري للظاهرة المادية، تم وضع عدد من البرامج الخاصة بنمذجة الحاسوب لتحديد معامل الإرسال الجوي. وهناك نماذج كثيرة متاحة حالياً: برامج LOWTRAN و NAM (نموذج الهباء البحري) و NOVAM و WKDAER في البيئات البحرية، إلخ. البرنامج NOVAM مدرج في MODTRAN و FASCOD، إلخ.

يتضمن البرنامج LOWTRAN نماذج عن توهين الإشارة البصرية بواسطة الأهباء. وهو يقوم على النموذج من خط تلو الخط و متاح من مؤسسة ONTAR (الولايات المتحدة الأمريكية).

ينطبق برنامج NAM تحديداً على البيئات البحرية. وهو يقوم على نموذج GATHMAN لتوزيع الهباء.

أما برنامج NOVAM فيأخذ في الاعتبار جسيمات الغبار القارية المنشأ.

يمكن تكييف البرنامج WKDAER مع بيئة محددة.

يستخدم البرنامج FASCOD نموذجاً من خط تلو خط ويأخذ في الاعتبار جميع المعلومات التي تتسم بها خطوط الامتصاص (الكثافة واحتمال الانتقال، إلخ). يقوم هذا البرنامج على قاعدة البيانات HITRAN الخاصة بالامتصاص الجزيئي عالي الاستبانة. والمعلومات الخطية الأساسية المدرجة في HITRAN هي تردد الطنين والكثافة الخطية عند 296 K واحتمال الانتقال ونصف عرض الخط عند 296 K والطاقة المنخفضة أو حالة الجزيء الأساسي.

هناك ثلاثة نماذج مترابطة وضعها مختبر الجيوفيزياء التابع للقوات الجوية (AFGDL) مع العديد من الاستبانة الطيفية:

- LOWTRAN 7 - إرسال باستبانة منخفضة - تبلغ الاستبانة الطيفية 20 cm^{-1} (مكافئ للقيمة 600 GHz) في خطوات تبلغ 5 cm^{-1} .
- MODTRAN 3 - إرسال باستبانة متوسطة - تبلغ الاستبانة الطيفية 2 cm^{-1} (مكافئ للقيمة 60 GHz) في خطوات تبلغ 1 cm^{-1} .
- HITRAN 2004 - إرسال باستبانة عالية - تبلغ الاستبانة الطيفية $0,001 \text{ cm}^{-1}$ (مكافئ للقيمة 30 MHz).

تتضمن جميع النماذج معلومات طيفية بشأن العديد من الأصناف الجوية بما في ذلك H_2O و O_3 و N_2O و CO و CH_4 و O_2 و NO و NO_2 و SO_2 و HNO_3 . (تتضمن قاعدة البيانات HITRAN تفاصيل بشأن أكثر من مليون خط امتصاص تتعلق بـ 37 جزيئاً). بالإضافة إلى ذلك، تتضمن النماذج الثلاثة تواصل H_2O عبر الطيف بأسره وتواصل N_2 في المنطقة التي تتراوح بين 2 000 و $2\,700 \text{ cm}^{-1}$ والانتثار الجزيئي، إلى جانب الامتصاص والانتثار الناجم عن الهباء والضباب والمطر والسحب.