التوصية ITU-R P.1814*

طرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم الوصلات البصرية للأرض في الفضاء الحر

(المسألة ITU-R 228/3)

(2007)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية الجديدة طرائق التنبؤ بالانتشار لتخطيط أنظمة بصرية أرضية في الفضاء الحر. وهي تضم طرائق لتقدير التوهين في الجو الصحو وفي الضباب وعند هطول الأمطار والثلوج. وهي تغطي كذلك التلألؤ والانحطاطات الناجمة عن ضوء الشمس.

إن جمعية الاتصالات الراديوية التابعة للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن طيف الأشعة البصرية المرئية وتحت الحمراء متيسر للاتصالات الراديوية في بيئات الأرض؛

ب) أنه من أجل التخطيط السليم لأنظمة الاتصالات الراديوية البصرية في الفضاء الحر (FSO) العاملة في طيف الأشعة البصرية المرئية وتحت الحمراء يستلزم الأمر وجود معطيات انتشار مناسبة؛

ج) أنه تم وضع طرائق تتيح حساب أكثر معلمات الانتشار أهمية والمطلوبة في تخطيط الأنظمة البصرية في الفضاء الحر العاملة في طيف الأشعة البصرية المرئية وتحت الحمراء؛

د) أن هذه الطرائق قد تم اختبارها إزاء المعطيات المتيسرة وأظهرت أنها تعطي دقة تعتبر متوافقة مع قابلية التغيّر الطبيعية لظواهر الانتشار وافية بالنسبة لمعظم التطبيقات الراهنة في تخطيط الأنظمة العاملة في طيف الأشعة البصرية المرئية وتحت الحمراء،

وإذ تدرك

أ) أن الرقم 78 من المادة 12 من دستور الاتحاد الدولي للاتصالات ينص على أن وظائف قطاع الاتصالات الراديوية تتضمن "... إجراء دراسات من دون تحديد لمدى الترددات، وباعتماد توصيات تتعلق بالاتصالات الراديوية ..."،

توصي

1 باعتماد طرائق التنبؤ بالانتشار الواردة في الملحق 1 لتخطيط أنظمة بصرية في الفضاء الحر ضمن مديات الصلاحية الخاصة المبينة في الملحق.

الملاحظة 1 – ترد في التوصية ITU-R P.1817 "معطيات الانتشار اللازمة لتصميم وصلات بصرية أرضية في الفضاء الحر" معلومات مكملة تتعلق بطرائق التنبؤ بالانتشار في طيف الأشعة البصرية المرئية وتحت الحمراء.

* ينبغي إحاطة لجنتي الدراسات 1 و9 التابعتين لقطاع الاتصالات الراديوية علماً بهذه التوصية.

الملحـــق 1

1 مقدمة

يجب أن يراعى عند تصميم وصلات FSO، العديد من التأثيرات بما في ذلك الخسارات الناجمة عن الامتصاص الجوي والانتثار والاضطراب والبيئة المناخية الصغرية والتأثيرات ذات الطابع المحلي ومسافة الوصلة وسوء تراصف الوصلة. ولا بد أيضاً من مراعاة اختيار طول الموجة ومعدل المعطيات وقضايا سلامة العين والإشعاع الشمسي المحيط.

ويحتاج تشغيل نظام FSO إلى خط بصر (LOS). وعند إجراء اختبار بخصوص خط البصر LOS، ولما كانت أنظمة FSO تستخدم عملية توسيع الحزمة وحزمة أشعة مسددة، فإن الخلوص المطلوب بين مركز الحزمة وأية عوائق يساوي في الأساس نصف قطر الحزمة. ويتباين هذا مع أنظمة الترددات الراديوية RF حيث يلزم خلوص منطقة فرينل.

ويتمثل العيب الرئيسي لأنظمة FSO في عرضتها للتأثيرات الجوية مثل التوهين والتلألؤ التي قد تخفض من تيسر الوصلة. كما أن الحزمة الضيقة تجعل من تراصف مطراف الاتصالات الليزرية أكثر حرجاً مما هو معتاد مع أنظمة الترددات الراديوية.

ومن المعلمات الرئيسية مراعاة ميزانية القدرة عند تصميم وصلات FSO. ويمكن الحصول على هامش الوصلة M_{link} (dB)، وهي القدرة المتيسرة فوق حساسية المستقبل، من المعادلة (1):

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system} \quad (1)$$

حيث:

P_e (dBm): القدرة الكلية لجهاز البث

S_r (dBm): حساسية المستقبل التي تعتمد أيضاً على عرض النطاق (معدل المعطيات)

A_{geo} (dB): التوهين الهندسي للوصلة العائد لانفراج حزمة الإرسال مع زيادة المدى

A_{atmo} (dB): التوهين الجوي العائد للامتصاص والانتثار

$A_{scintillation}$ (dB): التوهين العائد للاضطراب الجوي

A_{system} (dB): يمثل كل الخسارات الأخرى المتعلقة بالنظام بما فيها سوء تراصف اتجاه الحزمة والخسارات البصرية للمستقبل والخسارة الناجمة عن جنوح الحزمة وانخفاض الحساسية بسبب الضوء المحيط (إشعاع شمسي)، وما إلى ذلك.

ويرد تعريف وحساب هذه المصطلحات، فضلاً عن الاعتبارات الأولية لتخطيط وصلة FSO، في الأقسام التالية.

2 الاعتبارات الأولية عند تصميم وصلة FSO

يعتبر اختيار الموقع المناسب للوصلة من القضايا الهامة للتشغيل الناجح لنظام FSO. ويتعيّن في تركيب وصلات FSO مراعاة ظروف الطقس السائدة والعوائق المادية وأنماط السطح على امتداد المسير وترتيبات نصب المرسل المستقبل لضمان الأداء الأمثل للوصلة.

1.2 الطقس

– ظروف الطقس، لا سيما المناخ المحلي، في جوار المسير المختار للوصلة سيؤثر في الثلج والمطر والضباب الرذاذي والسديم والدخان والغبار/الرمل وجميعها تؤدي إلى امتصاص الإشارة المرسلة وانتثارها.

2.2 خصائص المسير

- يتعين تفادي العوائق المادية على المسير بين جهاز البث والمستقبل بشكل تام. وتجدر الإشارة إلى أن الأشجار المكتملة النمو يمكن أن تزداد ارتفاعاً بمقدار نصف متر إلى متر واحد في السنة الواحدة وأن كثافة أوراقها تختلف خلال السنة.
- يتعين على الوصلات بين المباني أن تأخذ في الحسبان فتحات التهوية الحرارية التي يمكن أن تطلق هواءً ساخناً متصاعداً عبر مسير الوصلة، حيث يمكن للاضطراب الناتج أن يؤدي إلى تلألؤ كبير عند المستقبل.
- يمكن لتضاريس الأرض ونمط السطح تحت مسير خط البصر لنظام FSO أن يؤثروا بشكل كبير على أداء الوصلة. فوصلات FSO عبر وديان الأنهار أو عبر مناطق البحار المفتوحة تعاني غالباً من حالات متزايدة من الضباب. فيما قد تسبب هياكل المباني الواقعة تحت الوصلة نشاطاً حرارياً إضافياً في الهواء فوقها وقد تتسبب بتلألؤ متزايد على الإشارة المستقبلة.

3.2 نصب المرسل المستقبل

- يكون لمعظم أنظمة FSO عرض حزمة ضيق جداً، ونتيجة لذلك يعتبر التراصف الدقيق بين جهاز البث والمستقبل أمراً حاسماً، إذ إن أي تراصف خاطئ يتسبب بخسارة كبيرة للإشارة. ويجب أن تكون قواعد التلسكوبات مستقرة، ومثبتة بشكل مباشر على جدار متين أو على قمة عمود من أجل الأداء الموثوق به خلال فترة من الزمن. وينبغي التخفيف إلى الحد الأدنى من الحركة الناجمة عن التمدد الحراري التفاضلي أو صدمات الريح.

3 التوهين الهندسي

حتى في ظروف الطقس الصحو، تتشتت الحزمة، ومن ثم يستقبل الكاشف قدراً أقل من قدرة الإشارة. ويسمى التوهين الناجم عن انتشار حزمة الإرسال مع ازدياد المدى بالتوهين الهندسي ويتم الحصول عليه بالمعادلة التالية:

$$A_{geo}(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{S_d}{S_{capture}}\right) \quad (2)$$

حيث:

$S_{capture}$: سطح الالتقاط للمستقبل (m^2)

S_d : مساحة سطح حزمة الإرسال عند المدى d الذي يحسب تقريباً كالتالي:

$$S_d = \frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2$$

حيث:

θ : تشتت الحزمة (mrad)

d : هي المسافة بين جهاز البث والمستقبل (km).

ويمكن لمساحة الالتقاط أن تكون أكبر من مساحة الحزمة في الوصلات القصيرة. وينبغي في هذه الحالات ضبط قيمة A_{geo} عند الصفر نظراً لتجميع كل طاقة الحزمة في هذه الحالة.

4 التوهين الجوي المحدد الناتج عن الامتصاص والانتشار γ_{atmo}

يمكن كتابة التوهين الجوي المحدد γ_{atmo} (dB/km) كناتج جمع مصطلحين كالتالي:

$$\gamma_{atmo} = \gamma_{clear_air} + \gamma_{excess} \quad (3)$$

حيث:

γ_{clear_air}: التوهين المحدد في الجو الصحو (نتيجة لوجود جزئيات غازية)

γ_{excess}: التوهين النوعي الناجم عن الوجود العارض للضباب والغشاوة الرطبة والسديم والرذاذ والأمطار والثلوج والبَرَد وما إلى ذلك.

يعتبر الجو وسط إرسال متغيّر الزمن ونتيجة لذلك يكون γ_{atmo} عبارة عن عملية عشوائية. بيد أن فرض حدود على تيسر النظام وتأثيراته، كما يتبين من المعادلة (1)، أمر يتم التعامل معه إحصائياً. ويمثل هامش الوصلة M_{link} كمية التوهين التي يمكن لنظام معين احتمالها في مدى معين.

1.4 التوهين المحدد للجو الصحو γ_{clear_air}

يعود التوهين في ظروف الجو الصحو بشكل أساسي إلى التوهين الناتج عن امتصاص الجزيئات الغازية. وينتج الامتصاص الجوي عند أطوال موجات بصرية محددة من التفاعل بين فوتونات وذرات أو جزيئات (N_2 وO_2 وH_2 وH_2O وCO_2 وO_2 وما إلى ذلك) مما يؤدي إلى امتصاص الفوتون الوارد وارتفاع في درجة الحرارة. ويتوقف معامل الامتصاص على:

- نمط الجزيئات الغازية؛
- وتركيزها.

وظاهرة الامتصاص الجزيئي عبارة عن ظاهرة انتقائية حسب طول الموجة ينشأ عنها نوافذ إرسال جوي ومناطق امتصاص جوي. وتشمل الجزيئات الجوية الهامة ذات الامتصاص العالي في نطاق الترددات تحت الحمراء IR الماء وCO_2 وO_3 وO_2.

ونظراً لأن حجم الجزيئات الغازية أصغر بكثير من طول الموجة، يهمل توهين الانتشار الناجم عن الجزيئات الغازية.

ويتم عادةً اختيار أطوال الموجات الليزرية لتندرج داخل نوافذ الإرسال الجوي ومن ثم يهمل γ_{clear_air}. وتقترب أطوال الموجات المستخدمة عامة في أنظمة FSO من 690 و780 و850 و1 550 nm. غير أنه بالمقارنة بالمواقع القريبة من الحضر وغير الملوثة نسبياً، قد تستفيد التطبيقات في المناطق الحضرية الكثيفة ذات المحتويات العالية من الدخان من طول موجه مختلف.

2.4 التوهين الزائد النوعي

التوهين الزائد هو التوهين الذي يسببه الوجود العارض لجسيمات الضباب والغشاوة الرطبة والسديم والرذاذ والأمطار والثلوج. ويتسبب وجود هذه الجسيمات في إعادة التوزيع الزاوي للتدفق الوارد، المعروف بالانتشار، وتخفض من انتشار التدفق في الاتجاه الأصلي. غير أنه لا توجد خسارة للطاقة مثلما الحال مع الامتصاص. ويحدد الحجم الفيزيائي للأجسام المؤدية للانتشار بالنسبة لطول موجة ليزر الإرسال نمط الانتشار. ويبيّن الجدول 1 نظم الانتشار الثلاثة طبقاً لحجم الجسم المؤدي للانتشار والعلاقة التقريبية بين طول الموجة ومعامل توهين الجسم المؤدي للانتشار (المقطع العرضي الفعال). كما يبين الجدول 1 نمط الأجسام المؤدية للانتشار في كل نظام بالنسبة لأطوال الموجات المرئية وتحت الحمراء.

الجدول 1

نظم الانتثار لبعد الجسم المنثر r بالنسبة لطول موجة ليزر الإرسال λ.
كما يبين العلاقة التقريبية بين طول الموجة ومعامل توهين
الجسم المؤدي للانتثار $Q(\lambda)$

	انتثار ريلي (Rayleigh)	انتثار ماي (Mie)	انتثار غير انتقائي أو هندسي
	$r << \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ إلى $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1.6}$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{0}$	$r >> \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{0}$
نمط الجسم المؤدي للانتثار	جزيئات الهواء سديم	سديم ضباب ضباب رذاذي	ضباب مطر ثلج برَد

تهمل مساهمة الانتثار الجزيئي للهواء في معامل التوهين الكلي بسبب علاقة $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$ لنظام ريلي.

وبالنسبة للجسميات الأكبر بكثير من طول الموجة، يمكن وصف الانتثار بالبصريات الهندسية المستقلة عن طول موجة الليزر. وسيحدث انتثار لضوء الليزر هندسياً بقطرات المطر والثلج والبرَد وقطرات السحاب الصغيرة والضباب الكثيف.

وبالنسبة للجزيئات التي تتساوى في حجمها مع طول موجة الليزر، يمكن تطبيق نظرية انتثار ماي (Mie). وتعد جسيمات الضباب والدخان هي المساهم الرئيسي في عملية انتثار ماي.

ويمكن استعمال نهج تحليلي تجرى فيه تنبؤات حسابية للتوهين النوعي استناداً إلى مقاطع عرضية فعالة، مشتقة نظرياً، لجسيمات جوية ذات توزيعات مفترضة لحجم الجسيم. غير أن توزيعات حجم الجسيم للدخان أو الضباب، وهي معلمة رئيسية للوقوف على خواصهما الفيزيائية والبصرية، يصعب نمذجتها وقياسها.

1.2.4 تقدير التوهين النوعي الناجم عن الضباب γ_{fog} (انتثار ماي)

نظراً لأن النهج التحليلي كثيراً ما لا يكون عملياً لحساب التوهين الناجم عن انتثار ماي، فقد اعتمد مجتمع FSO طرائق تجريبية يرتبط فيها معامل التوهين الناجم عن انتثار ماي بالرؤية.

وتعرف *الرؤية* أو مدى الرؤية تقنياً بالمسافة التي ينخفض عندها الضوء إلى 2% من القدرة الأصلية، أو نوعياً، بالمسافة التي يمكن عندها بالكاد تمييز غرض داكن نحو الأفق. وتُقاس معلمة الرؤية بسهولة وتخزن في قواعد بيانات محطات الأرصاد الجوية أو المطارات مما يسمح بتقييم للأداء المحلي الجغرافي لأنظمة الاتصالات هذه باستعمال توزيع هذه المعلمة. غير أن بيانات الرؤية المجمعة في المطارات لا تمثل بالضرورة الظروف القائمة في البيئة الحضرية أو البيئة الريفية التي يمكن أن تختلف جداً من حيث التضاريس والقرب من الماء.

والمعادلة المبسطة التجريبية التي دأب مجتمع FSO على استعمالها لحساب التوهين النوعي الناجم عن الضباب $\gamma_{fog}(\lambda)$ (dB/km) هي:

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3.91}{V}\left(\frac{\lambda}{550nm}\right)^{-q} \quad (4)$$

حيث:

V: الرؤية (km)

λ: طول الموجة (nm)

q: معامل يعتمد على توزيع الحجم لجسيمات الانتثار. وقد تم تحديده من المعطيات التجريبية ويمكن الحصول عليه كالتالي:

$$\begin{aligned} q &= 1.6 && \text{V} > 50 \text{ km} \\ &= 1.3 && 6 \text{ km} < \text{V} < 50 \text{ km} \\ &= 0.585 V^{1/3} && \text{V} < 6 \text{ km} \end{aligned} \tag{5}$$

وللحصول على قيمة التوهين المتجاوَزة خلال نسبة مئوية من الوقت p (أي بالنسبة إلى احتمال معيّن)، تلزم قيمة الرؤية غير المتجاوزة خلال هذه النسبة المئوية من الوقت p للمعادلة (4).

2.2.4 التوهين النوعي الناجم عن المطر γ_{rain}

يعطى التوهين النوعي الناجم عن المطر γ_{rain} (dB/km) بالعلاقة:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^{\alpha} \tag{6}$$

وتقدم التوصية ITU-R P.837 معدل هطول المطر $R(p)$ (mm/h) المتجاوَز لأي نسبة مئوية معينة للسنة المتوسطة، p، ولأي موقع، وتقدم المعادلة (6) التوهين النوعي المتجاوَز خلال النسبة المئوية p من الوقت.

وتعتمد المعلمتان k وα على خصائص المطر، وترد بعض القيم المحددة من القياسات في الجدول 2. ويبين الشكلان 1 و2 العلاقة بين γ_{rain} ومعدل هطول المطر R باستعمال المعلمات الواردة في الجدول 2 بالنسبة لليابان.

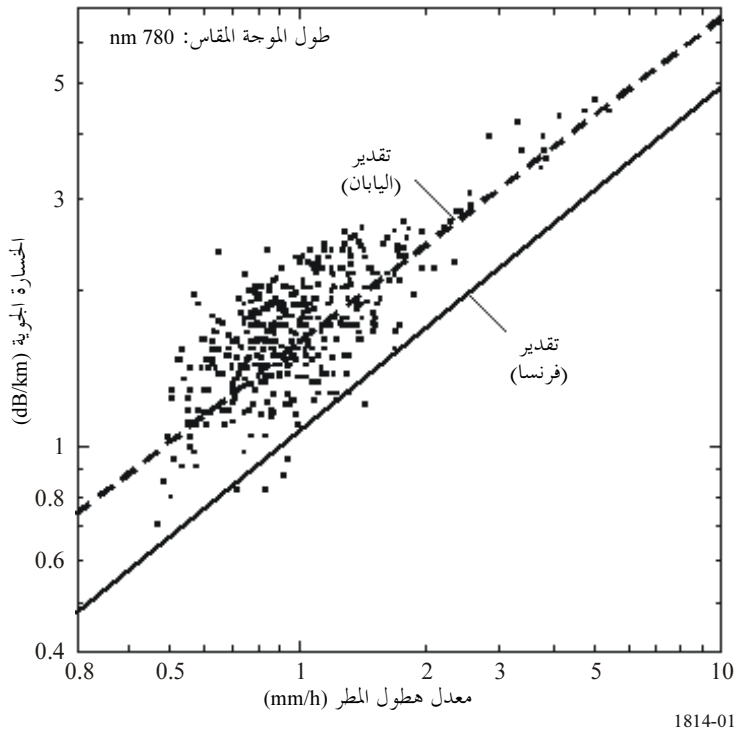
الجدول 2

المعلمات المستعملة لتقدير التوهين النوعي الناجم عن المطر

الموقع	k	α
اليابان	1,58	0,63
فرنسا	1,076	0,67

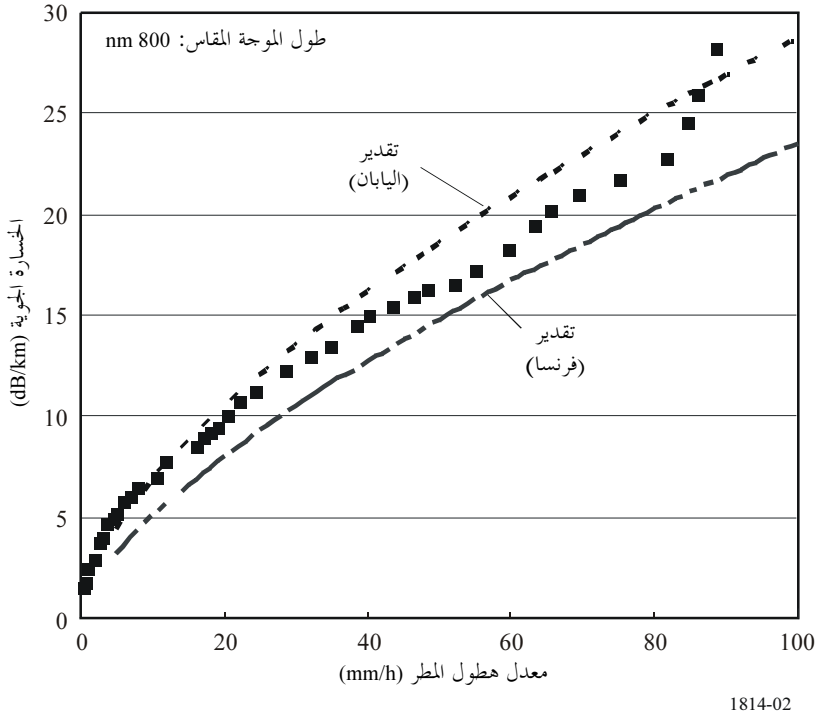
الشكل 1

التوهين الجوي الناجم عن المطر



الشكل 2

التوهين الجوي الناجم عن المطر



3.2.4 التوهين النوعي الناجم عن الثلوج γ_{snow}

يمكن الحصول على التوهين بدلالة معدل هطول الثلوج من العلاقة التالية:

$$\gamma_{snow} = \alpha \cdot S^b \quad (7)$$

حيث:

γ_{snow}: التوهين النوعي الناجم عن الثلوج (dB/km)

S: معدل هطول الثلوج (mm/h)

α وb: دالتان في طول الموجة، (nm) λ. وترد القيم المقدرة للثلوج الرطبة والجافة في الجدول 3.

الجدول 3

المعلمات المستعملة لتقدير التوهين النوعي الناجم عن الثلوج

	α	b
الثلوج الرطبة	0,000102λ + 3,79	0,72
الثلوج الجافة	0,00005420λ + 5,50	1,38

5 تأثيرات التلألؤ

يعد التلألؤ الجوي الناجم عن الاضطراب الذي يسبب تقلبات حادة في قدرة الإشارة المستقبلة هو العملية الجوية الرئيسية الثانية التي تؤثر بأداء أنظمة الاتصالات الليزرية.

وينتج الاضطراب الجوي جيوب هواء مؤقتة تختلف اختلافاً طفيفاً في حرارتها وكثافتها وأدلة انكسارها. ويمكن فقد المعطيات بسبب جنوح الحزمة والتلألؤ حيث تتشوه الحزمة الليزرية عند انتشارها عبر أدلة الانكسار غير المتجانسة تلك. وتعتمد أهمية كل تأثير على حجم خلايا الاضطراب هذه بالنسبة لقطر الحزمة الليزرية.

فإذا كانت أحجام خلايا الاضطراب أكبر من قطر الحزمة، يحدث انحناء للحزمة الليزرية ككل عشوائياً مما يؤدي إلى خسارة الإشارة إن جنحت الحزمة بعيداً عن فتحة المستقبل. ويكون جنوح الحزمة بالنسبة لأطوال الموجة الأطول أقل منه بالنسبة لأطوال الموجة الأقصر، رغم ضعف اعتماد هذه الظاهرة على طول الموجة.

وبتعميم أكبر، إذا كانت أحجام خلايا الاضطراب أصغر من قطر الحزمة، فإن الانحناء الشعاعي والانعراج يحدثان تشوهات في واجهة موجة الحزمة الليزرية. ويتسبب ذلك بتقلبات مؤقتة في شدة الحزمة الليزرية، تُعرف بالتلألؤ، عند المستقبل بتردد من 0,01 Hz إلى 200 Hz.

وتتم دراسة تأثيرات التلألؤ التروبوسفيري عموماً من لوغاريتم الاتساع χ (dB) للإشارة المرصودة ("لوغاريتم الاتساع") المعرّف بالنسبة بالديسيبل بين اتساعها اللحظي وقيمتها المتوسطة. وتزداد الشدة ومعدل التقلب (تردد التلألؤ) مع طول الموجة. وبالنسبة لموجة مستوية واضطراب ضعيف، يمكن التعبير عن تغاير التلألؤ σ_x^2 (dB^2) بالعلاقة التالية:

$$\sigma_\chi^2 = 23.17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (8)$$

حيث:

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$: الرقم الموجي، (m^{-1})

L: طول الوصلة، (m)

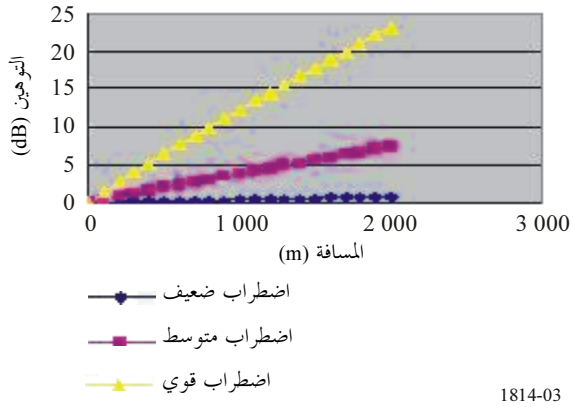
C_n^2: معلمة بنية دليل الانكسار ($m^{-2/3}$).

وللتلألؤات ذروة اتساع قدرها $4\sigma_\chi$، والتوهين الناجم عن هذا التلألؤ هو $2\sigma_\chi$. وبالنسبة للاضطراب القوي، يُلحظ تشبع للتغاير المحسوب بالعلاقة أعلاه. وتختلف قيمة معلمة C_n^2 في أطوال الموجة البصرية عنها في أطوال الموجة المليمترية. إذ إن التلألؤ في أطوال الموجة المليمترية مردّه بالدرجة الأولى إلى تقلبات الرطوبة، في حين أن التلألؤ في أطوال الموجة البصرية هو رهن بالحرارة بالدرجة الأولى. وفي أطوال الموجة المليمترية، حيث C_n^2 تساوي 10^{-13} $m^{-2/3}$ تقريباً (عموماً، في أطوال الموجة المليمترية، تتراوح قيمة C_n^2 بين 10^{-14} و10^{-12} $m^{-2/3}$)، وفي أطوال الموجة البصرية، حيث C_n^2 تساوي 2×10^{-15} $m^{-2/3}$ تقريباً بالنسبة للاضطراب الضعيف (عموماً، في أطوال الموجة البصرية، تتراوح قيمة C_n^2 بين 10^{-16} و10^{-13} $m^{-2/3}$).

ويبين الشكل 3 تغيّر توهين حزمة بصرية طول موجتها 1 550 nm بالنسبة لاضطراب ضعيف ومتوسط وقوي على مسافات قد تصل إلى 2 000 m. ومن الواضح أن التوهين يزداد بازدياد الاضطراب. ويبين الجدول 4 أثر الاضطراب على انتشار الموجات البصرية والراديوية. ويزداد التلألؤ قوة عند أطوال الموجات البصرية الأطول.

الشكل 3

تغيّر التوهين الناجم عن التلألؤ وفق المسافة لمختلف أنماط الاضطراب عند 1 550 nm



الجدول 4

جدول أعماق خبو التلألؤ المتوقعة لمسير طوله 1 km

	الاضطراب		
	المنخفض	المعتدل	العالي
C_n^2 موجات بصرية ($m^{-2/3}$)	10^{-16}	10^{-14}	10^{-13}
توهين (0,98 µm) (dB)	0,51	5,06	16,00
توهين (1,55 µm) (dB)	0,39	3,87	12,25
C_n^2 موجات ميلي مترية ($m^{-2/3}$)	10^{-15}	10^{-13}	10^{-12}
توهين (40 GHz) (dB)	0,03	0,09	0,27
توهين (60 GHz) (dB)	0,03	0,11	0,35

يمكن خفض التلألؤ باستعمال إما حزم إرسال متعددة أو فتحات مستقبل كبيرة. وينبغي أيضاً للحد من تأثيرات التلألؤ على مسير الإرسال، عدم تركيب أنظمة FSO على مقربة من الأسطح الساخنة. ونظراً لأن التلألؤ يتناقص مع الارتفاع، يوصى بتركيب أنظمة FSO أعلى قليلاً من سطح البناء (بأكثر من 1 m) وبعيداً عن الحوائط الجانبية إن كان التركيب جارٍ في بيئة شبه صحراوية.

ويمكن أيضاً للهوامش المخصصة لمعادلة تأثيرات التوهين الناجم عن الضباب أو المطر أن تعادل تأثيرات التلألؤ.

6 أثر الضوء المحيط

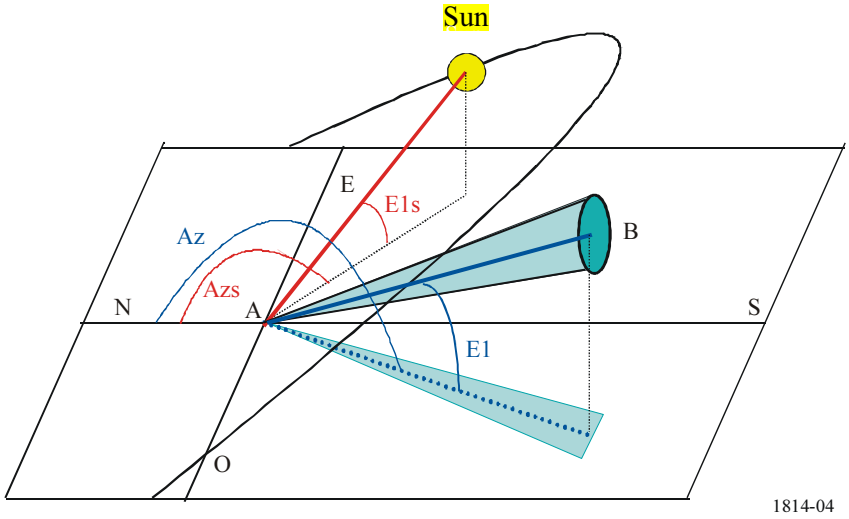
يحدث الاقتران الشمسي عندما تكون الشمس أو صورة منعكسة عن الشمس في أو قريبة من مجال الرؤية اللحظي (IFOV) لمستقبل بصري. ومجال IFOV المستقبل كبير عموماً بكبر انحراف المرسل على الأقل. وتستفحل المشكلة عندما يكون موضع الشمس موازياً للوصلة البصرية وتصبح قدرة الشمس المتغلغلة داخل المستقبل أكبر من القدرة المستقبلة من جهاز البث.

ويتم الحد من التداخل الشمسي عادةً بترتيب وضع المستقبل بحيث تنحرف الشمس عن المحور دوماً.

ويمثل الشكل 4 هندسة مسير الشمس في السماء بالنسبة لوصلة بصرية في الفضاء الحر (A هو المستقبل وB هو جهاز البث).

الشكل 4

رسم تخطيطي لمسير الشمس بالنسبة لوصلة بصرية في الفضاء الحر



تُحدد القدرة المشعة من الشمس، $P_{radiated}$ (W/m^2) بالعلاقة التالية:

$$P_{radiated} = 1\,200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{ls}\right) \tag{9}$$

حيث E_{ls} هو ارتفاع الشمس (rad).

ويمكن الحصول على القدرة المستقبلة بالعلاقة:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100 \tag{10}$$

حيث:

F_{solar} : القدرة الطيفية الشمسية كدالة في طول الموجة

$S_{capture}$: مساحة سطح التقاط المستقبل (m^2)

$W_{receiver}$: عرض نطاق المستقبل (nm)

F_{solar}: يتم نمذجتها بتطابق المنحني التالي:

$$F_{solar} = 8.97\times10^{-13}\lambda^5 - 4.65\times10^{-9}\lambda^4 + 9.37\times10^{-6}\lambda^3 - 9.067\times10^{-3}\lambda^2 + 4.05\lambda - 5.70 \quad (11)$$

حيث:

λ: طول الموجة (nm).

7 حساب هامش الوصلة

يمكن تقدير هامش خبو الوصلة لنظام FSO بمستقبل على مسافة d (km) من جهاز البث باتباع الخطوات التالية:

الخطوة 1: يمكن الحصول على التوهين الهندسي A_{geo} من المعادلة (1).

الخطوة 2: يتم اختيار أطوال الموجات الليزرية عادةً بحيث تقع داخل نوافذ الإرسال الجوية ومن ثم يمكن إهمال التوهين γ_{clear_air}. غير أنه يمكن الحصول على تقديرات التوهين النوعي في الجو الصحو من التوصية ITU-R P.1817.

الخطوة 3: يمكن الحصول على التوهين النوعي الناجم عن الضباب γ_{fog} من المعادلتين (4) و(5). وفي حالة عدم وجود معطيات محلية، يمكن العثور على القيم النمطية للرؤية في التوصية ITU-R P.1817.

الخطوة 4: يمكن الحصول على التوهين النوعي الناجم عن المطر γ_{rain} من المعادلة (6) والجدول 2.

الخطوة 5: يمكن الحصول على التوهين النوعي الناجم عن الثلوج γ_{snow} من المعادلة (7) والجدول 3.

الخطوة 6: يمكن الحصول على هامش الخبو M_{link} بوحدة dB بالعلاقة التالية:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear_air}\cdot d - \gamma_{fog}\cdot d - \gamma_{rain}\cdot d - \gamma_{snow}\cdot d$$

حيث:

P_e (dBm): القدرة الكلية لجهاز البث

S_r (dBm): حساسية المستقبل

A_{system} (dB): يمثل كل الخسارات الأخرى المرتبطة بالنظام. وهي تتضمن الخسارة الناجمة عن التراصف الخاطئ للوصلة والخسارة البصرية للمستقبل وخسارة جنوح الحزمة وتوهين الضوء المحيط (الإشعاع الشمسي) وما إلى ذلك.

8 قضايا أخرى

هناك عوامل أخرى ينبغي أن تؤخذ في الحسبان عند تصميم نظام FSO من بينها الآتي:

تقيد لوائح السلامة الدولية بصرامة الحد الأقصى لقدرة خرج الأنظمة البصرية. فعند طول موجة قدره 1 550 nm، تسمح الوكالات التنظيمية بما يقارب من 100 ضعف من القدرة عما هو مسموح لأطوال الموجات الأقصر "الآمنة للعين". والعيب الأساسي لهذا النمط من الليزر هو كلفته مقارنة بأشعة ليزر ذات أطوال الموجة الأقصر العاملة حول 850 nm.

ويمكن وضع مرسلات مستقبلات FSO خلف النوافذ. وتُعتبر الزاوية التي تشكلها الحزمة مع النافذة حرجة. إذ ينبغي أن تكون هذه الزاوية كلما أمكن عمودية لكن مائلة بزاوية صغيرة (5 درجات) للحد من ارتداد الحزمة إلى مستقبلها. كما أن

بعض النوافذ تحتوي على زجاج أو طبقات طلاء زجاجية تخفف من السطوع. ولأن هذه النوافذ كثيراً ما تُصمم خصيصاً كي تنبذ الأشعة تحت الحمراء، فإن طبقات الطلاء هذه يمكنها تقليل الإشارة بمقدار 60% أو أكثر.

وتقلل الرؤية المنخفضة من فعالية أنظمة FSO وتيسرها. وقد تحدث الرؤية المنخفضة خلال فترة محددة أثناء السنة أو اليوم، وقد تكون ظاهرة محلية (ضباب ساحلي). ومن بين الحلول التي يمكن استخدامها للحد من الأثر السلبي للرؤية المنخفضة تقصير المسافة بين المطاريف مما يوفر هامش وصلة أكبر للتعامل مع ظروف الطقس السيئ.

_____