التقريـــر ITU-R F.2106

تطبيقات الخدمة الثابتة التي تستعمل وصلات بصرية في الفضاء الحر

(المسألة ITU-R 237/9)

(2007)

مجال التطبيق

يقدم هذا التقرير رداً على المسألة ITU-R 237/9 المتعلقة بالوصلات البصرية في الفضاء الحر (FSOL) لأغراض تطبيقات الخدمة الثابتة.

وتعرض الفقرات التالية خصائص التجهيزات والتطبيقات الممكنة للخدمة الثابتة وكذلك الجوانب التقنية والتشغيلية للإرسال البصري في الفضاء الحر (انظر الملاحظتين 1 و2).

الملاحظة 1 – يركز الإرسال في الفضاء الحر موضوع هذا التقرير على الاستعمال في الخلاء.

الملاحظة 2 – إن التوصيل البصري في الفضاء الحر بين محطة مركزية ومطاريف متنقلة/جوالة يشكل شبكة محلية لا سلكية تقع خارج نطاق تطبيق هذا التقرير الذي يغطي مع ذلك الوصلات الثابتة بين المحطات المركزية.

المختصرات

AAC: التحكم الأوتوماتي في التوهين

APD: ثنائي المساري ضوئي متسلسل

FSO: نظام بصري في الفضاء الحر (لا سلكي)

LD: ثنائي المساري ليزري

المراجع

التوصيات الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R F.1668 – أهداف الأداء من حيث الأخطاء للوصلات اللاسلكية الرقمية الثابتة الحقيقية المستخدمة في مسيرات ووصلات مرجعية افتراضية بطول 500 27 km

التوصية ITU-R F.1703 – أهداف التيسر للوصلات اللاسلكية الثابتة الرقمية الحقيقية المستخدمة في مسيرات ووصلات مرجعية افتراضية يبلغ طولها 500 27 km

التوصية ITU-R P.1814 – طرائق التنبؤ المطلوبة لتصميم الوصلات البصرية للأرض في الفضاء الحر

التوصية ITU-R P.1817 – معطيات الانتشار المطلوبة لتصميم الوصلات البصرية للأرض في الفضاء الحر

التوصيات الصادرة عن قطاع تقييس الاتصالات في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-T G.640 – السطوح البينية المشتركة في الموقع والمتوائمة طولياً للأنظمة البصرية في الفضاء الحر

التوصية ITU-T G.692 – السطوح البينية البصرية للأنظمة متعددة القنوات مع مكبرات بصرية.

1 مقدمة

أصبحت الوصلات البصرية في الفضاء الحر (FSOL) مؤخراً وسيط نقل جذاباً في التطبيقات الثابتة قصيرة المدى. ومن مزاياها:

- تيسر الإرسال عريض النطاق؛
- صغر حجم تجهيزات الإرسال/الاستقبال؛
- قلة الحاجة إلى التنسيق من أجل تجنب التداخل بين الوصلات FSOL.

وحرصاً على توسيع تطبيقات هذه الوصلات (FSOL) حالياً ومستقبلاً، لا بد من تناول جوانبها التقنية والتشغيلية بالدراسة من خلال تحليلات نظرية ومقاربات تجريبية على حد سواء كما يرد في هذا التقرير.

2 وصف تشكيلة النظام والمعلمات الأساسية

1.2 مقدمة

1.1.2 جهة المرسل

1.1.1.2 منطقة الإرسال، E_a

منطقة الإرسال، E_a، هي مساحة نافذة الإرسال وتقدر بالأمتار المربعة (m^2).

ومنطقة الإرسال معلمة تستخدم في تحديد صنف سلامة الليزر.

2.1.1.2 قدرة الإرسال، E_p

قدرة الإرسال، E_p، هي القدرة المرسلة في منطقة الإرسال، E_a، وتقدر إما بالوحدات dBm أو بالوحدات mW. وهي إحدى المعلمتين المستخدمتين في تحديد صنف سلامة الليزر وفي حساب هامش حماية الوصلة. وينبغي إجراء قياسات القدرة خارج نظام الإرسال البصري في الفضاء الحر، وأقرب ما يمكن من نوافذ الإرسال البصري في الفضاء الحر (FSO). وتُجرى القياسات إن أمكن بإرسال "0" و"1" بنفس درجة احتمال ظهورهما. والقدرة هي متوسط قيمة أعلى قيمة (البتة "1") وأقل قيمة (البتة "0").

ومن الضروري لأغراض السلامة تحديد دقة قياسات القدرة، مثال: $E_p = 10$ dBm ± 1 dB.

ولأغراض السلامة أيضاً، وإذا كان المطراف مزوداً بتسوية تباعد أتوماتية تتحدد قدرة الإرسال بأقل قيمة تباعد، وتكون أقصى قدرة إرسال في المطراف ذي التحكم الأتوماتي في قدرة الإرسال (ATPC) هي الحد الأقصى لقيمة قدرة الإرسال.

وفيما يتعلق بالمطاريف ذات النظام متعدد الحزم يستحسن الإشارة إلى قدرة الإرسال في كل منطقة إرسال وفي إجمالي القدرة (مجموع الحزم mW). والقدرة الكلية للإرسال هي القدرة E_p لكل مطراف إرسال عند تقارب جميع الحزم، وتستخدم هذه المعلمة لأغراض السلامة. كما يستحسن الإشارة إلى المسافة الفاصلة بين منطقتين E_a وتباعد الحزم.

وفيما يتعلق بالمطاريف ذات الموزع البصري ثلاثي الأبعاد وللتوصل إلى مصدر كبير التوسع من أجل إتاحة سوية عالية من فعالية الإرسال مع منطقة توزيع مضبوطة وزيادة فعالية الإرسال مع تشكيلة من الصنف 1 (طبقاً للمعيار IEC 60825-1 [3])، ينبغي الإشارة إلى القدرة E_p للمنطقة E_a.

3.1.1.2 تباعد الحزم، B_d أو θ

تباعد الحزم، B_d، هو أعلى قيمة للزاوية المحصورة بين المحور المركزي للحزمة الذي يقابل أعلى كثافة قدرة وبين الاتجاه الذي يقابل كثافة قدرة أقل بمقدار –3 dB.

وهذه القيمة هامة لتحديد صنف سلامة الليزر وفي حساب هامش حماية الوصلة. وتقدر القيمة بنصف زاوية أو زاوية كاملة، لكن ينبغي تحديد ذلك في جميع الأحوال. وتقدر الوحدة عادة بالميليراديان (mrad). وفي حالة تسوية التباعد ينبغي بيان القيمتين القصوى والدنيا.

4.1.1.2 طول الموجة، W_a أو λ

طول الموجة W_a أو λ هو طول الموجة المركزية وعرضها الكامل على نصف الارتفاع (FWHM). وقيمة طول الموجة المركزية هام أيضاً لحساب صنف سلامة الليزر. وتقدر الوحدة بالنانومتر (مثل: λ = 849 ± 2 nm).

وفي حالة إرسال متعدد بتقسيم طول الموجة (WDM) قد يكون من الأسهل الإشارة إلى المدى الطيفي.

5.1.1.2 صنف سلامة الليزر

يتحدد صنف سلامة المطراف البصري في الفضاء الحر (FSO) وفقاً للمرجع المعياري IEC 60825 ويتحكم فيه عبر محوِّل. ويفضل صنف السلامة 1 أو 1M للمطاريف FSO.

2.1.2 جهة المستقبل

1.2.1.2 منطقة الاستقبال، R_a

منطقة الاستقبال، R_a، هي منطقة الاستقبال الكاملة أو مساحة نافذة الاستقبال وتقدر بالأمتار المربعة (m^2).

2.2.1.2 الحساسية، S_e

الحساسية، S_e، هي أدنى سوية بصرية لنوعية إرسال المعطيات (مثلاً نسبة أخطاء البتات (BER) أفضل من 10^{-6}؛ أي $BER \geq 10^{-6}$).

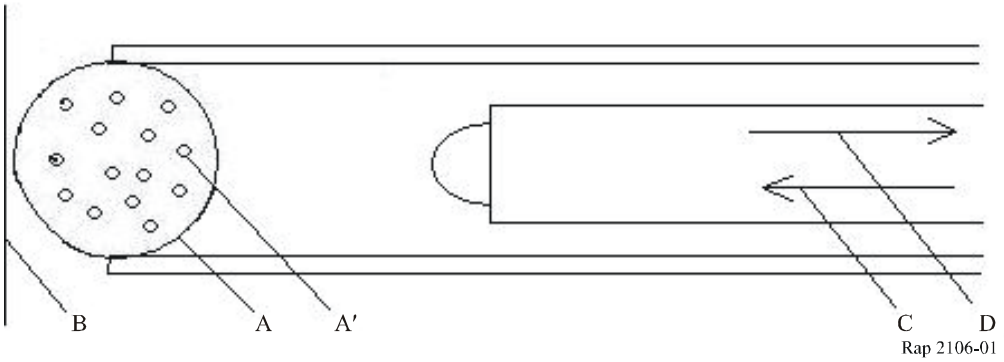
وتكون الوحدة dBm ويجري القياس بالقرب من نافذة المستقبل FSO.

وإذا كان المطراف مزوداً بنوافذ متعددة الاستقبال ينبغي بيان الحساسية S_e في كل منطقة R_a والحساسية الإجمالية.

أما إذا كان المطراف مزوداً بنظام استقبال مشكل من كرة صغرية، A، مملوءة بعناصر الملء 'A وفقاً لطول موجة الطنين للحزمة الواردة، B، الموضوعة بمواجهة مرسِل الليزر، C، مع طول موجة محددة وقدرة قابلة للضبط تعطي طاقة مساهمة في الوصلة بنفس تردد طنين عناصر الملء التي تتضمنها الكرات الصغرية؛ وحساسية المطراف، D، S_e، هي حساسية نظام له نفس النوعية المعينة لإرسال المعطيات (الشكل 1).

الشـــكل 1

مطراف مزود بكرة صغرية



Rap 2106-01

3.2.1.2 حساسية التشبع، S_s

حساسية التشبع، S_s، هي أقصى سوية بصرية لنوعية إرسال المعطيات (مثال، النسبة BER أفضل من 10^{-6}؛ أي $BER \geq 10^{-6}$؛ وذلك مع أو دون تحكم أوتوماتي في التوهين (AAC).

وتقدر حساسية التشبع بالوحدات dBm، ويجري القياس بالقرب من نوافذ الاستقبال FSO.

وإذا كان المطراف مزوداً بنوافذ متعددة المستقبلات ينبغي بيان الحساسية، S_e، في كل منطقة R_a، وكذلك الحساسية الإجمالية.

والفرق بين حساسية التشبع (مع تحكم AAC إن وجد) والحساسية المقيسة هو المدى الدينامي.

4.2.1.2 مجال الرؤية، F_v

مجال الرؤية، F_v، هو الزاوية الواقعة بين المحور المركزي واتجاه زاوية عند −3 dB. وتقدر القيمة بنصف الزاوية أو الزاوية الكاملة، وينبغي تحديدها في جميع الأحوال. وتقدر بالميليراديان (mrad).

5.2.1.2 خسارة النظام، SI

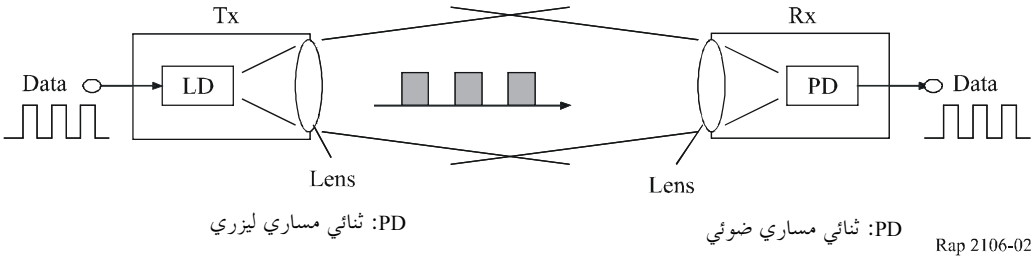
يستعمل هذا العنصر كدلالة ولا يستعمل لأغراض صنف سلامة الليزر وحساب هامش حماية الوصلة، وذلك بسبب نقاط قياس الإرسال والاستقبال. وتقدر الوحدة بالديسبل (dB).

2.2 تشكيلة النظام

يبين الشكل 2 التشكيلة الأساسية للوصلة البصرية في الفضاء الحر (FSOL) لتطبيقات الخدمة الثابتة.

الشـــكل 2

تشكيلة أساسية لوصلة FSOL



وفي الكثير من الوصلات FSOL تستخدم وظيفة التحويل كهربائي/بصري (E/O) أو بصري/كهربائي (O/E) في ثنائي المساري الليزري في المرسل وفي ثنائي المساري الضوئي في المستقبل على التوالي. وحديثاً اعتمدت بعض الأنظمة التقنية WDM التي تتيح استعمال عدة موجات حاملة بصرية في زوج من المرسلات والمستقبلات من أجل زيادة استطاعة الوصلة [1] [2]. غير أن الأنظمة WDM تحتاج إلى مزيد من التطوير وخاصة فيما يتعلق بتكنولوجيا مراشيح التفريغ جهة الاستقبال من وجهة نظر اقتصادية.

وتستعمل التجهيزات تشكيل حزمة الليزر لتبادل المعطيات الاثنينية في كلا الاتجاهين عبر زوج المرسل/المستقبل (ثنائي مساري ليزري/APD أو ثنائي مساري PIN) في كل طرف. وتعمل التجهيزات في وصلات ثنائية من نقطة إلى نقطة وفي خط البصر (LoS).

ويشمل كل تجهيز عدة وحدات هي:

- للإرسال:

أ) السطح البيني الرافد: كهربائي أو بصري من أجل إرسال المعطيات الرقمية واستقبالها؛

ب) وحدة التحويل E/O (في حالة السطح البيني البصري)؛

ج) ترشيح الإشارة الرقمية الكهربائية وتكبيرها؛

د) وحدة الإرسال البصري وتضم الليزري.

– للاستقبال:

أ) وحدة الاستقبال البصري وتضم الثنائي المساري؛

ب) ترشيح الإشارة الرقمية الكهربائية وتكبيرها؛

ج) وحدة التحويل O/E (في حالة السطح البيني البصري)؛

د) السطح البيني الرافد: الكهربائي أو البصري لإرسال المعطيات الرقمية واستقبالها.

ويضم التجهيز أحياناً برنامج إدارة يتيح إظهار تشكيلة الوصلة والحصول على معلومات نوعية وكمية من الوحدات المختلفة.

وهناك وظائف أخرى تختلف باختلاف المصنع ومنها:

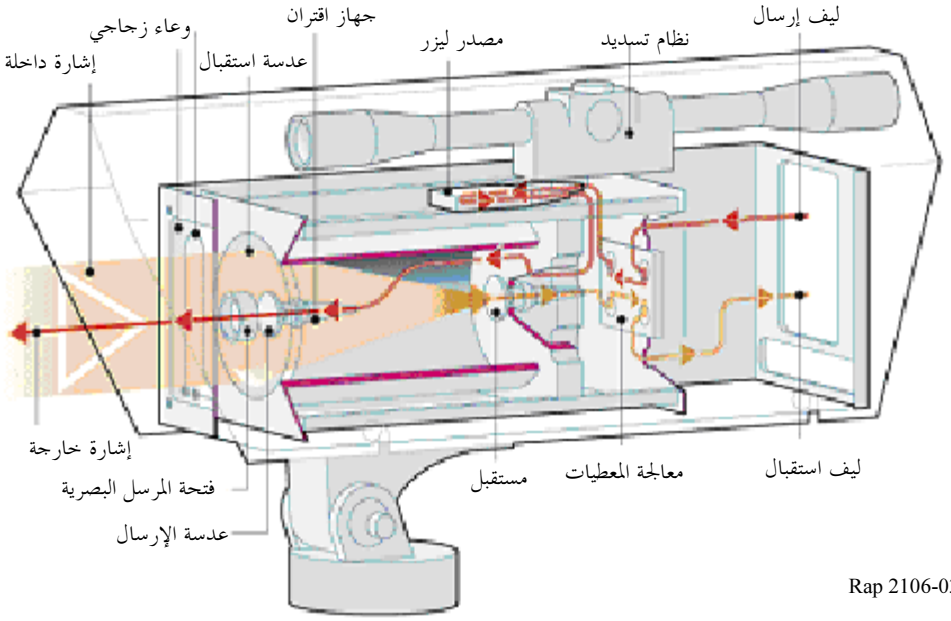
– نظام تتبع، تحكم ATPC، تحكم AAC؛

– وصلة مساعدة راديوية بمعدل محدود في حالة انقطاع وصلة الليزر.

ويقدم الشكل 3 مثالاً لبنية تجهيزات الإرسال البصري في الفضاء الحر.

الشـــكل 3

مثال لمطراف FSO (وفقاً للنفاذ البصري، سان دييغو، الولايات المتحدة)



3.2 معلمات النظام الأساسية

المعلمات الرئيسية التي ينبغي مراعاتها في تعريف الوصلات البصرية هي التالية:

المدى: يتغير تبعاً للتجهيزات من عشرات الأمتار إلى عدة كيلومترات. ويقدم بعض المصنعين أقصى مدى، ويحدد آخرون المدى النمطي لكل حالة من حالات الطقس المختلفة، بينما يقترح مصنعون آخرون مدى "يوصى به" وهو يضم هامشاً ما نسبةً إلى القيمة القصوى. ويجب اعتبار هذه القيم مراتب متدرجة وليس قيماً مطلقة.

السلامة: ثمة عامل هام في هذا السياق هو فئة الليزر في التجهيزات. لأن طرق تركيب وصلة بصرية في الفضاء الحر وصيانتها تختلف في درجة صعوبتها. وينبغي عند تحديد فئة الليزر مراعاة المعلمات التالية: طول موجة الإشارة وقيم القدرة المستخدمة وشكل الحزمة. ويوصى باختيار مطاريف من الفئة 1 أو 1M قائمة على أساس المرجع المعياري IEC 60825-1.

معدل المعطيات ونمط التطبيق الموصى به: هناك أنظمة عديدة تقبل أي معدل معطيات وأي بروتوكول؛ لكن غالباً ما يبقى مدى معدل المعطيات هاماً نسبياً. ولذا تتوقف التطبيقات على الاستطاعة القصوى لإرسال النظام، وتقع في تطبيقات الاتصالات أو معالجة المعطيات. وعلى سبيل المثال، سيكون النظام الذي يقبل بمعدل يصل إلى 200 Mbit/s قادراً على إرسال إشارات STM-1 وATM وFDDI أو Fast Ethernet. وتخصص مطاريف أخرى لمعدل معطيات أو سطح بيني وبالتالي لاستعمال معين مثل الإشارات E1 (2,048 Mbit/s) أو معطيات إثرنت (10 Mbit/s).

الترددات/أطوال الموجات المستخدمة في الوصلات FSOL: ثمة حيزان رئيسيان من مدى الترددات/أطوال الموجات يستعملان على نطاق واسع في تطبيقات الوصلات FSOL وهما: المدى 230-200 300/THz 1 500-1 nm والمدى 230-200 300/THz 1 500-1 nm. ويتميز هذان الحيزان من المدى نسبةً إلى غيرها من الأمدية بأن الامتصاص الجوي في الفضاء الحر ضئيل نسبياً. كما أن خصائص الإرسال في أنظمة الألياف البصرية تتميز بجودة الأداء في أطوال الموجات هذه إلى درجة تمكّن من استعمال أجهزة ضوئية بأشباه موصلات منخفضة الكلفة. وقد تطورت تقنية تحكم دقيقة لأطوال الموجات خاصة في حوالي 1 500 nm حيث يتوقع حالياً استعمال التقنية WDM. وفي هذا الصدد أجرت لجنة الدراسات 15 التابعة لقطاع تقييس الاتصالات في الاتحاد دراسات عن ترتيبات أطوال الموجات لإرسال الألياف البصرية. وفيما يتعلق بالعوامل الجوية، فإن المدى 2 200-2 000 nm لطول الموجة ملائم أيضاً نظراً لضآلة آثار انتثار الرذاذ وامتصاص الجزئيات في هذا المدى وخصوصاً قرب الطول 2 200 nm [11] [10]. ويتميز هذا المدى أيضاً بأن حساسيته لانحناء الخدمة البصرية الناجم عن تغير درجة الحرارة في الجو أقل شدةً (انظر الفقرة 1.7). وبالمقابل، فإنه من غير الممكن حتى الآن تصنيع أجهزة ضوئية قليلة التكاليف لتوليد الإشارات وكشفها في آن في المدى 2 200-2 000 nm. وقد أجرت لجنة الدراسات 3 لقطاع تقييس الاتصالات في الاتحاد (فرقتا العمل 3J و3M) دراسة خصائص الانتشار البصري في الفضاء الحر في مدى واسع من الترددات البصرية تضم كلاً من الوصلات الساتلية والوصلات للأرض (انظر الفقرة 3).

قدرة الإرسال وثنائي المساري الليزري: تبلغ قدرة إرسال ثنائي مساري ليزري (LD) يستعمل حالياً للوصلات FSOL 10 mW. وبالتالي، يستند تصميم الوصلة موضوع الدراسة في الفقرة اللاحقة إلى هذه القيمة. غير أن تطور التكنولوجيا سيوفر أجهزة ضوئية ذات قدرة أعلى بكثير مما يتيح توسيع نطاق العمل والتطبيقات للوصلات FSOL في المستقبل القريب.

وفيما يلي المعلمات الثانوية التي تؤخذ بالاعتبار عند اختيار نظام ما:

- طول الموجة الذي تعمل فيه الوصلة البصرية: وتؤثر هذه المعلمة على صنف سلامة المطراف؛
- نوع وعدد المسارات البصرية و/أو المستقبلات البصرية التي تؤثر على هامش حماية الوصلة؛
- الإجراءات البسيطة للاستخدام والصيانة؛
- برمجية إشراف بسيطة ومشوقة تتيح إدارة المطرافين (أو أكثر) (أو عدة وصلات) من موقع واحد (تحكم عن بُعد)؛
- كلفة النظام.

3 خصائص الانتشار في الفضاء الحر المتعلقة بتصميم الوصلة

تعرض هذه الفقرة خصائص الانتشار في الفضاء الحر للوصلات FSOL استناداً إلى نتائج الدراسات الواردة في توصيات السلسلة P الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد. ولمزيد من المعلومات عن المراجع المستخدمة في هذه الفقرة يمكن الإحالة إلى توصيات السلسلة P ذات الصلة (التوصيتان ITU-R P.1814 وITU-R P.1817).

1.3 الانتشار في الجو الصافي

يحدث توهين جوي للإشارات عند انتشار الموجات البصري إضافةً إلى ما يسمى الخسارة في الفضاء الحر حتى في الطقس الصافي. وينتج هذا التوهين، *Latm*، عن انتثار دايلي و/أو امتصاص الجزيئات. ويتوقف أثره إلى حد كبير على طول الموجة.

علاوة على ذلك، تتغير قدرة الاستقبال بسبب اضطرابات درجات الحرارة في الجو، وينتج عن ذلك انحناءات الحزم أو رقصات الحزم أو تلألؤ في المسير البصري لانتشار الموجات.

وعادةً لا يكون أثر التوهين *Latm* في أمدية أطوال الموجات المذكورة في الفقرة 3.2 (ترددات/طول موجات الوصلات FSOL) كبيراً جداً في الوصلات التي يقل طولها عن كيلومتر واحد تقريباً. ويمكن بسهولة الحد من انقطاعات الوصلة الناتجة عن هذه الظاهرة وذلك من خلال تسوية تباعد الحزمة البصرية جهة الإرسال بحيث يبلغ قطر دائرة الحزمة جهة المستقبل طولاً معيناً، كأن يصل مثلاً إلى عدة أمتار.

وثمة طريقة أخرى لتحسين تيسر الوصلة ومقاومة آثار الانتشار وهي اعتماد نظام إعادة إرسال إشارات و/أو تصويب الخطأ الأمامي في الطبقة الكهربائية.

2.3 أثر الضباب

1.2.3 تقدير التوهين الناجم عن الضباب بدلالة الرؤية الجوية

يسبب انتثار Mie [4] التوهين الناجم عن الضباب وهو يتوقف على عدد الجسيمات (كثافة الضباب). ومن الصعب عموماً قياس كثافة الضباب بصورة مباشرة أو الحصول على بيانات إحصائية. وتتعلق آثار التوهين الناجم عن الضباب، (dB/km) *Attfog*، بالرؤية في الجو *V* (km)، التي تتحدد بأقصى مسافة يمكن عليها رؤية جسم أسود في السماء [5] [6]. وتتحدد الرؤية بصورة خاصة لأغراض الأرصاد الجوية وتتميز بدرجة شفافية الجو مقدراً من قبل أشخاص ما. وتقاس وفقاً للمدى البصري الجوي باستعمال مقياس إرسال أو مقياس انتثار.

وعموماً يقدر قياس الرؤية، *V*، بالمسافة التي تساوي عندها القوة البصرية المرسلة ε مرة قيمتها الأصلية. وتتاح في المنشورات القيمتان التاليتان للقوة ε وهما 0,02 أو 0,05.

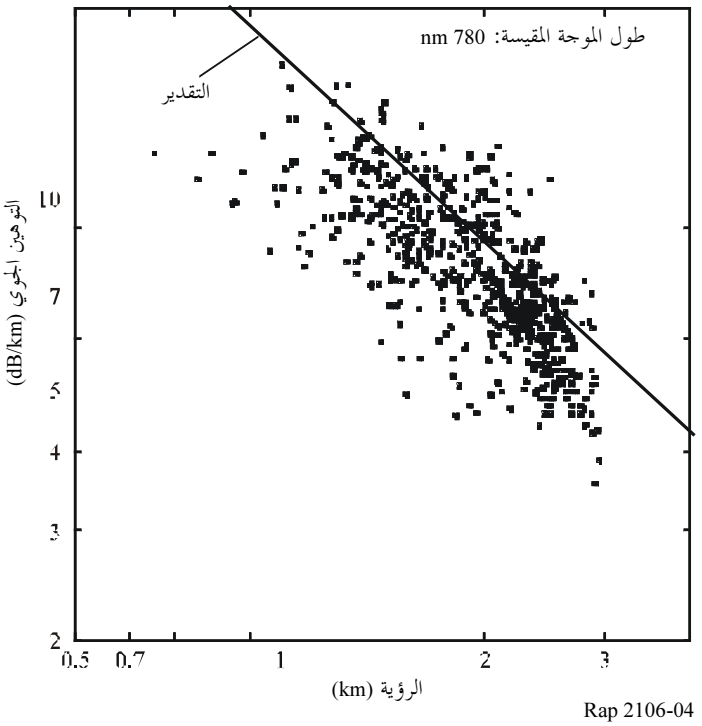
ويمكن بالتالي التعبير عن العلاقة بين *Attfog* و*V* بالمعادلة التالية التي يمكن تطبيقها بمعزل عن نوع الضباب وطول الموجة البصرية في مدى الرؤية الذي يقل عن 3 km.

$$Attfog = 10\log_{10}(\varepsilon)/V \quad (1)$$

وبالتالي يقدر توهين الموجات البصرية الناجم عن الضباب باستعمال إحصاءات الرؤية. وقد أثبتت طريقة التنبؤ الواردة أعلاه والمستندة إلى المعادلة (1). وأخذت بالحسبان لدى تصميم الوصلة [5] [7] في المعطيات المقيسة. ويوضح الشكل 4 العلاقة بين *Attfog* وV لقياس البيانات [7].

الشـــكل 4

التوهين الجوي الناجم عن الضباب



2.2.3 تحليل تفصيلي عن التوهين الناجم عن الرذاذ

تقدم هذه الفقرة تحليلاً مفصلاً للحالات التي يكون فيها نوع الضباب معروفاً.

وينجم التوهين الجوي عن الآثار الإضافية لامتصاص الأشعة تحت الحمراء وتشتتها من جراء جزيئات الرذاذ والغازات الموجودة في الجو. ويعطي عامل النفاذية بدلالة المسافة في معادلة بير لامبير التالية:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda,0)} = \exp[-\sigma(\lambda)d] \quad (2)$$

حيث:

$\tau(\lambda,d)$: عامل النفاذية على بعد المسافة d من جهاز الإرسال؛

$P(\lambda,d)$: القدرة المرسلة على بعد المسافة d؛

$P(\lambda,0)$: القدرة المرسلة؛

$\sigma(\lambda)$: توهين خاص أو معامل الإخماد لكل وحدة طول؛

ويرتبط التوهين الناجم عن الضباب في الوصلة الواقعة على مسافة d (km) بعامل النفاذية كما المعادلة التالية:

$$Att_{fog,d} = 10\log_{10}\left(1/\tau(\lambda,d)\right) \quad \text{dB} \quad (3)$$

ومعامل الإخماد $\sigma(\lambda)$ هو مجموع الحدود الأربعة التالية:

$$\sigma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (4)$$

حيث:

α_m: معامل امتصاص الجزيئات (N_2، O_2، H_2، HO، CO_2، O_3،...)

α_a: معامل امتصاص الرذاذ (جسيمات صغيرة صلبة أو سائلة في الجو (جليد، غبار، دخان، ...))

β_m: معامل انتثار رايلي الناتج عن تفاعل الموجة مع جزيئات أصغر من طول الموجة

β_a: معامل انتثار Mie. ويظهر عندما يكون حجم الجزيئات مساوٍ لطول الموجة المرسلة.

ويسود الامتصاص في المدى تحت الأحمر بينما يسود التناثر في المدى المرئي وفوق البنفسجي. ويتناسب التوهين الجوي (دلالة طول الموجة) عكساً مع الرؤية، وهي معلمة تميِّز عتامة الجو بوجود الضباب. وفيما يتعلق بالقيم المنخفضة للجزيئات ومعاملات امتصاص الرذاذ ومعامل انتثار رايلي ومعامل الإخماد، يمكن استعمال المعادلات الواردة في المرجع Al Naboulsi & Al relations التالية:

والضباب الزاحف أفقياً الذي يتولد عندما يطفو الهواء الدافئ الرطب فوق سطح بارد:

$$\sigma(\lambda)_{fog,adv} = \frac{0.11478\lambda + 3.8367}{V} \quad (5)$$

وضباب الإشعاع الذي يتولد عندما تبرد كتلة الهواء أثناء إشعاع الليل في الظروف الجوية الملائمة:

حيث:

$$\sigma(\lambda)_{fog,rad} = \frac{0.18126\lambda^2 + 0.13709\lambda + 3.8367}{V} \quad (6)$$

حيث:

λ: طول موجة بصرية في الفضاء الحر (µm)

V: الرؤية (km).

الملاحظة 1 – وضعت هذه المعادلات استناداً إلى طول موجة يتراوح بين 690 و550 1 nm ورؤية تتراوح بين 50 و000 1 m، وتوهين ناجم عن الضباب للشعاع الليزري ونوعين من الضباب المتوفرين في النموذج FASCOD والزحف الأفقي والإشعاع. ولا تصلح هاتان المعادلتان إلا لمسافة تتراوح بين 50 و000 1 m والمستعمل هو الذي يختار منهما المعادلة التي تناسب نوع الضباب.

3.3 آثار المطر

ينتج التوهين في حالة المطر عن الانتثار الهندسي الناجم عن قطرات المطر. وبمعزل عن طول الموجة يرتبط هذا التوهين Att_{rain} (dB/km) نظرياً تبعاً لتوزيع حجم قطرات المطر fI على النحو التالي:

$$2 \cdot fI\, dr \int_0^{\infty} r\, Att_{rain} = 27.29 \times 10^5 \cdot \quad (7)$$

حيث:

r: نصف قطر قطرة المطر (m)

ويمكن استنتاج fI في بعض المواقع ولمسافة وصلة معينة، باستعمال معطيات إحصائية بمعدل هطول المطر (غالباً في معدل ساعة R (mm/h) على النحو التالي [8]:

$$fI = B \exp\left(C\, R^{\,k}\, r\right) \quad (8)$$

والأمثلة المستخدمة في المعادلة (8) هي التالية وفقاً للإحصاءات المجمعة في اليابان:

مثال (استناداً إلى نموذج مارشال وبالمر)؛ $B = 0{,}16$، $C = -82$ و$k = -0{,}21$.

وعندئذٍ يمكن استنتاج أثر التوهين Att_{rain} عموماً كدلالة معدل هطول الأمطار R (mm/h) باستعمال المعادلتين (7) و(8).

$$Att_{rain} = \alpha * R^{\beta} \quad (9)$$

وشدة المطر هي المعلمة الأساسية المستعملة لوصف المطر محلياً. وتعطي المعلمتان α وβ تبعاً للموقع (الجدول 1). والمعلمات الناتجة في فرنسا تتسق والمعلمات الواردة في التوصية ITU-R P.1814

الجـــدول 1

أمثلة للمعلمات المستعملة لتقدير التوهين الناجم عن المطر

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

وطريقة التنبؤ الواردة أعلاه والتي تشبه أساساً تلك المستعملة للموجة الكهربائية المليمترية [9] أثبتت نجاحها في التقدير الجيد في مجال الانتشار الموجات البصرية [5] [7] [15].

ويتم قياس شدة المطر مباشرة باستعمال مقاييس المطر أو باستعمال رادارات الأرصاد الجوية. واستناداً إلى هامش الوصلة المستنتج من حصيلة القدرة البصرية في الوصلة يمكن ثنائياً استنتاج احتمال الانقطاع الناجم عن المطر في الوصلة. وفيما يلي مثال حساب يستعمل المعلمات المقيسة في فرنسا:

المثال:

$$R = 18 \text{ mm/h}$$

$$Att_{rain} = 1,076 \times 18^{0,67} = 7,46 \text{ dB/km}$$

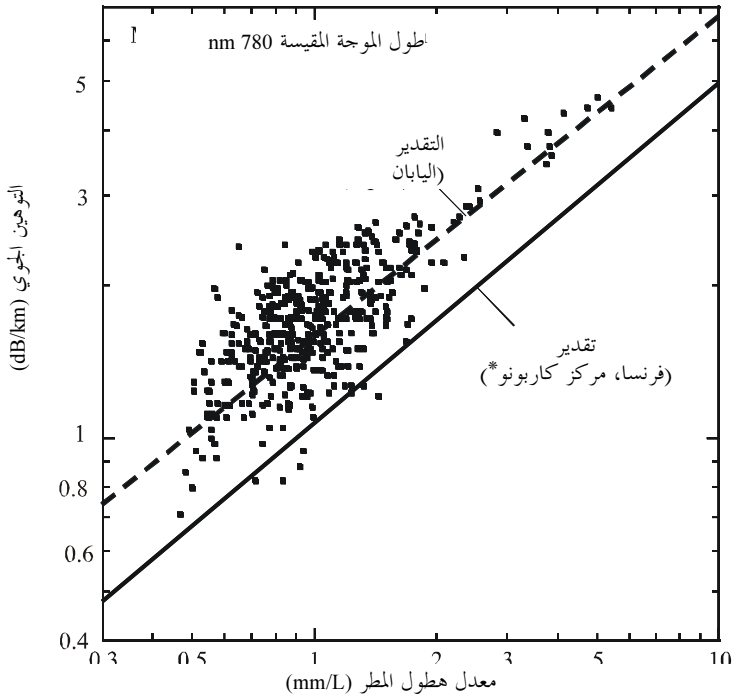
$$Att_{Rain} = 7 \text{ dB/km}$$

ويوضح الشكلان 5 أ) و5 ب) العلاقات بين التوهين Att_{rain} الذي يستخدم معلمات الجدول 1 والمعدل R الخاص بالمعطيات المقيسة في اليابان [7]. ويلاحظ أن التقديرات استناداً إلى التوصية ITU-R P.1814 تقدم أيضاً، إذا ما استعملت في مناطق المطر الشديد تقديراً جيداً لنتائج القياس الناتجة في اليابان.

الشـــكل 5

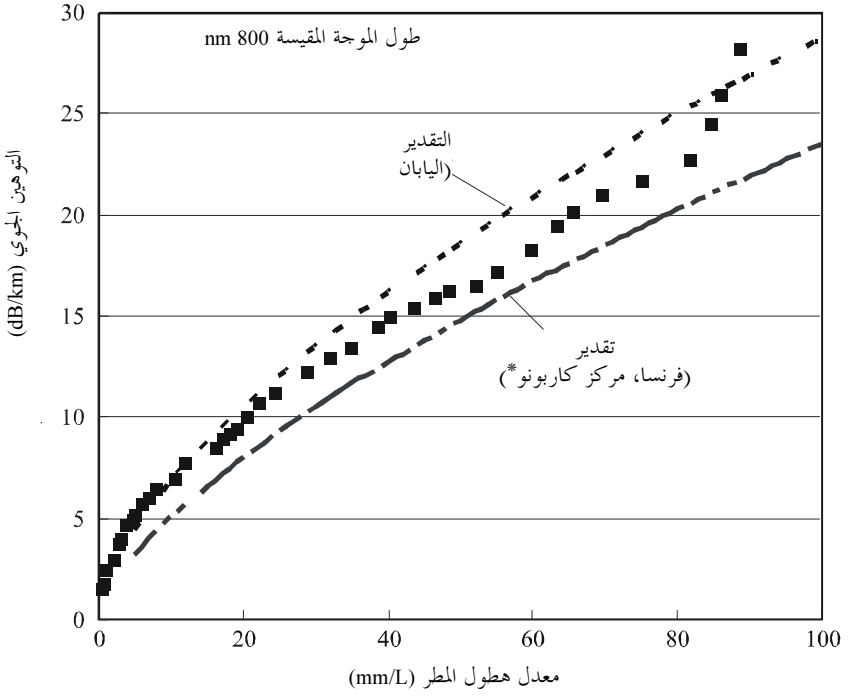
التوهين الجوي الناجم عن هطول المطر

أ) المثال 1



* هذا التقدير مطابق للتوصية ITU-R P.1814

ب) المثال 2



* هذا التقدير مطابق للتوصية ITU-R P.1814

Rap 2106-05

4.3 التوهين الناجم عن الثلج

التوهين الناجم عن الثلج رهن بطول الموجة، λ_{nm}، ويعطى في المعادلات التالية

- ثلج رطب (ارتفاع < 500 m)

$$Att_{snow} = (0.0001023 * \lambda_{nm} + 3.7855466) * S^{0.72} \quad \text{dB/km} \tag{10}$$

- ثلج جاف (ارتفاع > أو = 500 m)

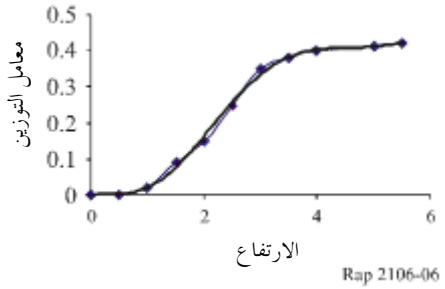
$$Att_{snow} = (0.0000542 * \lambda_{nm} + 5.4958776) * S^{1.38} \quad \text{dB/km} \tag{11}$$

وشدة هطول الثلج، S، هي المعلمة الأساسية المستخدمة لوصف الثلج محلياً. ويجري قياسها في محطة الأرصاد الجوية.

وتستنتج خصائص هطول الثلج من تلك الخاصة بهطول المطر باستعمال نظام دلالة الارتفاع. إذ يطبق معامل التوزين ودالة الارتفاع (km) على معدل هطول المطر، R_p، الذي تم تجاوزه خلال نسبة مئوية، p، للمعدل السنوي لأي موقع (الشكل 6). واستناداً إلى هامش الوصلة الناتج من حصيلة القدرة في الوصلة البصرية، يمكن استنتاج احتمال الانقطاعات الناجمة عن الثلج في الوصلة.

الشـــكل 6

معامل/توزين الثلج/المطر بدلالة الارتفاع



مثال:

الارتفاع = 147 m، λ = 850 nm، S = 40 mm/h

Att_{snow} = (3,7855466 + (850 × 0,0001023)) × 400,72 = 55,14 dB/km

Att_{snow} = 55 dB/km

5.3 التوهين الناجم عن الضوء المحيط

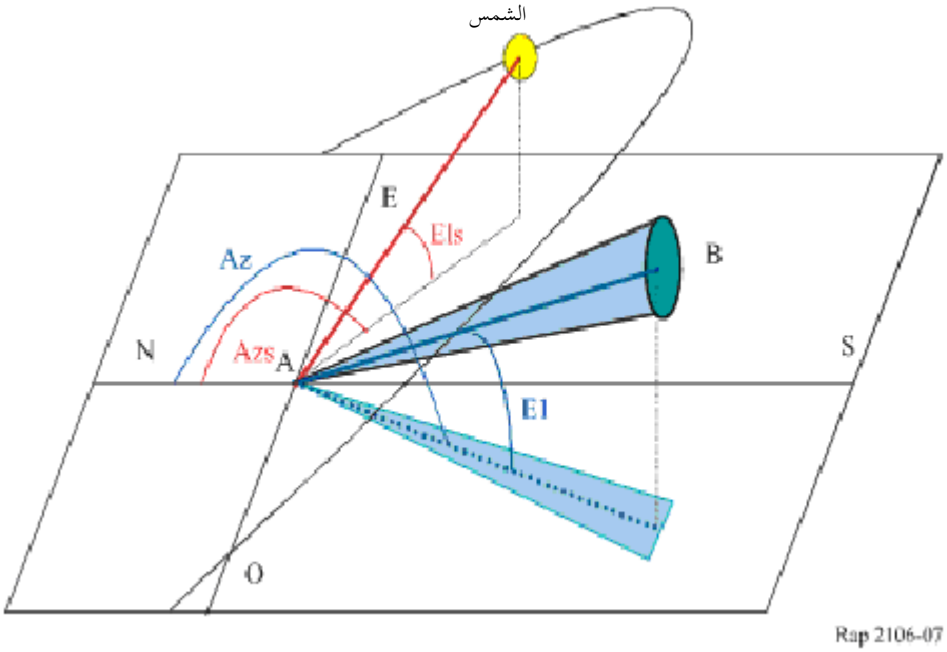
يحدث الاقتران الشمسي عندما تقع الشمس أو صورة منعكسة للشمس داخل مجال الرؤية المباشرة للمستقبل البصري، F_v. أو بالقرب منه. ويساوي عموماً مجال الرؤية هذا على الأقل تباعد حزمة الإرسال. وهنا نحسب احتمال أن يكون اتجاه الشمس موازياً للوصلة البصرية وأن تكون القدرة الشمسية الداخلة في المستقبل أعلى من القدرة الواصلة إلى المرسل.

1.5.3 مسار الشمس

يبين الشكل 7 التالي الجوانب الهندسية لمسيرة الشمس في السماء فيما يتعلق بالوصلة البصرية في الفضاء الحر (A = المستقبل وB = المرسل).

الشـــكل 7

مخطط مسار الشمس فيما يتعلق بالوصلة FSOL



تتحدد معلمات الشمس المختلفة (ارتفاع وزاوية سمت) لكل يوم من أيام السنة ولكل ساعة وكل دقيقة وكل ثانية بدلالة ميلان الشمس وطالعها المستقيم.

2.5.3 القدرة الشمسية في المستقبل

تتحدد القدرة التي تشعها الشمس (W/m^2) بالمعادلة التالية:

$$\text{Power_radiated} = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{Elevation}_{\text{radian}}\right) \quad (12)$$

حيث:

زاوية الارتفاع $_{\text{radian}}$: ارتفاع الشمس.

وتعطي القدرة الداخلة إلى المستقبل في المعادلة التالية:

$$P_{solar} = F_{solar} * \text{Power_radiated} * \text{Capture_surface} * \text{Width_band}_{\text{receiver(nm)}} / 100 \quad (13)$$

حيث:

F_{solar}: القدرة الطيفية للشمس بدلالة طول الموجة

Capture_surface: مساحة كشف المستقبل

Width_band $_{\text{receiver(nm)}}$: عرض نطاق المستقبل.

6.3 تأثيرات التلألؤ

تحت تأثير الاضطراب الحراري في وسيط الانتشار تتشكل خلايا عشوائية تختلف درجة حرارتها ويختلف حجمها (1 km – 10 cm). لهذه الخلايا المختلفة أدلة انكسار مختلفة مما يفضي إلى ظواهر انتثار في مسيرات متعددة وزوايا وصول متغيرة: إذ تتراوح ترددات الإشارة المستقبلة بسرعة بين 0,01 و200 Hz. وتتغير الموجة الجبهية بطريقة مماثلة مسببة تبئير الحزمة وإزالة تبئيرها. وتسمى تراوحات

الإشارات هذه تلألؤات. ويرتبط اتساع التلألؤ وتردده بحجم الخلايا نسبةً إلى قطر الحزمة. وعندما يكون عدم التجانس كبيراً مقارنة بمقطع الحزمة العرضاني تنحرف الحزمة. وعندما يكون ضئيلاً تتسع الحزمة.

تُدرس آثار التلألؤ التروبوسفيري عموماً باستعمال خوارزمية الاتساع χ (dB) للإشارة موضوع الدراسة ("خوارزمية الاتساع")، المحددة بأنها نسبة الاتساع الآني وقيمته المتوسطة وتقدر بالديسيبل. وتزداد شدة التراوحات (تردد التلألؤات) وسرعتها بازدياد تردد الموجة. وفيما يخص موجة مستوية واضطراب ضئيل ومستقبل محدد يمكن التعبير عن تغير التلألؤ σ_χ^2(dB^2) بالعلاقة التالية:

$$\sigma_x^2 = 23.17 * k^{7/6} * C_n^2 * L^{11/6} \quad (14)$$

حيث:

k (m^{-1}): رقم الموجة

L: طول الوصلة (m)

C_n^2 (m$^{-2/3}$): معلمة بنية دليل الانكسار التي تمثل شدة الاضطراب. وهي تخضع لخشونة السطح وإشعاع الشمس والرطوبة والبياض للأرض.

ويساوي اتساع التلألؤات من الذروة إلى الذروة $4\sigma_\chi$ أما التوهين المتصل بالتلألؤ فيساوي $2\sigma_\chi$. وفيما يتعلق بالاضطرابات الشديد، يلاحظ تشبع التغير الذي يرد في المعادلة [13]. ويلاحظ أيضاً أن قيمة المعلمة C_n^2 ليست نفسها في الموجات المليمترية وفي الموجات البصرية [14]. والموجات المليمترية بالغة الحساسية لتراوحات الرطوبة بينما يتأثر دليل الانكسار بشكل خاص في الموجات البصرية بدرجات الحرارة (التأثير الناجم عن بخار الماء لا يذكر). وفيما يتعلق بهذه الموجات المللمترية يمكن الحصول على قيمة C_n^2 تقارب 10^{-13} m$^{-2/3}$ بقيمة متوسطة للاضطراب (فهي عموماً للموجات المليمترية $10^{-14} < C_n^2 < 10^{-12}$) أما للموجات البصرية فقيمة C_n^2 تقارب 2×10^{-15} m$^{-2/3}$ وهو اضطراب خفيف (عموماً للموجات البصرية $10^{-6} < C_n^2 < 10^{-13}$) [13].

7.3 العوامل الأخرى

نادراً ما تحدث الوصلات FSOL في الانتشار الخارجي ضوضاء خلفية. غير أنها قد تنقطع من جراء أشعة الشمس عندما تتقاطع هذه الأخيرة مع اتجاه حزمة استقبال الوصلات FSOL. وفي الحالة التي تتقاطع فيها أشعة الشمس مع المحور الرئيسي للحزمة يصبح الأثر الحراري الناجم عن تركيز العدسة كبيراً لدرجة قد تودي بالمستقبل. وينبغي انتقاء اتجاه الوصلة البصرية من أجل تجنب التقاطع مع الأشعة الشمسية.

4 التطبيقات في الخدمة الثابتة

1.4 الخصائص العامة

فوائد الوصلات البصرية في الفضاء الحر هي التالية:

- نطاق عريض أو معدل معطيات مرتفع؛
- تجهيزات صغيرة الحجم وبسيطة؛
- تشغيل دون ترخيص؛
- تكاليف معقولة؛
- إمكانية النشر السريع والبسيط؛
- سرعة إعادة استعمال الوصلة ونقلها.

وفيما يتعلق ببعض التطبيقات المحددة تقدم الوصلات FSOL عدة مزايا مقارنة بتلك التي تقدمها الوصلة الثابتة التقليدية أو وصلات الليف البصري. وفيما يلي بعض التطبيقات الممكنة:

- وصلة لحدث خاص؛
- وصلة مؤقتة: تركيب سريع لوقت محدود في انتظار الوصلة النهائية التقليدية؛
- وصلة طوارئ: تركيب وصلة طوارئ في حالة وصلة ما؛
- وصلة بين المواقع، شبكة مستقلة (PDH وSDH وATM وإثرنت 10/100/1 000)؛
- إغلاق حلقة بصرية؛
- وصلة إغاثة؛
- شبكة كثيفة؛
- بنية تحتية متنقلة، مثل: خلايا نانو أو صغرية أو GSM أو IMT-2000.

أما مساوئ الوصلات FSOL فهي التالية:

- التيسر رهناً بالمسافة؛
- الرؤية في خط البصر.

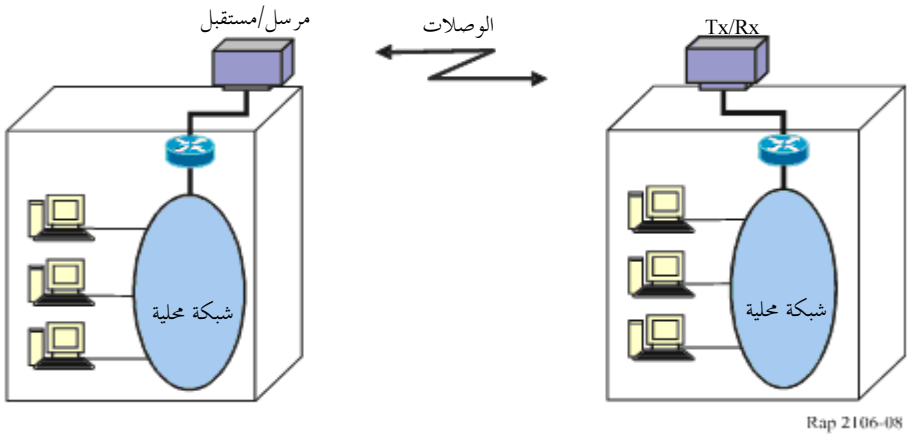
ومن ناحية أخرى يتعين من أجل إرسال موجة بصرية في الفضاء الحر أن يتم التغلب على بعض المصاعب الناجمة عن الانتشار كما ورد في الفقرة 3.

2.4 أمثلة للتطبيقات الأساسية

تجري التطبيقات النمطية للوصلات FSOL بالاستفادة من المزايا التي تقدمها على مسافات محدودة. وتقدم هذه الفقرة أمثلة لوصلة توصيل الشبكة المحلية (LAN) بين المباني والتوصيل بين تمديدات البنية التحتية المتنقلة كما يبين الشكلان 8 و9.

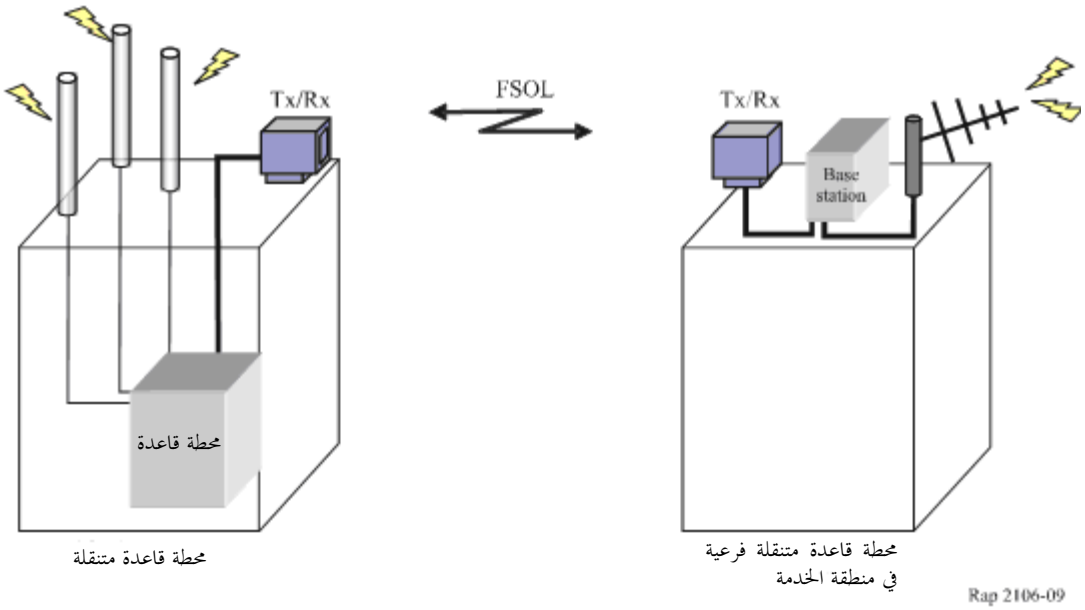
الشـــكل 8

استعمال الوصلات FSOL في توصيل الشبكات المحلية في مبنيين منفصلين



الشـــكل 9

استعمال الوصلات FSOL في توسيع البنية التحتية المتنقلة



3.4 أمثلة للنشر الفعلي

تقدم هذه الفقرة مثالاً لنشر الوصلات FSOL لتشكيل شبكة محلية عريضة النطاق بالترافق مع أنظمة ألياف بصرية.

ويوضح الشكل 9. مخططاً لشبكة مدرسية لتوفير نفاذ عالي السرعة إلى الإنترنت باستعمال الوصلات FSOL مع أنظمة الألياف البصرية. وقد تم نشر هذه البنية التحتية للشبكات عريضة النطاق في الكثير من المدارس التي تستخدم وسائط إرسال مختلفة كالسوائل والألياف البصرية والنفاذ اللاسلكي الثابت إلى الوصلات FSOL. وفي اليابان تستخدم أكثر من مائة مدرسة الوصلات FSOL.

ثمة حالات يستعمل فيها مبنى واحد لأغراض الترحيل وتأمين وصلات ممددة إلى أكثر من مدرسة. ويتحقق مثل هذا التفرع بسهولة باستعمال إشارة لها نفس التردد/طول الموجة. ويقدم الجدول 2 معلمات نظام الوصلات FSOL الواردة في الشكل 10.

الجـــدول 2

معلمات الوصلات البصرية في الفضاء الحر (FSOL)

أقصى طول موجة (km)	2 تقريباً[1]
قدرة الإرسال (Mbit/s)	300
هامش التوهين (dB)	20
جهاز بصري (مدى طول الموجه)	ثنائي ساري ليزري (النطاق µm 0,8)
سطح بيني كبلي	ليف بصري قطره µm 1,3

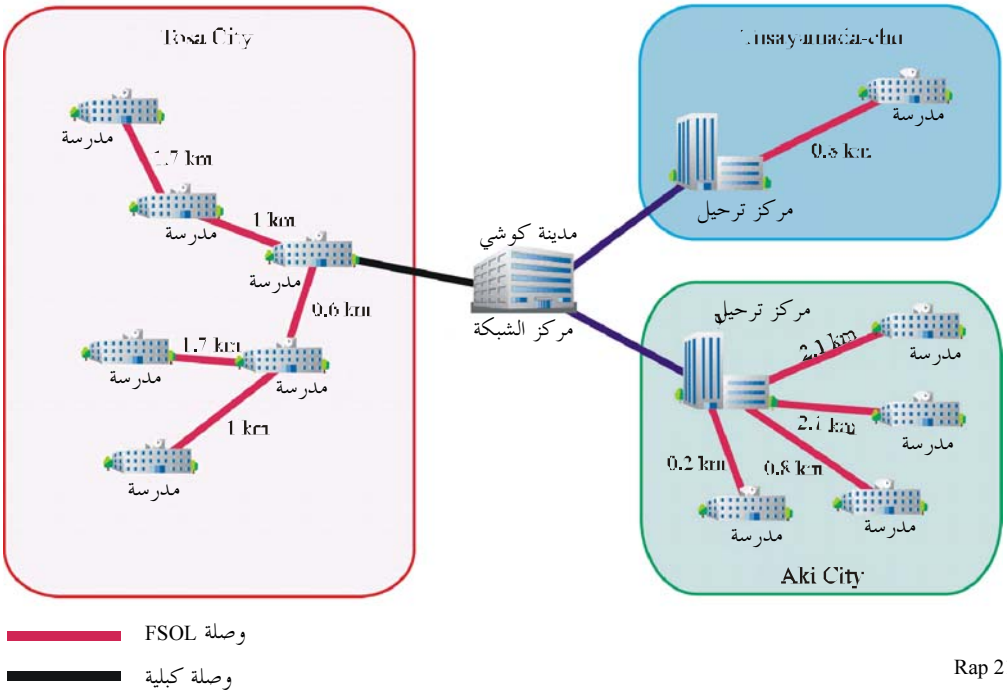
[1] تيسر الوصلة يفوق 99%

APD: ثنائي مساري ضوئي متسلسل

ويصمم تيسر الوصلة في الوصلات FSOL استناداً إلى معطيات إحصاءات الرؤية التي تجمعها السلطة المحلية للأرصاد الجوية (الفقرة 1.2.3).

الشـــكل 10

مثال لنشر شبكة بالنطاق العريض بين المدارس



Rap 2106-10

5 اعتبارات خاصة بتصميم الوصلة

1.5 هامش الوصلة

من العناصر الهامة التي ينبغي معرفتها في الإرسال البصري في الفضاء الحر هامش وصلة الليزر.

وفيما يلي بعض المعلمات الضرورية للتجهيزات لاستعمال نماذج التنبؤ:

- قدرة الإرسال؛
- حساسية المستقبل؛
- منطقة التقاط المستقبل؛
- تباعد حزمة الإرسال.

وهامش الوصلة البصرية هو القدرة المتيسرة نسبةً إلى حساسية المستقبل. وتتحدد بالعلاقة التالية:

$$M_{link} = E_p + |S_s| - Att_{Geo} - Att_{mol} - Sl \quad (15)$$

حيث:

M_{link}: هامش الوصلة (dB)

E_p: قدرة إشارة الإرسال (dBm)

S_s: الحساسية (dBm)

Att_{Geo}: التوهين الهندسي في الوصلة (dB)

Att_{mol}: التوهين الجزيئي في الوصلة (dB)

S_{loss}: خسارة التجهيزات (dB) التي يعطيها المصنع (والتي يفترض أن تكون 0 dB مع احتمال مضاعفتها).

مثال:

d = 271 m, θ = 4 mrad, E_p = 12 dBm, S_s = –50 dBm
Att_{Geo} = 21 dB
Att_{mol} = 0,11 dB
S_{loss} = 0 dB
M_{link} = 12 + |–50| – 21 – 0,11 – 0 = 40,89
M_{link} = 41 dB.

وتصف الفقرة التالية مختلف التوهينات الثابتة التي يتعين أخذها بالحسبان عند حساب هامش الوصلة وقيم أخرى ضرورية.

وفي حالة الإرسال المتعدد بتقسيم طول الموجات (WDM) بهدف زيادة معدل المعطيات المرسلة في نفس الوصلة البصرية FSOL قد يكون من الأسهل استعمال المعادلة الواردة أعلاه لطول موجة واحد.

1.1.5 قطر الحزمة

قطر الحزمة هو منطقة جبهة الموجة على بعد "d" تبعاً لتباعد الحزمة موضوع القياس ويعطي في المعادلة التالية:

$$S_d \approx d \times \tan(\theta) \quad (16)$$

θ: تباعد الحزمة (كامل الزاوية) (rad)
d: طول الوصلة (m)
Sd: قطر الحزمة عند المسافة d (m)

مثال:

d = 271 m, θ = 4 mrad = 0,004 rad
Sd = 271 × tan(0,004) = 1,084
Sd = 1,084 m.

2.1.5 التوهين الهندسي

نظراً لأن المرسل يرسل حزمة متباعدة (1-3 mrad). فإن خلية الاستقبال لا تجمع إلا جزءاً من الطاقة المرسلة. ويّعطى التوهين الهندسي في العلاقة التالية:

$$Att_{Geo} = \frac{Ssurf}{S_{capture}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d\theta)^2}{S_{capture}} \quad (17)$$

حيث:

$Ssurf$: سطح الحزمة على بعد مسافة d
$S_{capture}$: منطقة التقاط المستقبل (Ra)
θ: تباعد الحزمة (Bd)
d: المسافة بين المرسل والمستقبل

مثال:

Sd = 0,92 m^2, Ra = 0,00785 = 7,85 × 10^{-3} m^2
Att_{Geo} = 10 log10 (0,9228 / 0,00785) = 20,70 dB
Att_{Geo} = 21 dB.

ويعطى التوهين مقدراً بالديسيبل في العلاقة التالية:

$$Aff_{dB} = 10\log_{10}(Aff) \quad (18)$$

3.1.5 التوهين الجزيئي

ويعطي التوهين الجزيئي (O2، H2، CO2، O3، ...) جزء معروف من التوهين الجوي وهو يرتبط بطول الموجة المستعملة. ويعطي الجدول 3 بعض القيم النمطية (الخطية):

الجـــدول 3

القيم النمطية للتوهين الجزيئي

طول الموجة (nm)	Att_{lin} = توهين خاص للجزئيات (dB/km)
550	0,13
690	0,01
780	0,41
850	0,41
1 550	0,01

وتعطي العلاقة التالية التوهين الجزيئي في وصلة على مسافة معينة:

$$Att_{mol}(\text{dB}) = Att_{lin}(\lambda) * d \quad (19)$$

حيث:

Att_{lin}: توهين جزيئي خطي

d: المسافة بين المرسل والمستقبل

مثال:

d = 271 m, λ = 850 nm so Att_{lin} = 0,41 dB/km

Att_{mol} = $0{,}271 \times 0{,}41 = 0{,}111$ dB

Att_{mol} = 0,11 dB.

4.1.5 السوية المستقبلة

السوية المستقبلة هي سوية القدرة التي يستقبلها المستقبل على مسافة معينة تعتبر هذه القيمة هامة لعمليات الإنشاء، وتعطي في العلاقة التالية:

$$R_{level} = Ep - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_{loss} \quad (20)$$

حيث:

R_{level}: السوية المستقبلة (dBm)

Ep: قدرة إشارة الإرسال

Att_{mol}: التوهين الجزيئي في الوصلة (dB)

S_{loss}: خسارة التجهيزات (dB) التي يعطيها المصنع (يمكن مضاعفتها، ويفترض أنها تساوي 0 dB)

مثال:

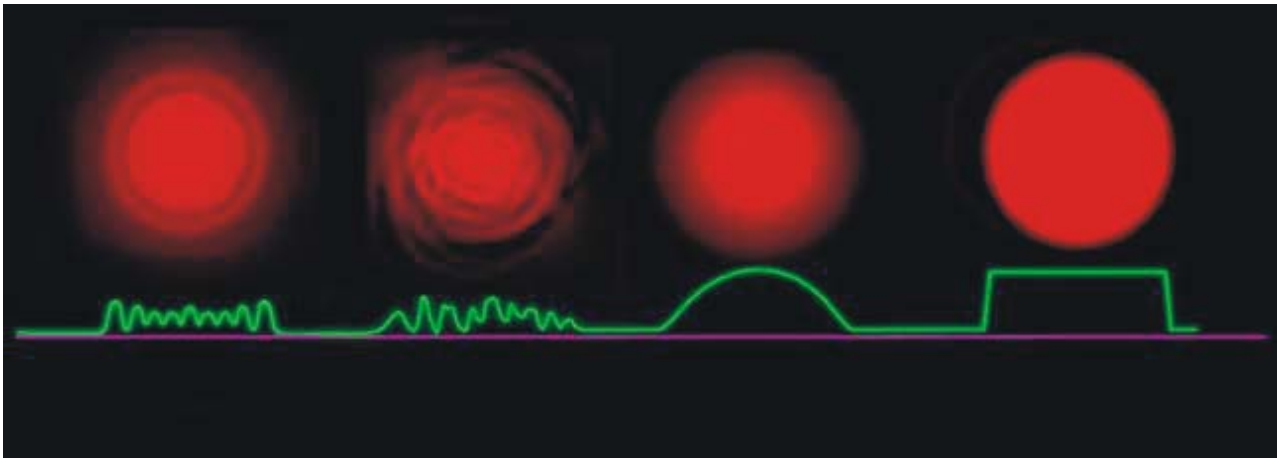
d = 271 m, θ: 4 mrad, *Ep*: 12 dBm, *Ss*: –50 dBm
Att_{Geo} = 21 dB
Att_{mol} = 0,11 dB
S_{loss} = 0 dB
R_{level} = 12 – 21 – 0,11 – 0 = –9,11 dBm
R_{level} = –9 dBm.

5.1.5 تجانس الحزمة في جبهة طول الموجة

من العوامل المؤثرة على تجانس الحزمة في جبهة طول الموجة نوعية المصادر والوسيط البصري المستعمل. وتؤثر هذه العوامل على نوعية الحزمة الضوئية وبالتالي على تقييم الوصلة. والهدف الأمثل هو تحقيق حزمة ضوئية منتظمة بتوزيع قدرة متجانس (Top Hat) دون أن يتجاوز فرق القدرة في جبهة موجات الحزمة 3 dB. ويبين الشكل 11 حزماً مختلفة بدرجة تجانس مختلفة.

الشـــكل 11

حزم ضوئية FSO ودرجات تجانس مختلفة



Rap 2106-11

6.1.5 الهامش في وحدة المسافة

إن أحد العناصر الهامة (لكن ليس بمفرده) للوصلة موضوع الدراسة على مسافة معينة هو هامش وحدة المسافة التي تتيح الحصول على أحد عناصر المقارنة بين المطاريف. وفيما يلي العلاقة التي تحدده:

$$L_{margin}(\text{dB/km}) = M_{link} / d \quad (21)$$

حيث:

L_{margin}: هامش (dB/km) لوحدة المسافة

M_{link}: هامش الوصلة (dB)

D: المسافة (km)

مثال:

d = 0,271 km, M_{link} = 41 dB
L_{margin} = 41/0,271 = 151,29 dB/km
L_{margin} = 151 dB/km.

6 نشر الوصلات FSOL في مناطق مناخية خاصة

الوصلات FSOL عموماً وكما ورد في الفقرة السابقة هامشاً كبيراً للحماية من المطر والضباب. لذلك يمكن أن تكون الوصلات أطول بكثير إذا ما نشرت في مناطق خالية من الأمطار تقريباً. و يفترض بعد حساب بسيط هامش قدره 20 dB يتيح 10 أضعاف طول الوصلة. وحتى في مثل هذه الحالة، يتعين مراعاة آثار التوهين الجوي *Latm* (انظر الفقرة 1.3) وتأثير انحناء الحزمة البصرية وترصد هذه الآثار بشكل رئيسي عند امتصاص الجزئيات أو عند الانكسار الجوي الناجم عن تغير درجات الحرارة، في خبو التلألؤ مثل التراوحات في السوية المستقبلة. أما مدى التراوح في الصحراء الذي تحدده المعادلة (14) بالفقرة 6.3 فيتطلب مزيداً من الدراسة. لكن بالنسبة إلى المناطق شبه الصحراوية، يقدم المرجع Zilbermann [12] بالنسبة إلى الشرق الأوسط نموذج خصائص عمودياً لشدة الاضطراب الإنكساري C_n^2 استناداً إلى مجموعة كبيرة من قياسات التصوير LIDAR. ويمكن تطبيق هذا النموذج على المناطق الصحراوية إلى أن يتم إعداد نموذج أكثر دقة في المستقبل.

وقد يكون تنوع الاستقبال بعدسات منفصلة تدبيراً فعالاً للتصدي لهذا النوع من خبو التلألؤ.

وهناك مشكلة أخرى ينبغي أخذها في الحسبان وهي آثار العواصف الرملية في الصحراء التي قد تعيق إلى حد بعيد بين المرسل والمستقبل. فالغبار والرمل اللذان تنثرهما الرياح في الصحراء يتكونان من جزيئات صغيرة جداً (مثل الكالسيوم والسيليكون والألمنيوم والكبريت). ويتوقف أثر العاصفة الرملية على الرؤية بالنسبة إلى الوصلات FSOL على سرعة الرياح. وهناك برامج حاسوبية تتيح حساب إجمالي (الامتصاص والانتثار معامل الإرسال في منطقة صحراوية. و لم تحظ هذه المسألة بالبحث الكامل وتتطلب أيضاً مزيداً من الدراسة.

غير أن البرنامج الحاسوبي FASCOD (ONTAR) الذي يستخدم نموذج الصحراء (حيث الرذاذ مكون أساساً من جزئيات رملية) يصلح لحساب إجمالي (الامتصاص والانتثار) معامل الإرسال في منطقة صحراوية ما. أما معطيات الدخل اللازمة فهي الرؤية عند سوية الأرض وسرعة الرياح على ارتفاع 10 m. ويمكن للمستعمل تحديد نموذج المناخ والرذاذ الذي يريده من أجل حساب التوهين الجوي أو استخدام قياسات توزيع مقدار الرذاذ وتركيزه حجماً وعدداً الواردة في المرجع [12] (Zilbermann and Kopeika) استناداً إلى قياسات LIDAR على ارتفاعات مختلفة في منطقة البحر المتوسط (إسرائيل).

7 اعتبارات تشغيلية

تنشر الوصلات البصرية في أي وقت وأي مكان مع افتراض تعذر إمكانية التنسيق من أجل تجنب التداخل بين هذه الوصلات التي يشغلها مشغلون مختلفون.

ونظرياً يحدث التداخل بين الوصلات FSOL في الحالات التالية:

- عندما يستعمل نظامان نفس التردد (طول الموجة) أو ترددات متقاربة (أطوال موجات)؛
- وبموازاة ذلك يعملان في أمكنة متقاربة جغرافياً.

وعندما تكون الترددات المستعملة متقاربة يتداخل الطيف المرسل لموجة بصرية مع طيف آخر لوصلة FSOL مما يسبب تداخلاً غير مقبول. وفي هذا الصدد، فإن اختيار الترددات (أطوال الموجات) مسألة هامة بالنسبة إلى المشغلين من أجل تفادي آثار التداخل بين الوصلات (انظر الفقرة 3.2).

لكن التداخل لن يكون ضاراً إلا إذا كانت الوصلات تعمل في بيئة جغرافية محدودة جداً. وكما ورد في الفقرة 1.3 يتم عادةً توليف الحزمة الضوئية للموجات البصرية جهة الاستقبال بحيث يبلغ قطرها حوالي عدة أمتار لوصلة طولها 1 km. وذلك يعني أن قدرة إرسال وصلة FSOL تصل شديدة التمركز في حزمة ضيقة مع زاوية فتحة قدرها 0,1º. ومن ناحية أخرى، تكون زاوية فتحة العدسة جهة المستقبل أوسع بقليل بحيث تتيح بعض المرونة للتكيف مع كل المباني أو غيرها من عوامل التغير. ويلاحظ أن قدرة الموجة البصرية تنخفض كثيراً بمقدار عشرات من الديسبلات مثلاً خارج الحزمة الضوئية المستقبلة.

ويفترض بالتالي أن احتمال التداخل بين وصلات FSOL لمشغلين مختلفين ضئيل إلا إذا نشرت بالتوازي واستعملت نفس التردد (طول الموجة).

وقد يستدعي أثر أشعة الشمس الذي وردت مناقشته في الفقرة 7.3 مزيداً من انتباه المشغلين من أجل اختيار موقع محطات الوصلات FSOL.

1.7 أوقات الانتشار

ثمة خاصية هامة أخرى للتجهيزات البصرية في الفضاء الحر (FSO) وهي سرعة إرسالها للمعطيات الرقمية التي قد يمكّنها من الاستغناء عن المسير في وصلة شبكة محلية.

وبالفعل فإن معظم التجهيزات FSO تقبل جميع بروتوكولات الإرسال. وعموماً لا تجري أي معالجة للمحتويات أو لطبيعة المعطيات مما يتيح أوقات انتشار قصيرة نسبياً.

والمعلمات التي يتعين مراعاتها في حساب وقت الانتشار حتى النفاذ هي:

- وقت المعالجة الإلكترونية للتجهيز FSO (المرسل والمستقبل)؛
- وقت انتشار الضوء 3×10^{-9} s/m تقريباً؛
- وقت الانتشار حتى النفاذ هو مجموع هاتين المعلمتين؛
- مثال:
- وصلة بطول 500 m،
- معدل معطيات 155 Mbit/s،
- مثال وقت معالجة إلكترونية لتجهيز FSO: $3 \times 10^{-7} \times 2 = 6 \times 10^{-7}$ s؛
- وقت انتشار الضوء في الجو بين التجهيزين A وB: $M\ 500 \leq$ وقت الانتشار $1{,}5 \times 10^{-6}$ s؛
- وقت الانتشار: $6 \times 10^{-7} + 1{,}5 \times 10^{-6} = 2{,}11 \times 10^{-6} \Leftrightarrow 2{,}11$ µs

2.7 سرية البيانات المرسلة

يستعمل معظم المصنعين تشكيل اتساع خاص بكل منهم لإرسال البيانات بالليزر، يقبل عموماً جميع أنواع بروتوكولات الإرسال، وإمكانيات "قرصنة" المعلومات محدودة نسبياً.

وباستثناء الإجراءات المباشرة على التجهيز أو منافذه لا يوجد إلا حلاّن "لاستعادة البيانات المرسلة يتطلبان مهارات تقنية عالية ومعايير تدخل معقدة.

ولا تتم قرصنة المعلومات إلاّ إذا أجرى الشخص العمليات التالية:

1 الحصول على نفس التجهيز FSO من نفس المصنع من أجل تجميع المعطيات وفك تشفيرها.

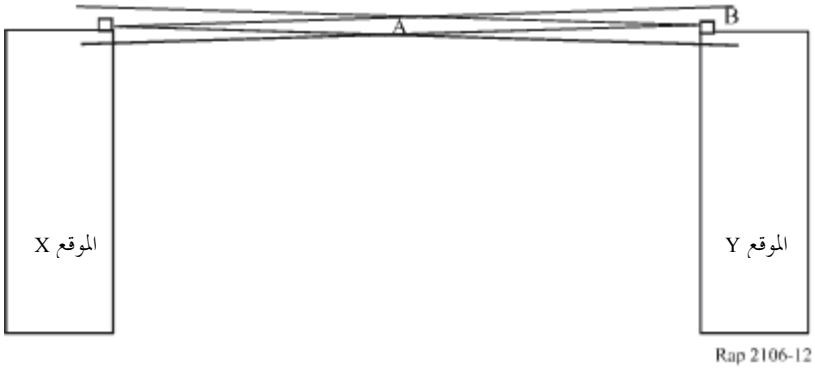
2 "تجميع" معطيات جزء من الحزمة الضوئية تصبح شديدة الاتجاهية. و"استعادة" طاقة كافية لمعالجتها (الشكل 12):

- إما بين موقعين النقطة A، من أجل الحصول على البيانات المرسلة من الموقع X أو Y فقط، إضافةً إلى صعوبة تجنب قطع الحزمة؛
- وإما وراء الموقع Y، (النقطة B)، مثلاً للمعطيات المرسلة من الموقع X، مع العلم بأن توهين الإشارة بالغ الأهمية عند الابتعاد من المصدر؛
- وإما أمام الموقع Y، B، مثلاً، فيما يتعلق بالبيانات المرسلة من الموقع Y إضافةً إلى صعوبة تجنب قطع الحزمة.

3 وأخيراً، تكمن الصعوبة الأخيرة في معرفة بروتوكول الإرسال من أجل فهم المعطيات المجمعة.

الشـــكل 12

من أجل تجميع البتات المرسلة من X أو Y، يجب على المقتحم أن يجمع جزءاً من الحزم



3.7 إرشادات لتنفيذ الوصلات البصرية في الفضاء الحر (FSOL)

1.3.7 عملية تركيب الوصلات FSOL

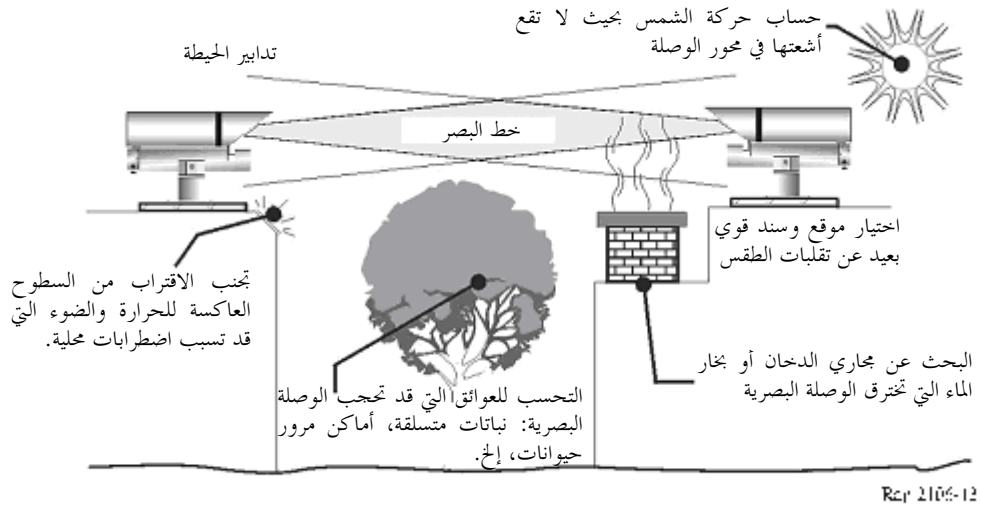
يركب تجهيز FSO عموماً بطريقة مماثلة للنظام الثابت اللاسلكي:

- دراسة هندسة الوصلة (مثال باستعمال البرمجية "FSO prediction") من أجل تحديد تيسر الوصلة؛
- التركيب في نقطة مرتفعة (مبانٍ، أعمدة، أبراج خزانات مياه، ...)؛
- في خط البصر دون عوائق في المسار الحالي أو القادم؛
- وقت التركيب أقل من يوم للوصلة الواحدة.

لكن بسبب هذه التقنية الخاصة، يتعين مراعاة بعض العوامل والتدابير الاحترازية أثناء عمليات التركيب (الشكل 13).

الشـــكل 13

التدابير الاحترازية عند تركيب نظام بصري في الفضاء الحر



ولا بد من التراصف بدقة كبيرة عند توافر خصائص التجهيزات المذكورة (تباعد منخفض لحزمة الليزر). ويميز تراصف المرسل والمستقبل اقتران الوصلة البصرية. وقد يختل ذلك تبعاً للاهتزازات الميكانيكية. ويتعين على مرشاح نظام الاتصالات:

- تثبيت المعدات على أساس صلب أو جدار استنادي بحيث تكون أقل عرضة للاهتزازات أو الصدمات (حافة الجدار، جانب الجدار، ...)؛
- تجنب التراصف المباشر للوسائط البصرية مع أشعة الشمس؛
- تجنب الاقتراب من العناصر التي قد تسبب اضطرابات جوية (مداخن، سطوح عاكسة، ...).

2.3.7 مثال لعملية تراصف تجهيز FSO

تجري عملية تراصف تجهيز FSO بعد حساب بعض القيم الأولية مثل:

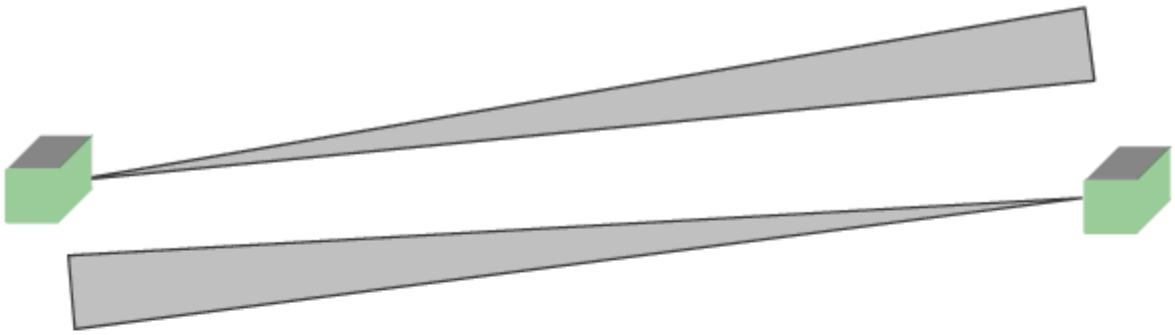
- سوية الاستقبال؛
- قطر الحزمة الضوئية.

وتتم أول سوية تراصف باستعمال تراصف رؤية باتجاهي الارتفاع والسمت من الجهتين.

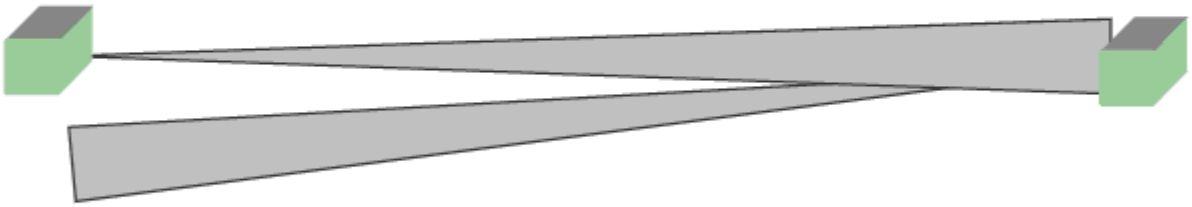
ويحتاج إجراء تراصف دقيق إلى كاميرا وسوية الصوت وتردد استدعاء ودلالة قياس القدرة، وإلى أن يتبع الخطوات التالية (الشكلان 14 و15).

الشـــكل 14

مثال عملية التراصف



أ) تراصف حزمة FSO في الجهة 1 مع مستقبل FSO في الجهة 2



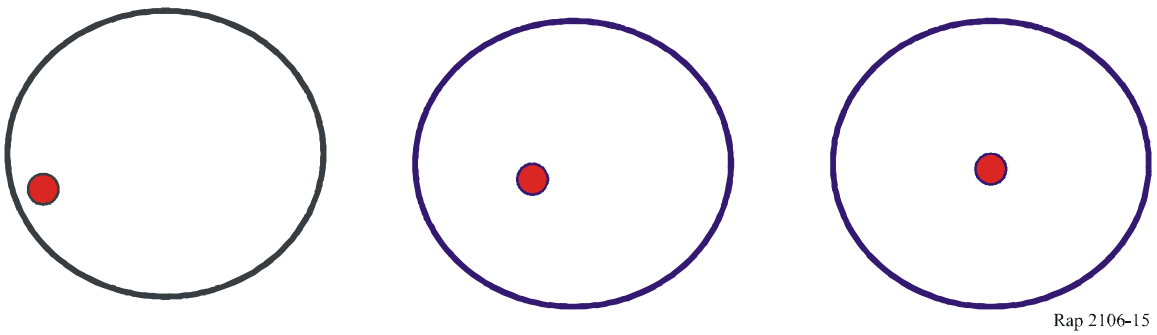
أ) تراصف حزمة FSO في الجهة 2 مع مستقبل FSO في الجهة 1

ج) إضافة إلى ذلك تحديد دقيق لمركز حزمة الموقع 1 (بنفسجي) في منطقة استقبال (Ra) (أحمر) الموقع 2 والعكس (بالارتفاع والسمت)

Rap 2106-14

الشـــكل 15

عملية تراصف دقيق



Rap 2106-15

4.7 وصلات FSOL متعددة

في حالة الوصلات FSOL المتعددة التي تستعمل نفس التردد ونفس سوية الاستقبال، ينبغي مراعاة ما يلي من أجل تجنب الخطأ في البتات:

- أن يكون لقطر الحزمة بين الوصلتين FSOL المتوازيتين أو شبه المتوازيتين أكبر بمقدار ضعفي مسافة قطر الحزمة الأقصر FSOL؛
- أن يكون أقل تباعد زاوي بين وصلتين FSOL ضعفي زاوية التباعد الكلي للوصلة القصيرة؛
- أن لجنة الدراسات 15 لقطاع تقييس الاتصالات في الاتحاد وضعت التوصية ITU-T G.640 بشأن هذا الموضوع – السطوح البينية المتوائمة طولانياً في المواقع المشتركة للأنظمة البصرية في الفضاء الحر.

8 ملخص

يقدم هذا التقرير خصائص الوصلات FSOL لتطبيقات الخدمة الثابتة، وكذلك متطلباتها التقنية/التشغيلية. وقد ركزت الفقرات السابقة على الوصلات FSOL، مثل تلك الخاصة بالخدمة المتنقلة أو الخدمات الفضائية. وفيما يلي تعداد للمواضيع التي تتطلب مزيداً من الدراسة ويتعين مراعاتها:

- تطوير تكنولوجيا الأجهزة البصرية؛
- توسيع تطبيقات الخدمة الثابتة؛
- المواءمة، حسب الاقتضاء، مع وصلات FSOL لتطبيقات خدمة الاتصالات الراديوية الأخرى.

وقد تتوسع الوصلات FSOL في إطار دراسات لاحقة لتشمل أنظمة خارجية FSO متعددة وأنظمة داخلية FSO من نقطة إلى نقطة ومن نقطة إلى نقاط متعددة وعمليات اختبار وقياس.

المراجع

[1] G. Nykolak, *et al.*, "4 X 2.5 Gb/s 4.4 km WDM free-space optical link at 1 550 nm," in Proc. OFC'99, PD11, 1999.

[2] Y. Aburakawa, "Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission," in Proc. Of MWP'03, pp. 135, 2003.

[3] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60825-1 standard, "Safety of laser products".

[4] G. Mie, Ann. Physik., Vol. 25, pp. 377-445, 1908.

[5] K. Morita, *et al.*, "Light wave attenuation in propagation through the atmosphere," Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 714-725, pp. 798-842, 1971.

[6] Final Approach Visibility Studies, 1955, U.S. Weather Bureau.

[7] Y. Aburakawa, *et al.*, "Experimental evaluation of 800-nm band optical wireless link for radio access network," IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, pp. 1 175-1 183, No. 7, 2003.

[8] J.S. Marshal and W.M. Palmer, "The distribution of raindrops with size", Journal of the Meteorology, Vol. 5, No. 6, pp. 165, 1948.

[9] K. Morita, and I. Higuchi, "Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain," Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 7-8, pp. 798-842, 1971.

[10] N. Hiromoto, "Novel detector technologies for infrared communication and sensing, CRL International Topic Workshop on Space Laser Communication Current Status and Future Perspectives, pp. 90-95, 1997.

[11] M. Akiba, *et al.*, "Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall", IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 7 July 2004.

[12] Zilberman A., Kopeika N. S., "Aerosol and turbulence characterization at different heights in semi-arid regions", Proc. SPIE Vol. 5891, p. 129-140.

[13] P. Bataille, "Analyse du comportement d'un système de télécommunication optique fonctionnant à 0,83 micron dans la basse troposphère", Thèse, Université Rennes, 1992.

[14] H. Vasseur, *et al.*, "Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques", Propagation électromagnétique du décamétrique à l'angström, 3ièmes journées, Rennes 1997.

[15] T.H. Carbonneau, D.R. Wiseley, "Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free-space telecommunications link in today's crowded marketplace", SPIE Conf. on optic. Wireless Com., Boston, USA, Vol. 3232, 1998.

الملحق 1

أمثلة موازنة الوصلة

1 مثال موازنة الوصلة

يقوم تصميم موازنة الوصلة FSOL على أساس تيسر الوصلات المطلوب مع مراعاة خصائص الانتشار في الموقع الذي تعمل فيه الوصلة.

ويبين الجدول 1-A1 أمثلة على معلمات النظام لنوعين مختلفين للوصلات FSOL. وفي النوعين من الأنظمة اعتمد ثنائي مساري (LD) ليزري بنفس قدرة الإرسال. كما تم اختيار خسارة تمديد الحزمة، L_p، بحيث تنتج قيمة فعالة قدرها 24 dB. وتقابل خسارة تمديد الحزمة خسارة كبيرة للوصلة FSOL بين المرسل، Tx، والمستقبل Rx، أي الخسارة في الفضاء الحر ناقص بحجم كسب الهوائيات في حالة الموجة الكهربائية. ويعبر عن الخسارة L_p نظرياً بالمعادلة التالية:

$$L_p = (A_r / w_r)^2 L_{atm} \quad (1\text{-A})$$

حيث:

w_r: قطر الحزمة النقطية للضوء المرسل على مسافة r (طول الوصلة)

A_r: فتحة فعالة لعدسة الاستقبال.

ويمكن تسوية هاتين المعلمتين w_r وA_r من خلال وظيفة تباعد العدسات البصرية المركبة في المرسل والمستقبل. وتعتبر الخسارة الجوية، L_{atm}، عادةً ضئيلة كما ذكر في الفقرة 1.3.

وتنتج قدرة الاستقبال المطلوبة عن حساب الخسارة *LP* بما فيها الهوامش اللازمة للحماية من آثار الضباب والمطر. وصممت الهوامش الإجمالية في الأمثلة الواردة في الجدول 1-A1 لتقارب القيمة 22 dB في نوعي الأنظمة.

ومن المعروف أن وصلتين FSOL مختلفتي الطول قادرتان على العمل بقدرة إرسال وخسارة تمديد حزمة فعالتين، لكن نسبة الانقطاعات الناتجة عنهما مختلفة كثيراً.

ويلاحظ أنه لا يمكن استخدام معدل انقطاع الوصلة البالغ 0,1% للنوع 1 شبكة التوصيل العمومية مثل PSTM أو ISDN. غير أن الوصلات FSOL من النوع 2 ذات معدل الانقطاع الأكثر انخفاضاً بكثير من النوع 1 تصلح كنظام للنفاذ الثابت اللاسلكي الموصول بالشبكات العمومية المركزية.

الجـــدول 1-A1

مثال تصميم موازنة وصلة FSOL

المعلمات	النوع **1**	النوع **2**
طول الوصلة (m)	900	350
قدرة الوصلة (Mbit/s)	622,08	
المعدل BER المطلوب	$10 = BER^{-9}$	
معدل انقطاع الوصلة	%0,1 (حوالي 9 ساعات/السنة)	%0,004 (حوالي 20 دقيقة/السنة)
قدرة الإرسال (خرج LD: الاسمي)	dBm 13 (mW 20)	
خسارة الإدراج في المرسل (dB)	3	
خسارة تمديد الحزمة (dB)	24	
خسارة الإدراج في المستقبل (dB)	3	
هامش الضباب (الملاحظة 1) (dB)	14,0	15,5
هامش هطول المطر (الملاحظة 1)	8,0	6,5
حساسية المستقبل (dBm)	40–	

الملاحظة 1 – استناداً إلى معطيات إحصائية جمعت في طوكيو [7] [9].

2 مثال للتنبؤ بتيسر نظام FSO

من أهم العناصر التي ينبغي معرفتها في الإرسالات البصرية في الفضاء الحر (FSO) هو هامش النظام FSO. وتبعاً لنمط تجهيزات المشغلين الراديوية أو لأنظمة الترحيل الراديوية، من الهام جداً وبالفعل معرفة هامش وصلة معينة. وعند تركيب الوصلة تتيح عدة نماذج رياضية حساب تيسر الوصلة لسنة واحدة أو للشهر الأسوأ مثلاً.

وتكمن الخطوة الأولى في معرفة هامش الوصلة. ويتيح ذلك معرفة قدرة التجهيز الليزري على إرسال معطيات رقمية على الرغم من تغيرات الأحوال الجوية.

ومن أجل استخدام نماذج التنبؤ لا بد من توفر معلمات التجهيز التالية (غير شاملة):

- قدرة الإرسال؛
- حساسية المستقبل؛
- منطقة التقاط المستقبل؛
- تباعد الحزمة المرسلة.

واستناداً إلى هذه المعطيات مثلاً يمكن معرفة التوهين الهندسي وهامش الوصلة وتيسرها أيضاً.

1.2 هامش الوصلة

يقدم الجدول أدناه بعض أمثلة حساب هامش الوصلة لثلاثة أنماط من التجهيزات. وأجريت الحسابات لمسافة قدرها m 500 وأهمل التوهين الجزيئي. وهوامش الوصلات الواردة هنا كمثال، هي عناصر أساسية من أجل الإلمام لاحقاً بتوهين الإشارة الليزرية الناجم عن الظواهر المناخية (ضباب، مطر، ثلج، تلألؤ، ...).

الجـــدول 2-A1

مثال ثلاثة أنماط لهوامش الوصلات

قدرة الإرسال (dBm)	10	13	26
الحساسية (dBm)	35–	40–	36–
توهين هندسي (dB) (m 500 = *D*)	26	17	18
الخسارة في النظام (dB)	1	2	0
هامش الوصلة (dB)	18	34	44

2.2 التيسر ونوعية الخدمة

يقدم هذا الجزء من التقرير مثالاً عملياً لتحديد نوعية الخدمة (QoS) في وصلة معينة تستخدم خصائص التجهيزات الثلاثة FSO.

وفيما يلي العناصر المستخدمة في المثال:

- طول الوصلة: 500 m؛
- المصنِّع: ثلاثة مصنعين من أصول مختلفة (A، B، C)؛
- التجهيز: سطح بيني SDH بمعدل 155 Mbit/s مع ألياف بصرية؛
- النموذج: استعملت نماذج تليكوم فرنسا للتوهين الناجم عن الرذاذ (ضباب) الذي يشكل أخطر أسباب التوهين في وصلة FSOL.
- الموقع: موقع واحد في مدينة رين الفرنسية.

تحديد نوعية الخدمة عملية تجري في ثلاثة مراحل؛ وبالتالي فهي عملية يمكن برمجتها حاسوبياً كلياً أو جزئياً.

1.2.2 مثال حساب الرؤية الدنيا

تستعمل لهذا المثال وصلة طولها 500 M وسطح بيني بمعدل 155 Mbit/s. وتتحدد قيمة الرؤية الدنيا استناداً إلى هامش الوصلة الخطي بتطبيق نماذج توهين تليكوم فرنسا.

الجـــدول 3-A1

مثال حساب الرؤية الدنيا في ثلاثة تجهيزات

	التجهيز **A**	التجهيز **B**	التجهيز **C**
طول الموجة (nm)	690	850	1 550
طول الوصلة (m)	500	500	500
قدرة الإرسال (dBm)	10	13	26
الحساسية (dBm)	35–	40–	36–
التوهين الهندسي (dB)	25,94	17,4	18,59
التوهين الجزيئي (dB)	0,05	0,205	0,05
الخسارة في النظام (dB)	0	0	0
هامش الوصلة (dB)	19	35	43
الهامش الخطي (dB/km)	38	71	87
قيمة الرؤية الدنيا (m)	470	250	210

2.2.2 مثال المعطيات الإحصائية للأحوال الجوية

استناداً إلى ملفات الأحوال الجوية التي تقدمها الأرصاد الجوية الفرنسية عن مدينة رين والتي تعطي النسبة المئوية لظهور الضباب في الساعة والناتجة عن بيانات جمعت خلال فترة طويلة من الزمن وضعت الرسوم البيانية التي تظهر النسبة المئوية الناتجة لظهور الضباب في ثلاث فترات زمنية هي:

- من الساعة 8 صباحاً إلى الساعة 8 مساءً؛
- من الساعة 8 مساءً إلى الساعة 8 صباحاً؛
- يوم كامل من منتصف الليل إلى منتصف ليل اليوم التالي.

وتميزت ملفات الأحوال الجوية هذه بالخصائص التالية:

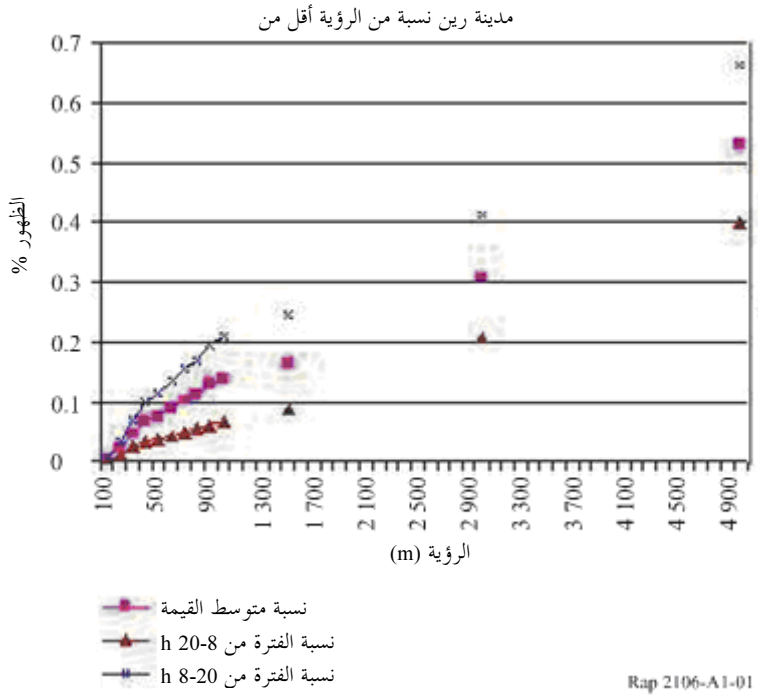
- الرؤية في الساعة؛
- من 100 إلى 5 000 m؛
- من 1992 إلى 2002؛
- أكثر من 73 000 عملية رصد؛
- النسبة المئوية للظهور المتراكم للضباب؛
- الفترات الزمنية الثلاث للرصد في الساعة.

ورسمت ثلاثة منحنيات في الرسم البياني كل منها:

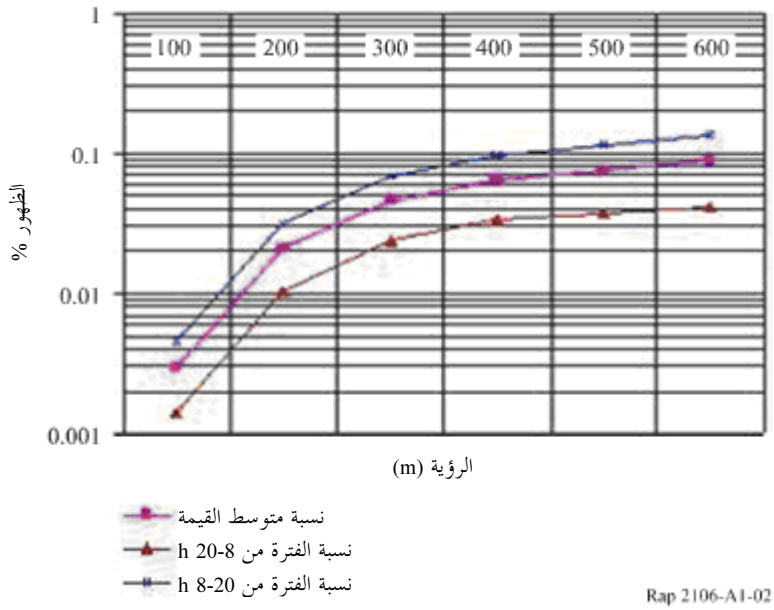
- في محور السينات: القيمة الدنيا للرؤية (m) (أي كثافة للضباب)؛
- في محور العينات: النسبة المئوية لظهور القيم الدنيا المختلفة للرؤية (%).

الشـــكل 1-A1

عملية تراصف دقيق



ولمزيد من الوضوح يظهر محور السينات في مقياس لوغاريتمي.



3.2.2 مثال حساب تيسر وصلة

ينعدم تيسر وصلة FSOL عندما تتجاوز كثافة الضباب هامش وصلة. واستناداً إلى الرسوم البيانية للأرصاد الجوية يمكن معرفة النسبة المئوية التي لا تتيسر خلالها وصلة FSOL. ثم تعمم العملية من أجل تحديد تيسر هذه الوصلة FSOL. المعبر عنه بنسبة مئوية وبعدد الساعات (أو الدقائق) سنوياً. ويتم تحديد عدم تيسر وصلة FSOL من خلال تحديد القيمة الدنيا للرؤية في كل

تجهيز (في محور السينات) وتحديد النسبة المئوية لظهور الضباب. وبعد الحصول على هذه القيمة. تعتبر كل قيمة تتعداها هي قيمة عدم تيسر الوصلة FSOL.

وتقدم الجداول الواردة أدناه قيم النسبة المئوية وقيم عدم تيسر كل تجهيز من التجهيزات الثلاثة.

الجـــدول 4-A1

مقارنة الرؤية والفترات الزمنية

ظهور الضباب		التجهيز **A**	التجهيز **B**	التجهيز **C**
القيمة الدنيا للرؤية (m)		342	184	150
النموذج zoom	Day	0,052	0,015	0,008
	P8-20	0,028	0,007	0,004
	P20-8	0,08	0,022	0,012

وبالتعميم يتحدد تيسر الوصلة FSOL موضوع الدراسة معبراً عنه بالنسبة المئوية وعدد الساعات (أو الدقائق) سنوياً. ومن أجل الموقع قيد الدراسة انظر الجدول 5-A1.

الجـــدول 5-A1

تيسر الوصلة في موقع مدينة رين للتجهيزات الثلاثة A وB وE

التجهيز **A**	**%** من التيسر	عدم التيسر — عدد الساعات سنوياً
سنة	99,948	4,56
الفترة الزمنية من الساعة 8 صباحاً إلى الساعة 8 مساء	99,972	1,23
الفترة الزمنية من الساعة 8 مساءً إلى الساعة 8 صباحاً	99,920	3,50

سنة واحدة = 760 8 ساعة

التجهيز **B**	**%** من التيسر	عدم التيسر — عدد الساعات سنوياً
سنة	99,985	1,31
الفترة الزمنية من الساعة 8 صباحاً إلى الساعة 8 مساء	99,993	0,31
الفترة الزمنية من الساعة 8 مساءً إلى الساعة 8 صباحاً	99,978	0,96

سنة واحدة = 760 8 ساعة

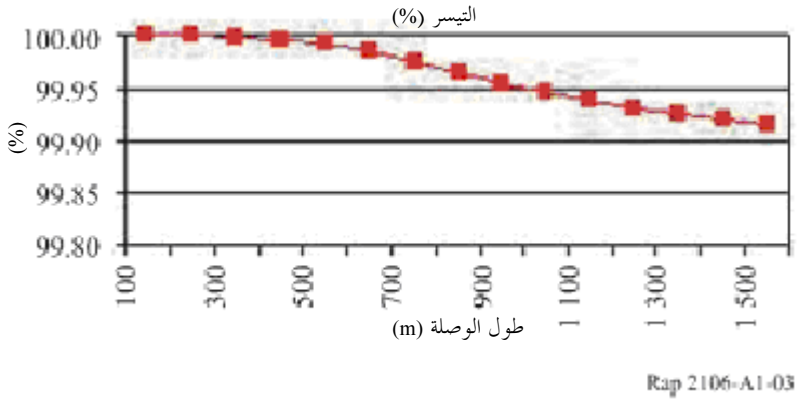
التجهيز **C**	**%** من التيسر	عدم التيسر — عدد الساعات سنوياً
سنة	99,992	0,70
الفترة الزمنية من الساعة 8 صباحاً إلى الساعة 8 مساء	99,996	0,18
الفترة الزمنية من الساعة 8 مساءً إلى الساعة 8 صباحاً	99,988	0,53

4.2.2 مثال التيسر تبعاً لطول الموجة

ثمة طريقة أخرى تكمن في عرض النوعية QoS تبعاً لطول الوصلة FSOL في الموقع قيد الدراسة.

الشـــكل 3-A1

التيسر في موقع مدينة رين تبعاً لطول الوصلة



وهناك ثلاث ملاحظات هامة فيما يتعلق بهذا المثال، وهي:

- تتوقف نوعية خدمة وصلة FSOL على ظروف الطقس المحلية (الضباب مثلاً) وبالتالي فإن لمعالجة معطيات الأحوال الجوية دور رئيسي.
- تتوقف إدارة نوعية الخدمة على طول الوصلة (في ظروف جوية مماثلة)، ويمكن تعديل أو تحسين هذه المعلمة باختيار التجهيز أو المصنَّع. وعلى سبيل المثال، واستناداً إلى الرسوم البيانية السابقة، إذا طُلبت نوعية خدمة أعلى من 99,95% في موقع مدينة رين، فلابد من ألاَّ يتجاوز طول الوصلة FSOL 900 m.
- يمكن برمجة هذه العملية وغيرها من عمليات المعلمات المناخية حاسوبياً.

الملحق 2

مقارنة بين التوصيات ITU-R وبرمجية نوعية الخدمة "التنبؤ بنظام FSO" (تجارب أجريت في فرنسا)

1 مقدمة

أجرى مشغل (نظام FSO 04) تقييماً لمقدرات منتجات FSO ووضع برمجية خاصة به اسمها "تنبؤ FSO". ولهذا الغرض فكرَّ بإجراء تجارب تتيح تعريض مقدرات التجهيزات FSO إلى معطيات جوية، وتمت الدراسة في تليكوم فرنسا قرب مدينة تولوز في فترة تمتد على ستة شهور (من 2004.01.12 إلى 2005.05.31) أثناء فصل الشتاء، وهو الفصل الأسوأ للتجهيز الذي يستخدم تكنولوجيا FSO في نقل المعطيات الرقمية.

وثمة هدفان هما:

- مقارنة نتائج برمجية "التنبؤ FSO" بنتائج التجارب الميدانية على مدى فترة زمنية تكفي لاستخلاص معلومات إحصائية مفيدة.
  - تخصيص تحليل إحصائي بصورة رئيسية لأكثر الظواهر إساءة للوصلة البصرية، مثل: التوهين الناجم عن الضباب أو التوهين في الجو.
  - التحقق من اتساق النتائج بمقارنتها مع ظواهر توهين أخرى ومع معطيات اختبار ميداني.
- مقارنة نتائج الوصلة FSO بأهداف التوصيات ITU-R فيما يتعلق بوصلة الموجة الصغرية:
  - التوصية ITU-R F.1703 – أهداف التيسر للوصلات اللاسلكية الثابتة الرقمية الحقيقية المستعملة في مسيرات وتوصيلات مرجعية افتراضية طولها 500 27 km.
  - التوصية ITU-R F.1668 – أهداف الأداء من حيث الأخطاء للوصلات اللاسلكية الرقمية الثابتة الحقيقية المستخدمة في مسيرات وتوصيلات مرجعية افتراضية طولها 500 27 km.

وبعد عرض وجيز لخصائص موقع التجارب والتجهيزات FSO ترد مقدمة موجزة عن التنبؤ بالحالة FSO وبرمجية محاكاة نوعية خدمة وصلة بصرية وصفها مركز البحوث والتطوير لتليكوم فرنسا.

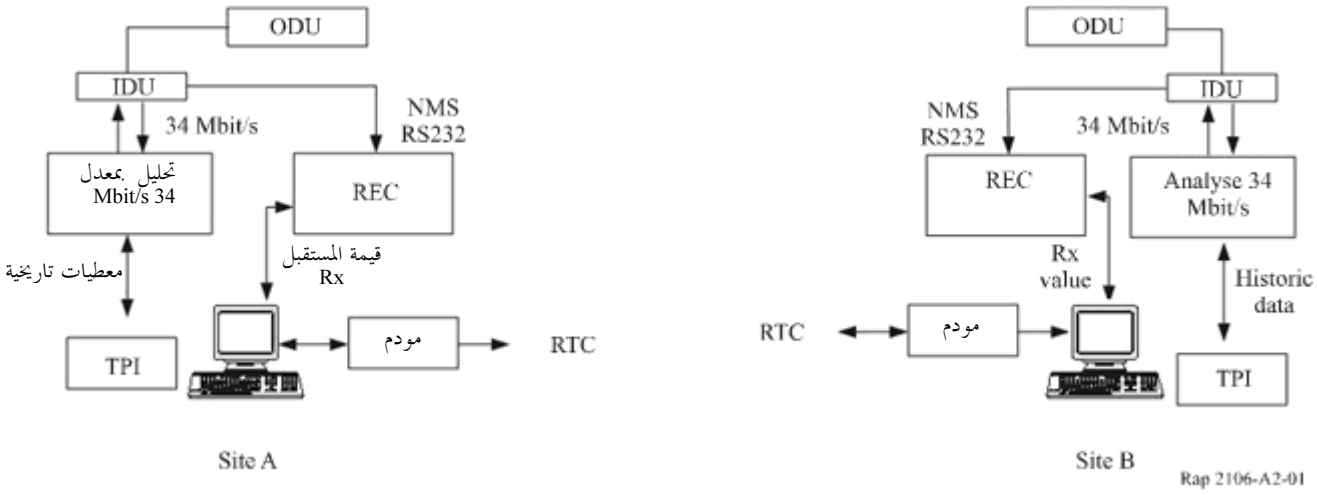
ثم تتم مقارنة نتائج البرمجية مع معطيات الوصلة البصرية ومعطيات الأحوال الجوية في الفترة المعنية من أجل تحقيق الهدفين المنشودين.

2 تجارب ميدانية للوصلة FSOL

1.2 خصائص الموقع والتجهيزات

الشـــكل 1-A2

خصائص الوصلة



وصف التجهيزات، في كل موقع:

- يرسل النظام FSO (ODU الوحدة الخارجية – IDU: الوحدة الداخلية) أرتال ثنائية PDM إلى مكان على بعد 270 m (0,2 ميل) تقريباً يقع بين المبنيين A وB.

- يسجل محلل إرسال الرتل PDH واسمه فيكتوريا كل ثانية الأخطاء أو عدم التيسر حسب الاقتضاء ويرسل النتائج إلى حاسوب شخصي كل 15 دقيقة عبر توصيل RS-232. وهذا تحليل ثنائي. ومن بين المعلومات المسجلة نختار ونعدد ما يلي:
  - ES: ثواني الخطأ (الخطأ في البتات)
  - SES: الثانية شديدة الخطأ
  - عدم التيسر.
- تسجل برمجية إشراف المالك في كل دقيقة السوية المستقبلة (الحساسية) وترسل باستمرار المعلومات إلى حاسوب شخصي.
- يُركب مودم RTC ليتدخل في أي مكان من برمجيات الحاسوب الشخصي عند الحاجة.
- تأتي بيانات الطقس من محطة الأرصاد الجوية الفرنسية الواقعة قرب المطار بلانياك (على بعد أقل من 500 m (0,4 ميل) من موقع تجارب تليكوم فرنسا). وترسل البيانات أسبوعياً بالبريد الإلكتروني محددةً بالقياسات التالية:
  - مقياس الإرسال الذي يعطي قيمة الرؤية (جميع القيم – الوتيرة: كل دقيقة 000 40 قيمة تقريباً شهرياً).
  - مقياس المطر الذي يعطي كثافة الهواطل (القيمة القصوى – الوتيرة: كل ست دقائق).
  - الثلج، ويعطي كثافة الثلج (القيمة القصوى).
  - مقياس الإشعاع السماوي، ويعطي شدة الضوء (القيمة القصوى).

2.2 تصميم الوصلة

1.2.2 معطيات هندسية

الوصلات FSOL مؤلفة من تجهيزين مطرافيين (عمل كل منهما وحدة ODU، ووحدة IDU) يتجه كل منهما نحو الآخر ويتيحان توصيلاً ثنائياً PDH على مسافة قدرها 270 m تقريباً. وثمة معلومات أساسية [BOU 06] داخل إطار وصلة التركيب وهي:

- هامش الوصلة،
- السوية المستقبلة،
- قطر الحزمة النفطية.

2.2.2 المعطيات الميدانية

تظهر المعطيات المقيسة للوصلة في كل اتجاه بعد إجراء عملية التركيب في الجدولين 2A-1 و2A-2:

الجـــدول 2A-1

الحساسية في الاتجاه من A إلى B

الاتجاه: من A إلى B	السوية المستقبلة	نظرياً	dBm 9–
		فعلياً	**dBm 11–**[1]
	هامش الوصفة	نظرياً	dB 41
		فعلياً	**dB 39**

[1] يمكن خفض الفرق بمقدار 2 dB من خلال تسديد أدق.

الجـــدول 2-A2

الحساسية في الاتجاه من B إلى A

الاتجاه: من B إلى A	السوية المستقلة	نظرياً	dBm 9–
		فعلياً	**dBm 16–**[1]
	هامش الوصفة	نظرياً	dB 41
		فعلياً	**dB 34**

[1] يحرص على إبقاء الاختلاف بين الاتجاهين بمقدار 5 dB من أجل دراسة حساسية الهامش نسبة إلى معايير التيسر ونوعية الخدمة.

3 برمجية المحاكاة

تتيح النسخة V3.00 من برمجية التنبؤ بالنظام FSO بما يلي:

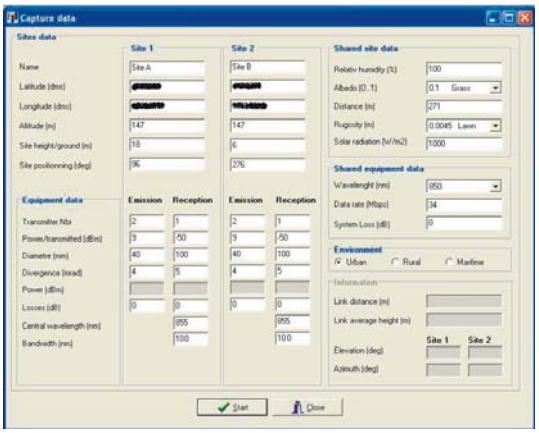
- حساب قيم تصميم الوصلة البصرية لأي مكان جغرافي.
- حساب تيسر هذه الوصلة لأي مكان في فرنسا (في هذه النسخة).

1.3 نافذة تسجيل المعطيات

سجلت القيم التالية في أول نافذة لبرمجية التنبؤ بالنظام FSO: وتقسم إلى ستة أقسام هي: معطيات الموقع ومعطيات التجهيزات والمعطيات المشتركة للمواقع والمعطيات المشتركة للتجهيزات والبيئة والمعلومات. ثم تبدأ عملية الحساب التي تتيح تحديد المعلمات المختلفة للوصلة وكذلك نوعية الخدمة والتيسر استناداً إلى ملفات الأحوال الجوية.

الشـــكل 2-A2

نوافذ تسجيل المعطيات



Rap 2106-A2-02

2.3 نافذة التقرير

تشمل نافذة التقرير ما يلي:

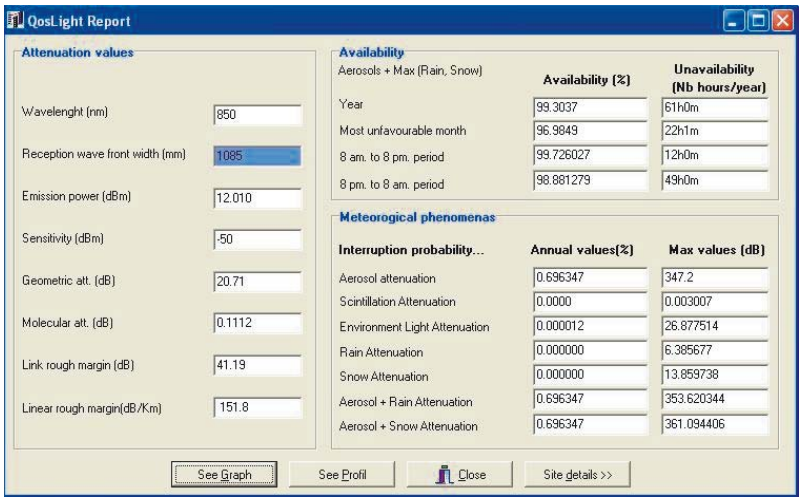
- قسم التيسر
  - تيسر قدره 99,3037% خلال عام، مما يعادل 61 ساعة انقطاع
  - تيسر قدره 99,9849% خلال الشهر الأسوأ، مما يعادل 22 ساعة انقطاع أي 36% من إجمالي الانقطاعات في السنة.

- تيسر قدره 99,7260% خلال النهار، ويمثل نسبة 20% من إجمالي الانقطاعات في اليوم.
- تيسر قدره 99,8813% خلال الليل، ويمثل نسبة 80% من إجمالي انقطاعات اليوم.

- قسم الظواهر الجوية
  - تأثير الضباب وقدره 0,696347%، أي 99,9982% من إجمالي الظواهر الجوية
  - تأثير الضوء المحيط وقدره 0,000012%، أي 0,0018% من إجمالي الظواهر الجوية.
- لا تأثير للتلألؤ أو المطر أو الثلج.

الشـــكل 3-A2

نافذة تقرير



Rap 2106-A2-03

3.3 نافذة المظهر العام

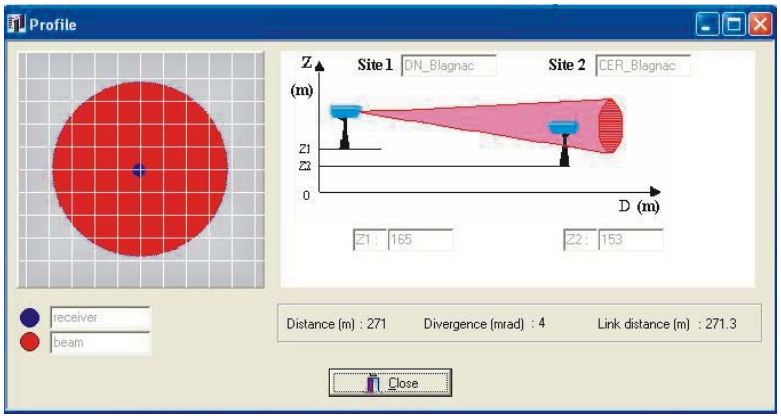
تصلح هذه النافذة للموقعين وتراعي الفرق بين الحزمة الضوئية في المستقبل وسطح المستقبل. وتعادل النسبة الباقية الحزمة الضوئية في المستقبل مقسمة على سطح المستقبل، وتساوي 1085/100، أي 10,85.

وتدل هذه القيمة على:

- تناسب هام يتيح تحقيق تسديد وصلة ثنائية في ظروف جيدة.
- مقارنة جيدة لظاهرة الاهتزاز أو التمدد التي تصيب الوسائط (المباني).

الشـــكل 4-A2

نافذة المظهر العام



Rap 2106-A2-04

4 مقارنة النتائج

يقدم هذا القسم عملية المقارنة بين معطيات التجارب التي أجريت خلال ستة شهور ومعايير التيسر ونوعية الخدمة والقيم الناتجة عن البرمجية.

1.4 مقارنة نتائج برمجية التنبؤ بالنظام FSO مع نتائج النظام FSO ومحطة الأرصاد الجوية الفرنسية

1.1.4 التوهين الناجم عن الرذاذ (الضباب)

ثمة ثلاث صيغ للتوهين الناجم عن الرذاذ أو الضباب يجري تحليلها ومقارنة نتائجها من أجل التحقق من النماذج التي يحددها المرجع Al Naboulsi & Al والتي اعتمدتها برمجية "التنبؤ FSO".

وهذه النماذج الثلاثة هي:

- النموذج Kim & Al
- النموذج Al Naboulsi & Al لضباب الحركة الأفقية في فترة النهار
- النموذج Al Naboulsi & Al لضباب الإشعاع في فترة الليل

وفيما يتعلق بمثال التوهين الناجم عن الإشعاع (انظر المعادلة (3) في الفقرة 2.2.3 من متن التوصية)

$$Aff_{fog,d} = 10\log_{10}(1/\tau(\lambda,d)) = 10\log_{10}(1/\exp(-\sigma(\lambda)d) = 10\log_{10}\exp(\sigma(\lambda)d) = 10\frac{\ln(\exp(\sigma(\lambda)d))}{\ln 10}$$

يعادل:

$$Aff_{fog,d} = \frac{10}{\ln 10}\sigma(\lambda)d$$

مثال على ذلك، في رؤية قدرها 80 متراً بوجود الضباب ينتج: $\sigma(850)d = 49.97$ و $Aff_{fog} = 217$ dB/km

2.1.1.4 الإجراء

تعالج المعطيات لتصبح قادرة على تقديم نماذج مقارنة تقوم على أساس قطع الوصلة FSOL. ويتم اختيار هذه المعطيات عندما يكون الضباب (ملف أحوال جوية – معطيات الرؤية) كثيفاً إلى درجة تنقطع عندها الوصلة البصرية.

مثال على ذلك، تعادل الرؤية البالغة 100 m مع وجود الضباب، توهيناً ناجماً عن الرذاذ قدره 180 dB/km تقريباً أي حوالي 49 dB بالنسبة لطول الوصلة وهذه القيمة أعلى من هامش الوصلة (الهامش الخطي هو 124 dB/km). لذا يحدث نظرياً انقطاع التوصيل.

وينبغي تأكيد هذا الانقطاع الناجم عن الضباب مع التقيد بنفس النماذج الزمنية (MM:DD:YY–HH:MM) وبإرسال ملفات معطيات محلل الإرسال (قيمة عدم تيسر الوصلة) ومعطيات برمجية الإشراف FSO (قيمة الحساسية – S > –55 dBm – القيمة المكافئة للانقطاع في اختبارات المختبر).

ولا يحتفظ إلا بمعطيات الانقطاع الناجم عن الضباب.

3.1.1.4 النتائج

وقد احتفظ بأكثر من 400 قيمة تقريباً تفي بالخصائص التي ورد وصفها أعلاه. واستبعدت بعض المعطيات غير المتسقة (رؤية كبيرة وتوصيل قابل للتشغيل). ويمكن تفسيرها بالمسافة النسبية بين مكان تجريب الوصلة FSOL وموقع محطة الأرصاد الجوية الفرنسية (500 m) التي تؤدي إلى تخالف زمني طفيف في التسجيلات عندما تكون حركة الضباب متعامدة مع الموقعين. أما عندما تكون حركته موازية لموقعين فالنتائج سيئة للغاية.

ويقدم الرسم البياني أدناه النتائج ومنها:

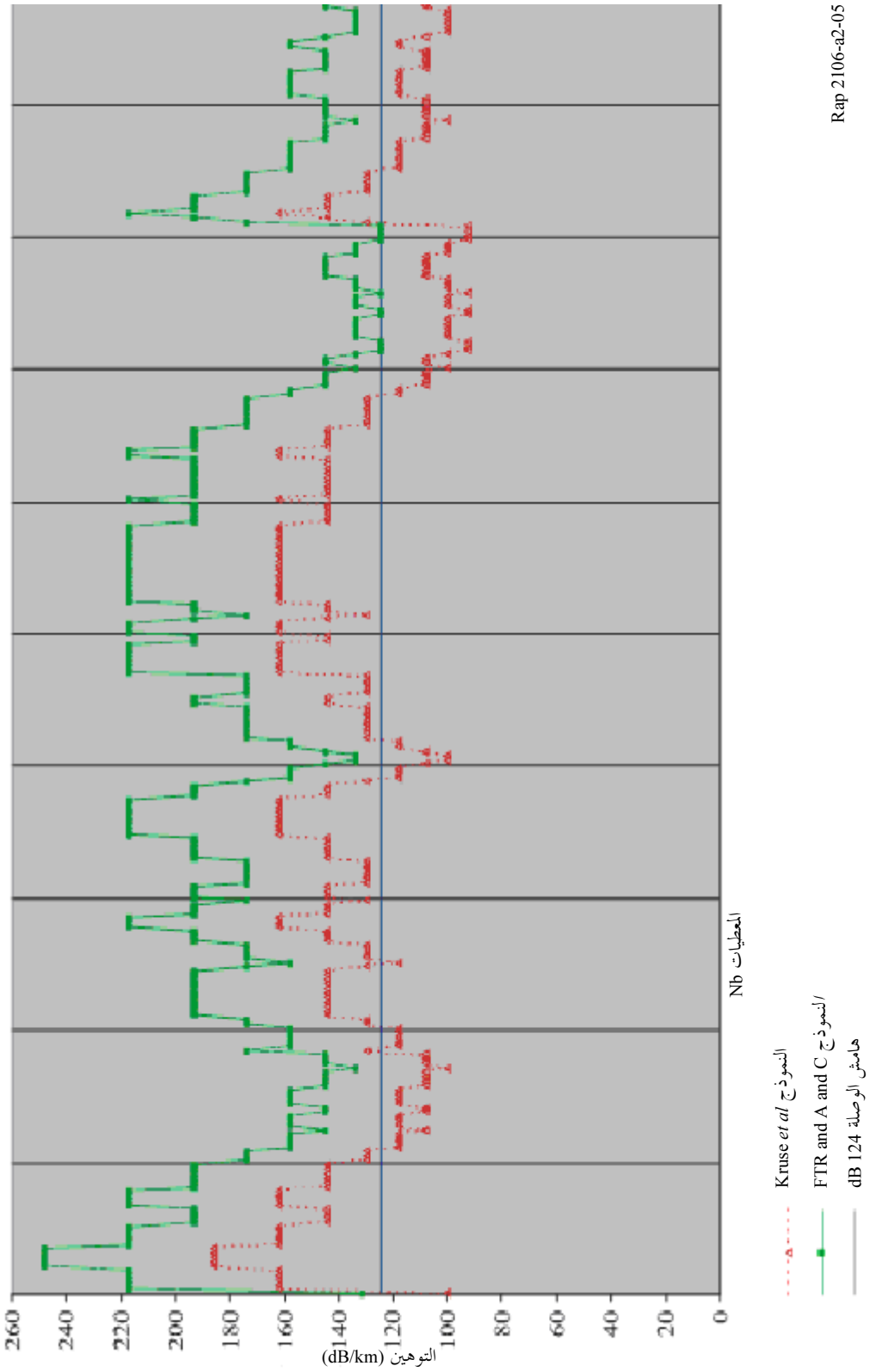
- الهامش الخطي للوصلة البصرية قدره 124 dB/km (المستقيم الأزرق).
- النموذج Kim & Al للتوهين الناجم عن الضباب (المنحني النفطي الأحمر)
- نموذج التوهين الناجم عن الضباب (Al Naboulsi) اللذان يرفقان ساعة بعد ساعة بالحدث لاختيار أحد النموذجين (المنحنى الأخضر).

واختيرت جميع القيم الواردة في هذا الرسم البياني لأنها تمثل رؤية منخفضة جداً مما يعني قيمة عالية للتوهين الناجم عن الضباب والتي تؤدي إلى انقطاع حتمي للوصلة البصرية.

ويبدو أن نموذجي التوهين الناجم عن الضباب الواردين في المرجع Al Naboulsi يقدمان انسجاماً تاماً مع هامش الوصلة (100%) فيما يتعلق بتشكيلة انقطاع الوصلة؛ بينما لا يقدم نموذج Kim & Al للتوهين الناجم عن الضباب الانسجام إلا بنسبة 50% من الحالات تقريباً. ويبدو أن صيغ توهين الضباب حسب Al Naboulsi أكثر انسجاماً مع الواقع.

الشـــكل A2-5

مقارنة التوهين الناجم عن الضباب



2.1.4 توهين ناجم عن عوامل أخرى

1.2.1.4 التوهين الناجم عن المطر

يخضع التوهين الناجم عن المطر لشدة الهواطل R (mm/h) وفقاً للعلاقة التالية (2-A):

$$Attf_{rain} = 1.076 * R^{0.67} \quad \text{dB/km} \tag{2-A}$$

حيث:

R: شدة الهواطل R (mm/h).

وتعطي برمجية "التنبؤ FSO" قيمة معدومة لعدم التيسر للتوهين الناجم عن المطر. وتدل محطة الأحوال الجوية الفرنسية على أن أقصى قيمة للمطر في فترة الاختبار هذه كانت R = 1,6 mm خلال 6 دقائق من الوقت يوم 13 مايو 2005، وهي تعادل تقريباً في أسوأ الاحتمالات 16 mm/h.

التوهين الناجم عن المطر: R = 16 mm/h، Att_{rain} = 1,076 × (16) ^{0,67} = 6.89؛ Att_{rain} = 7 dB/km

التوهين الناجم عن المطر في الوصلة $Att_{rain-link}$ = (7 × 271)/1000 = 1,89 dB؛ أي أن. $Att_{rain-link}$ = 2 dB.

وهذه القيمة أقل من هامش الوصلة؛ لذلك فإن ظاهرة المطر هذه لن تسيء إلى عمل الوصلة البصرية. وتعادل النتيجة التي يتم الحصول عليها باستعمال برمجية التنبؤ FSO المعطيات المناخية لفترة الاختبار.

2.2.1.4 التوهين الناجم عن الثلج

يخضع التوهين الناجم عن الثلج لطول الموجة (λ_{nm}) وشدة الهطول S (mm/h) وفقاً للعلاقة التالية (حالة الثلج الرطب وارتفاع موقع أقل من 500 m (3-A):

$$Att_{snow} = (0.0000542 * \lambda_{nm} + 5.4958776) * S^{1.38} \quad \text{dB/km} \tag{3-A}$$

وتعطي برمجية "التنبؤ FSO" قيمة معدومة لعدم التيسر في التوهين الناجم عن الثلج. وتدل محطة الأحوال الجوية الفرنسية على أن قياسات الثلج في المحطة أجريت بطريقتين هما:

- سوية الماء المكافئة للثلج (وتعادل كمية الهواطل)،
- سوية ارتفاع الثلج على الأرض.

ولم تكن سوية الثلج خلال فترة الاختبار في محطة الأرصاد الجوية في تولوز – بلانياك كافية للتمكن من قياسها. وبالتالي كانت القيمة صفر لظاهرة الثلج في الأرصاد الجوية.

ولذلك Att_{snow} = 0 dB.

وهذه القيمة بالطبع أقل من هامش الوصلة؛ وبالتالي فإن الظاهرة لن تسيء إلى عمل الوصلة البصرية. وقد أعطت برمجية التنبؤ FSO" نتيجة معادلة للمعطيات المناخية خلال فترة الاختبار.

3.2.1.4 التوهين الناجم عن الضوء المحيط

يحدث الترابط الشمسي عندما تقع الشمس في مجال رؤية (FOV) مستقبل بصري. وتحسب برمجية "التنبؤ FSO" كل دقيقة في السنة واحتمال أن تكون أشعة الشمس موازية للوصلة البصرية وأن تكون قدرة الشمس الداخلة إلى المستقبل أعلى من القدرة الواصلة من المرسل.

وتحدد برمجية "التنبؤ FSO" حساب التوهين الناجم عن الضوء المحيط بإتباع المعادلة التالية (ستيفان Law-9)

$$Femis = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{k\lambda T}) - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (4\text{-A})$$

حيث:

λ: طول الموجة (m)

C: سرعة الضوء (3×10^8 m/s)

T: درجة الحرارة (K)

K = $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K

Σ = $5{,}67 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}

H = $6{,}62 \times 10^{-34}$ J/s

وبالتالي ينتج في النافذة الطيفية للمنتج FSO (مرشاح بطول موجة يتراوح بين 720 و950 mm) ما يلي:

$$Femis = \int_{\lambda=720nm}^{\lambda=950nm} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{k\lambda T}) - 1} d\lambda = 11.5 \text{MW/m}^2$$

ويجري تحديد سوية الضوء المحيط التي يتلقاها المستقبل في مجال الرؤية مع قيمة قدرها 5 mrd وقطر قدره 100 mm (5-A).

حيث:

- قطر الشمس = 1,4 مليون km
- المسافة الفاصلة بين الشمس والأرض = 150 مليون km

$$\theta = \arctan g\left(\frac{\text{SunDiameter}/2}{\text{EarthSunDistance}}\right) \quad (5\text{-A})$$

$$\theta = \arctan g\left(\frac{1.4/2}{150}\right) = 0.004333 \text{ rad}$$

θ = 4.3 mrd (أقل من 5 mrd)، ولذلك يستقبل المنتج في بعض الموضعيات كامل شدة الضوء الآتية من الشمس.

وتشير محطة الأرصاد الجوية الفرنسية إلى أن أقصى شدة سجلت للشمس خلال فترة الاختبار هي S = 3 500 J/cm^2 وهي تساوي 1 000 W/m^2 تقريباً.

$$C_n^2 = F_1(\text{roughness}) * F_2(\text{solar} - \text{radiation}) * F_3(\text{humidity}) * (1 + A)$$

*نسبة الخسارة الناجمة عن الشمس (جو + فضاء)

$$\frac{\text{TotalLightFlux}}{\text{EarthTotalLightFlux}} = \frac{\text{FilteredLightFlux}}{\text{FilteredReceivedFlux}} \quad (6\text{-A})$$

$$\frac{64 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{1\ 000 \text{Wm}^{-2}} = \frac{11.5 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{\text{FilteredReceivedFlux}}$$

أي: تدفق مستقبل الترشيح = 180 W/m^2

ويعتبر أن هذا التدفق الداخل يركز تماماً على ثنائي مساري الاستقبال، أي أن:

$$ReceivedPower = FilteredReceivedFlux * ReceptionArea \text{ ، } ReceivedPower = 180 * \left(\frac{\pi}{4} * 0.1^2 \right).$$

وبالتالي تساوي الفدرة المستقبلة 1,4 W 31,5 dBm.

وينبغي مقارنة هذه القيمة مع السوية البالغة –11 dBm أو –16 dBm للقيمة التي وصلت إلى المستقبل FSO. وتدل برمجية "التنبؤ FSO على نسبة عدم تيسر قدرها 0,000012% تنتج عن توهين الضوء المحيط. وهذه القيمة للقدرة الشمسية أعلى في بعض أشكال وضعية الشمس من القيمة المستقبلة؛ مما يؤثر سلباً على الوصلة البصرية عندما تكون الشمس في الاتجاه FSO إلى FOV. وتعادل نتيجة محاكاة التنبؤ FSO المعطيات المناخية لفترة الاختبار.

4.2.1.4 آثار التلألؤ

يحدد التنبؤ حساب آثار التلألؤ.

وتدل محطة الأحوال الجوية الفرنسية على أن أقصى إشعاع شمسي يبلغ 3 500 J/cm^2 (أو 1 000 W/m^2) وأقصى نسبة رطوبة هي 100%.

آثار التلألؤ: $F1 = 8{,}99 \times 10^{-14}$؛ $R = 1\,000$ W/m^2؛ $F2 = 26{,}6$؛ $H = 100$؛ $F3 = 0{,}19$؛ لذلك $C_n^2 = 4{,}5 \times 10^{-13}$

$L = 270$ m؛ $\lambda = 850$ nm؛ $K = 7{,}4 \times 10^{6}$؛ $\sigma X^2 = 1{,}23 \times (7{,}4 \times 10^{6})^{7/6} \times 4{,}5 \times 10^{-13} \times (270)^{11/6} = 1{,}65$

$$Aff_{Scintillation\text{-}Link} = 2{,}57 \text{ dB}$$

وهذه القيمة أقل من هامش الوصلة؛ وبالتالي لا تسيء هذه الظاهرة إلى عمل الوصلة البصرية. وتعادل النتيجة التي تعطيها برمجية "التنبؤ FSO" المعطيات المناخية لفترة الاختبار.

2.4 مقارنة نوعية الخدمة والتيسر للنظام FSO مع توصيات القطاع ITU-R

1.2.4 مقارنة نوعية الخدمة في النظام FSO مع التوصية ITU-R F.1668

تضع التوصية ITU-R F.1668 هدف أداء من حيث الأخطاء للوصلات الثابتة اللاسلكية الرقمية الفعلية ينطبق على الموجات الصغرية للوصلات الثابتة الرقمية من نقطة إلى نقطة. وقد استخدمت هذه التوصية في غياب توصية خاصة بالنظام FSO. وترد أهداف التوصية فيما يتعلق بشبكات معدل نفاذها 34 Mbit/s في الجدول 3-A2.

الجـــدول 3-A2

أهداف الأداء من حيث الأخطاء

	شهرياً	سنوياً
عدد ثواني الخطأ (ES)	389 >	4668 >
عدد الثواني شديدة الخطأ (SES)	14 580 >	174 960 >

وترد نتائج نوعية خدمة الوصلات FSOL في الاتجاهين وطول فترة الاختبار في الجدول 4-A2.

واستناداً إلى هذه النتائج وإلى معايير وصلات الموجات الصغرية يمكن القول إن الوصلة FSOL غير مطابقة لمعايير نوعية الخدمة التي تنص عليها التوصية ITU-R F.1668.

الجـــدول 4-A2

نوعية الخدمة

	الاتجاه: من A إلى B				الاتجاه: من B إلى A				النتائج
الشهر	**عدد ES**	**السوية**	**عدد SES**	**السوية**	**عدد ES**	**السوية**	**عدد SES**	**السوية**	
ديسمبر 2004	17	OK	16	OK	120	OK	120	OK	%100
يناير 2005	104	OK	45	OK	619	OK	**619**	**No**	%75
فبراير 2005	1 048	OK	**1 048**	**No**	134	OK	134	OK	75%
مارس 2005	157	OK	154	OK	88	OK	88	OK	%100
أبريل 2005	1 688	OK	**1 688**	**No**	329	OK	329	OK	%75
مايو 2005	272	OK	264	OK	149	OK	149	OK	%100

2.2.4 مقارنة التيسر في النظام FSO مع أحكام التوصية ITU-R F.1703

تضع التوصية ITU-R F.1703 أهداف تيسر لأي وصلة ثابتة لا سلكية رقمية فعلية تعمل في شبكة النفاذ، وهي تنطبق على الموجات الصغرية للوصلات الثابتة الرقمية من نقطة إلى نقطة. ويقترح استعمال هذه التوصية عند عدم توفر توصية خاصة بالنظام FSO. وترد أهداف التوصية فيما يتعلق بشبكة نفاذ تعمل بمعدل 34 Mbit/s في الجدول 5-A2.

الجـــدول 5-A2

أهداف التيسر

	الشهر الأسوأ	**سنوياً**
التيسر	99,4 < [1] (أي عدم تيسر خلال 154 3 دقيقة أو 240 189 ثانية)	99,99 < (أي عدم تيسر خلال 53 دقيقة أو 180 3 ثانية)

[1] استناداً إلى نسبة تيسر 100% في الشهور الأحد عشر الأخرى.

وترد نتائج نسبة التيسر في الوصلات FSOL في الاتجاهين خلال فترة الاختبار في الجدول 6-A2.

الجـــدول 6-A2

التيسر

	الاتجاه: من A إلى B		الاتجاه: من B إلى A		النتائج
الشهر	**الثواني**	**السوية**	**الثواني**	**السوية**	
ديسمبر 2004	0	OK	0	OK	%100
يناير 2005	1 601	OK	**38 839**	**No**	%50
فبراير 2005	232	OK	0	OK	%100
مارس 2005	13	OK	0	OK	%100
أبريل 2005	818	OK	0	OK	%100
مايو 2005	0	OK	0	OK	%100

واستناداً إلى هذه النتائج وإلى المعايير المطبقة على وصلة الموجات الصغرية يمكن القول إن الوصلة FSOL غير مطابقة لمعايير التيسر التي تنص عليها التوصية ITU-R F.1703.

3.4 مقارنة نسبة تيسر الوصلات FSOL مع نتائج برمجية التنبؤ FSO

جرت مقارنة نتائج محاكاة التنبؤ FSO مع نسبة تيسر الوصلة FSOL خلال ستة أشهر. وهي ترد في الجدول A2-7.

الجـــدول A2-7

التنبؤ FSO

	في الشهر الأسوأ	سنوياً	النتائج
التنبؤ FSO	%96,9849	%99,3037	صحيح
وصلة FSO	[1]9%8,5016	[2]%99,8768	صحيح

[1] عرض سنوي

[2] استناداً إلى أعلى نسبة عدم تيسر

وتعادل نتائج برمجية التنبؤ FSO قيم تيسر الوصلات FSOL خلال فترة الاختبار على الرغم من أنها أكثر تشاؤماً منها نوعاً ما، وذلك بفارق 0,58% على المستوى السنوي و1,56% في أكثر الشهور سوءاً.

ملاحظات وتعليقات

- يجدر بالذكر أن فرق الهامش (5 dB) بين اتجاهي الوصلة البصرية واضح تماماً في نتائج التيسر.
- يحجب أحياناً الدخان الصاعد من مدخنة سطح المبنى A والآتي من المطابخ الوصلة البصرية، لكن هذا الحجب يظهر في أشكال واضحة للغاية (درجة حرارة، اتجاه الريح، سرعة الريح، ...) ولم تجر تكميته.
- يحجب أيضاً شروق الشمس وغروبها الوصلة البصرية، ويرد ذلك في برمجية التنبؤ FSO لكن هذا الحجب قد يكون أكثر تواتراً.
- أكد الأشخاص المقيمون بجوار موقع الاختبارات قيم الرؤية (الضباب) الاستثنائية أثناء فترة الاختبارات (ظاهرة ضباب هامة عام 2005 لم تسجل منذ عام 1995 على الأقل). ولذا يستحسن تحديث المعطيات المناخية في برمجية التنبؤ FSO دورياً وبانتظام.

5 الخلاصة

أتاحت اختبارات الوصلة البصرية تحقيق هدفين اثنين هما:

- مقارنة النتائج مع نتائج برمجية التنبؤ FSO:
  - توضح التحليل الإحصائي للوصلة البصرية من حيث الانقطاع بسبب الضباب بمزيد من الدقة النماذج الواردة في البرمجية.
  - اتساق استنتاجات اختبار المعطيات لظواهر التوهين الأخرى مع نتائج البرمجية.
  - تعادل نتائج التيسر في البرمجية على الرغم من فارق بسيط أكثر تشدداً من حقيقة الوصلات FSOL.

– مقارنة نتائج الوصلات FSOL مع أهداف التوصيات الصادرة عن القطاع ITU-R القائمة على معايير الوصلة الصغرية:
– لا تتوافق نتائج الوصلة البصرية مع أحكام التوصية ITU-R F.1668، أهداف التيسر في الوصلات الثابتة اللاسلكية الرقمية الحقيقية المستخدمة في مسيرات ووصلات مرجعية افتراضية طولها 500 27 km.
– لا تتوافق نتائج الوصلة البصرية مع أحكام التوصية ITU-R F.1703، أهداف الأداء من حيث الأخطاء للوصلات اللاسلكية الثابتة الرقمية الحقيقية المستخدمة في مسيرات ووصلات مرجعية افتراضية طولها 500 27 km.

المراجع

[BOU 06] Olivier BOUCHET *et al.* [2006] Free-space Optics: *Propagation and Communication*. ISTE Publishing Company. ISBN: 1905209029.

[FSO 04] http://www.francetelecom.com/en/.