

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التقرير **ITU-R SM.2422-1**
(2019/06)

الضوء المرئي للاتصالات عريضة النطاق

السلسلة **SM**
إدارة الطيف

الاتحاد الدولي للاتصالات



تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

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

سلاسل تقارير قطاع الاتصالات الراديوية

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

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

ملاحظة: وافقت لجنة الدراسات على النسخة الإنكليزية لهذا التقرير الصادر عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني
جنيف، 2022

© ITU 2022

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

التقرير ITU-R SM.2422-1

الضوء المرئي للاتصالات عريضة النطاق

(2019-2018)

1 مقدمة

بدأ فريق العمل المعني بإدارة الطيف الترددي لدى قطاع الاتصالات الراديوية بدراسة المسألة ITU R 238/1 التي اعتمدها جمعية الاتصالات الراديوية في عام 2015. والقصد من هذا التقرير هو معرفة كيف يمكن لاستخدام الاتصالات بالضوء (القريب من) المرئي (VLC) (أو ربما يكون المصطلح الأفضل لها هو الاتصالات اللاسلكية البصرية) أن يساعد في تخفيف الازدحام في الطيف الراديوي، وبأي طريقة، وإلى أي مدى. ويمكن للجمع بين تطوير تكنولوجيات جديدة واستخدام الاتصالات بالضوء المرئي أن يشكل توليفة مثيرة للاهتمام وربما أحد حلول الاستخدام الفعال للطيف الراديوي.

ويجري تناول المواضيع التالية:

- الخصائص المميزة (التقنية والتشغيلية) لاستخدام الاتصالات بالضوء (القريب من) المرئي (VLC) في الاتصالات عريضة النطاق من حيث استعمالها للطيف؛
- مزايا وعيوب استخدام الاتصالات بالضوء (القريب من) المرئي (VLC) (وهي قد تشمل: الكفاءة، التداخل، المخاطر الصحية، الأمن السيبراني)؛
- التطبيقات الجديدة المرتبطة بالضوء المرئي المستخدم للاتصالات عريضة النطاق؛
- الحواجز التي تعترض تطوير الاتصالات عريضة النطاق من أجل الانتقال إلى تنفيذ الاتصالات بالضوء (القريب من) المرئي (VLC) في جميع أنحاء العالم (من قبيل الحواجز التنظيمية، و/أو الثقافية، و/أو الاقتصادية)؛
- الطريقة التي توصل بها الاتصالات بالضوء (القريب من) المرئي (VLC) بأنظمة الاتصالات الحالية (الثابتة والمتنقلة).

2 تاريخ الاتصالات بالضوء المرئي

منذ العصور الغابرة حتى القرن التاسع عشر، اعتمدت أنظمة الاتصالات بالضوء المرئي جميعها على العين البشرية كمستقبل. وغير اختراع ألكسندر غراهام بيل وتشارلز سومر تينتر للهاتف الضوئي من طبيعة الاتصالات بالضوء المرئي. فهما استفادا من واقع أن مقاومة السيليونيوم تتغير بتغير كثافة الضوء واستخدما هذه الخاصية بتوصيلها بمستقبل هاتف لإرسال إشارات سمعية. وتحقق العديد من التحسينات على هذه الأنظمة حتى خمسينيات القرن العشرين، بيد أن معظم المواد المستخدمة للكشف لها حساسية أعلى للإشعاعات تحت الحمراء، مما استبعد استخدام الضوء المرئي كوسط إرسال.

وأثار ظهور ثنائيات المساري الضوئية (LED) اهتماماً جديداً باستخدام الاتصالات بالضوء المرئي. وبعبارة أدق، أتاح ظهور ثنائيات مساري الغاليوم آرسنايد (GaN) الضوئية [1] والفوسفور الأبيض الضوئي [2] مصادر ضوء مرئية يمكن تشكيلها بسرعات أعلى، دون التضحية بدورها الرئيسي في الإضاءة. وفي عام 2004، أجريت أول البيانات العملية لاتصالات عالية السرعة بثنائيات LED في اليابان، باستخدام ثنائيات المساري الضوئية. ومكّن انتشار الهواتف الخلوية المزودة بكاميرات من استخدامها كمستقبلات للاتصالات بالضوء المرئي. وبدأ الباحثون باستخدام شاشات العرض بالكريستال السائل (LCD) وعناصر العرض الأخرى كرسولات.

وكانت إحدى هيئات التقييس الأولى التي أعدت معياراً للاتصالات بالضوء المرئي هي اتحاد اتصالات بالضوء المرئي (VLCC) في اليابان. إذ وسَّعت معيار رابطة إرسال البيانات عن طريق الأشعة تحت الحمراء (irDA) من أجل الاتصالات بالأشعة تحت الحمراء ليشمل طيف الضوء المرئي في عام 2008.

3 الضوء المرئي والنطاق العريض

1.3 إمكانيات استخدام النطاق العريض عبر الضوء المرئي

تشير النتائج إلى إمكانية تحقيق معدلات بيانات نفاذ لاسلكية بصرية بالضوء المرئي تتراوح بين بضعة b/s وأكثر من 10 Gbit/s في مستويات الإضاءة المعيارية في الأماكن المغلقة. والاتصالات بالضوء المرئي تتمتع بالقدرة الكامنة على تخفيف الازدحام بنطاقات طيفية منخفضة الترددات الراديوية بفضل إمكانية استخدام الطيف الضوئي كمورد طيف إضافي للاتصالات عريضة النطاق.

2.3 مكاسب الكفاءة لاستخدام الضوء المرئي للاتصالات عريضة النطاق

تنشئ الاتصالات بالضوء المرئي وصلة لاسلكية بصرية اتجاهية. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تنشأ وصلة بصرية واحدة من مصباح على السقف مسدد مباشرة نحو الأرضية. وهي تسمح لأكثر من مستخدم واحد بالتقاسم في الوصلة نفسها. ويتقدم عدد من أجهزة الاتصالات بالضوء المرئي يمكن استيعابها دون أي تداخل من خلال إعادة الاستخدام المكانية.

3.3 استخدام الطيف

تستخدم الاتصالات بالضوء المرئي الطيف المرئي (أطوال موجية بين 390 و750 nm) ويمكنها تقديم اتصالات لاسلكية باستخدام عناصر الإضاءة والعرض.

وتتملك الاتصالات اللاسلكية البصرية (OWC) القدرة الكامنة على تخفيف الازدحام في نطاقات الترددات الراديوية (RF) الأدنى حيث يمكن استخدام الضوء كمصدر طيف إضافي للاتصالات عريضة النطاق.

4.3 التطبيقات/الخدمات التي يمكن أن تستفيد من الاتصالات بالضوء المرئي

يمكن تصنيف الاتصالات بالضوء المرئي الممكنة في ثلاث مجموعات:

- اتصالات استشعار الصور (ISC).
- اتصالات مستقبل ثنائي المساري الضوئي منخفضة المعدل (LR-PC).
- اتصالات مستقبل ثنائي المساري الضوئي عالية المعدل (HR-PC).

وفيما يتعلق بتعريف المعدل المنخفض والمعدل العالي، فإن معدل بيانات عتبة الصبيب يبلغ 1 Mbit/s كما يقاس عند خرج الطبقة المادية للمستقبل. ويُعتبر الصبيب الذي يقل عن 1 Mbit/s ذا معدل منخفض، أما الصبيب الذي يزيد عن 1 Mbit/s فيُعتبر ذا معدل عالٍ.

اتصالات استشعار الصور

تمكّن اتصالات استشعار الصور للاتصالات اللاسلكية البصرية (OWC) من استخدام مصادر الإضاءة كمربّسل وأجهزة الاستشعار بالصور كمستقبل. وتتضمن التطبيقات الممكنة ما يلي:

- الخدمات القائمة على الموقع/تحديد المواقع داخل المباني والملاحة
- تطبيقات مكتبية/منزلية داخل المباني (قاعات المؤتمرات، ومراكز التسوق، والمتاحف، وقاعات العرض، وما إلى ذلك)
- اتصالات المركبات

- تطبيقات الـ 5G القائمة على ثنائي المساري الضوئي
- اتصالات من نقطة إلى نقطة (نقاط متعددة)/ترحيل
- الرعاية الصحية
- الشبكات الرقمية وتسليم المحتوى المستند إلى الموقع
- خدمات البيانات داخل مركبة (طيران، قطار، سفينة، حافلة، وما إلى ذلك)
- سيارات موصولة ومركبات مستقلة ذاتياً
- الاتصالات تحت الماء/الساحلية
- إنترنت الأشياء (IoT).

وفيما يلي المتطلبات التي يتعين أن تلتزم بها اتصالات استشعار الصور: التحكم في التعطيم، والتحكم في استهلاك القدرة، والتعايش مع الإضاءة المحيطة، والتعايش مع أنظمة الإضاءة الأخرى، والاتصالات المتزامنة بمرسلات متعددة ومستقبلات متعددة (MIMO)، ومصدر بيانات صورة نقطية تقريباً، وتحديد مصادر الضوء المشكّل، وإرسال تكراري منخفض البيانات الخدمية، وتوافق مع جهاز الاستشعار بالصورة، وتحديد الموقع.

وفي الاتصالات المتزامنة بمرسلات متعددة ومستقبلات متعددة (MIMO) يجوز إدماج بروتوكول MAC MIMO، بحيث يعرف جهاز استقبال مفعّل بكاميرا كيف يعالج البيانات المستقبلية. وينبغي أن تدعم اتصالات استشعار الصور الاتصالات عندما يظهر مصدر الضوء كمصدر نقطي تقريباً؛ أي عندما يكتفي مصدر الضوء بإضاءة عدد قليل من بكسلات الصورة.

وبوسع اتصالات استشعار الصور أن تدعم عدة قنوات اتصالات بين مرسلات متعددة منسقة/غير منسقة ومستقبلات متعددة منسقة/غير منسقة.

وينبغي أن تدعم اتصالات استشعار الصور الاتصالات المتوافقة مع مجموعة متنوعة من الكاميرات بمختلف معدلات أخذ عينات استشعار الصور (وقت الاستظهار) والاستبانة ومعدلات الأطر. وعلى وجه التحديد، سيُدمج إما معدل أطر ثابت أو معدل أطر متغير. وستُدمج إما الاستبانة المستمرة أو الاستبانة المتغيرة.

اتصالات ثنائي المساري الضوئي منخفضة المعدل

تتطلب ثنائي المساري الضوئي منخفضة المعدل مصادر ضوئية كمرسل وثنائيات مساري ضوئية منخفضة السرعة كمستقبلات. وتتشابه التطبيقات الرئيسية مع التطبيقات الخاصة باستشعار الصور.

واتصالات مستقبل ثنائي المساري الضوئي منخفضة المعدل هي أساساً لمصادر الـ 5G الضوئي (مثل وسوم ثنائي المساري الضوئي وأضواء وميض الهاتف الذكي، وما إلى ذلك) المستخدمة كمرسلات. ويمكنها أن تقدم آليات لدعم التسليم بين مصادر الضوء، بما يسمح للمستخدمين بالحفاظ على توصيل مستمر بالشبكة.

وبوسع اتصالات مستقبل ثنائي المساري الضوئي أن تقدم آليات يمكن استخدامها لتطوير وتسليم تقنيات تنسيق التداخل بواسطة طبقات أعلى، وبوسعها أن تدعم آليات استرداد الوصلة للحفاظ على توصيل في قنوات غير موثوقة وخفض تأخير التوصيلية.

اتصالات ثنائي المساري الضوئي عالية المعدل

إن استخدام مستقبلات ثنائي المساري الضوئي عالية المعدل سيمكّن الاتصالات اللاسلكية عالية السرعة وثنائية الاتجاه والموصولة شبكياً. وفيما يلي التطبيقات الرئيسية لهذا الأسلوب:

- تطبيقات مكتبية/منزلية داخل المباني (قاعات المؤتمرات، ومراكز التسوق، والمتاحف، وقاعات العرض، وما إلى ذلك)
- مراكز البيانات/المنشآت الصناعية، والشبكات اللاسلكية الآمنة (خلايا التصنيع، المصانع، وما إلى ذلك)

- اتصالات المركبات
 - وصلة وسيطة لاسلكية (وصلة وسيطة خلوية صغيرة، وصلة وسيطة للمراقبة، مد جسور شبكة محلية)
 - الرعاية الصحية
 - خدمات البيانات داخل مركبة (طيران، قطار، سفينة، حافلة، وما إلى ذلك)
 - سيارات موصولة ومركبات مستقلة ذاتياً
 - الاتصالات تحت الماء/الساحلية
 - إنترنت الأشياء (IoT)
- وفي اتصالات مستقبل ثنائي المساري الضوئي عالية المعدل، ينبغي دعم تدفق البيانات المستمر لجميع التطبيقات بخواص وظيفية ثنائية الاتجاه وكذلك إرسال الرزم القصيرة حيثما تدعو الحاجة إلى كمون منخفض. وينبغي أن تُدرج آليات لدعم الإرسال التكميلي وكذلك اتصالات مستخدمين متعددين بتدفقات بيانات مختلفة من نفس مصدر الضوء (نفاذ متعدد).

4 جوانب إدارة الطيف ذات الصلة بالضوء المرئي

تخضع الاتصالات بالضوء المرئي لخصائص انتشار مختلفة اختلافاً كبيراً بالنسبة للترددات في طيف الترددات الراديوية. ونتيجة لذلك، يكون احتمال التداخل ضئيلاً، ولا حاجة لمنظمي الطيف بإدارة الاتصالات الضوئية.

ويعتقد معيار IEEE 802 أن عمليات الاتصالات الخفيفة ينبغي تصنيفها على أنها معفاة من الترخيص ولا تخضع للتخصيص الحصري. وقد تأكدت وجهة النظر هذه من خلال دراسة أجريت بتكليف من وكالة الاتصالات الراديوية في هولندا [18]. وذهب أحد الاستنتاجات التي خلصت إليها هذه الدراسة إلى أن: "هناك تحديات لا يزال يتعين التغلب عليها قبل نشرها (أي الاتصالات الخفيفة) تجارياً. ونوصي بالتركيز أكثر على جهود التقييم التي يقوم بها الاتحاد الدولي للاتصالات أو معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) بدلاً من القواعد الحكومية وبقصر اللوائح الحكومية في المقام الأول على حدود تتعلق بالمخاطر الصحية، والبصمة الكربونية، والمنافسة التجارية. ولن يزيد التقييم من التوافق بين المنتجات الصناعية فحسب، بل أيضاً من التوافق مع التكنولوجيات التي سبق نشرها". ومن الضرورة بمكان التمسك بلوائح الصحة والسلامة المحلية ذات الصلة فيما يتعلق بسلامة العين البشرية وحساسيتها. وينبغي أن تلتزم الأجهزة التي تستخدم الاتصالات بالضوء المرئي أو الاتصالات اللاسلكية البصرية بأي لوائح محلية تتعلق ببث الترددات الراديوية وينبغي أن تتجنب التسبب في التداخل على نطاقات الترددات الراديوية.

ولا يعبر عادةً عن ترددات الاتصالات البصرية بالطول الموجي. وفي حين أن nm 1 550 هو الطول الموجي الأكثر استخداماً للاتصالات بالألياف البصرية بسبب خصائص الامتصاص والانتثار في الزجاج، لا ينطبق هذا القيد على الاتصالات بالضوء المرئي في الأثير العادي. وبالتالي فإن مدى التردد القابل للاستخدام هو 1,4-2,5 THz أو 400-700 nm.

1.4 المسألة 1: فرص الطيف وتوزيع الطيف

زيادة فرص الطيف من خلال الجمع بين الاتصالات الراديوية، مثل 60/5/2,4 GHz، والاتصالات اللاسلكية البصرية، سواء داخل المباني أو في الخلاء: اغتنام التأزر الممكن بين تكنولوجيا الأمانة اللاسلكية (Wi-Fi) وتكنولوجيا الأمانة الضوئية (Li-Fi)، وتوخي الحرص لتخفيف الضباب وتخفيف أشعة الشمس في سيناريوهات الخلاء، انظر المرجعين [9] و [10]. ويرد في المرجع [18] أن نشر الاتصالات اللاسلكية البصرية يمكن أن يسترعي اهتماماً خاصاً في البيئات التي ينفذ فيها العديد من المستخدمين المتطلبين لعرض نطاق عالٍ إلى الشبكة في مكان ضيق، أو حيث يتعذر استخدام تكنولوجيات الراديو التقليدية، أو يتعذر تقديم مستوى الخدمة اللازم. وقد يساعد الجمع بين ممثلين عن مجموعات المستخدمين المحتملين وقطاع الإنشاءات وصناعة الاتصالات ومصنعي الأجهزة ومقدمي الحلول في دفع عجلة حالات الاستخدام ومتطلبات المعايير والتطورات الأخرى، وفي تحديد الأسواق المتخصصة حيث تكون فائدة إدخال الاتصالات اللاسلكية البصرية أكبر ما تكون".

2.4 المسألة 2: مبادئ تخطيط الطيف

تُنشر أنظمة الاتصالات بالضوء المرئي نمطياً باستخدام نظام الإضاءة لثنائي المساري الضوئي (القائم)، حيث تشكّل شدة الضوء المرئي لثنائيات المساري الضوئية من أجل نقل معلومات البيانات لاسلكياً إلى الأجهزة. وعادةً ما تُصمّم أنظمة الإضاءة هذه لتغطية مساحة كبيرة، وبالتالي فهي تقدم نمطياً توصيلات بيانات إلى أجهزة متعددة داخل هذه المساحة. ومن ثم، تحتاج هذه الأجهزة إلى بروتوكول تتقاسم وفقه سعة نظام ثنائي المساري الضوئي، أي بروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط. وعادةً ما يقوم بروتوكول التحكم في النفاذ إلى الوسائط (MAC) هذا بتجزئة سعة الاتصالات الإجمالية لنظام ثنائي المساري الضوئي إلى أجزاء أصغر، حيث يحصل كل جهاز نشط على جزء منها في منافسة مع الأجهزة الأخرى، مما يعني أن رغبة جهاز في سعة أكبر، سيترتب عليها حصول جهاز آخر على سعة أصغر. والعمل بروتوكول MAC وبالتالي تقاسم الموارد يعني ضمناً صعوبة تقديم سعة مضمونة للجهاز. وإنشاء وصلة إلى جهاز عبر بروتوكول MAC يعني ضرورة إنشاء وصلة في عملية تفاوض مع الأجهزة الأخرى. وهذه العملية تستغرق وقتاً، والنتيجة غير مضمونة. ويقلل وقت التفاوض هذا من صافي الوقت المتاح لإرسال البيانات، وبالتالي فهو يقلل من صبيب بيانات الشبكة. وعلاوةً على ذلك، يتعين تشغيل نظام الإضاءة بثنائي المساري الضوئي لدعم نقل البيانات. وقد لا يُرغب دائماً بحالة الإضاءة هذه، ومثال ذلك، عندما تكون الغرفة مغمورة أصلاً بضوء النهار الساطع، أو عندما يفضل المستخدم العتمة أو مجرد الضوء الخافت. ومن ثم قد يؤدي نظام الاتصالات بالضوء المرئي إلى استهلاك طاقة إضافية غير مرغوبة عند الحاجة إلى الاتصالات فقط دون أي إضاءة.

وبدلاً من ذلك، يمكن استخدام حزم ضوء متعددة محصورة لنقل معلومات البيانات (ويرد مثال ذلك في المرجع [4]). وتخدم كل حزمة جهازاً واحداً ويتعين توجيهها بدقة كافية تجاهه. وبالتالي تُخصّص سعة تلك الحزمة كاملةً لجهاز واحد فقط. ومن ثم، لا يلزم بروتوكول MAC، ولا تقاسم في السعة مع الأجهزة الأخرى. وبالتالي، يمكن تقديم سعة مضمونة إلى جهاز، ولا يُهدر أي وقت في عملية MAC، ويتحسن صافي صبيب الشبكة. وعلاوةً على ذلك، لا تقدّم الحزمة الضوئية إلا للأجهزة التي تحتاجها، وتقتصر على تلك الأماكن؛ لذلك، تُستهلك طاقة الحزمة بالشكل الأمثل، وبالتالي يقل استهلاك الطاقة في اتصالات البيانات إلى الحد الأدنى. وتفضّل الحزم الضوئية المستخدمة لضوء بطول موجي أكبر من $1.4 \mu\text{m}$ ، لأن ذلك يسمح باستخدام قدرات حزم تصل إلى 10 mW بدون تعريض سلامة العين لمخاطر. يحتاج توجيه حزمة الأشعة تحت الحمراء إلى عمليات تحكم تسجل أولاً ما إذا كان الجهاز يطلب خدمة، وبعد ذلك تحدد وقع الجهاز، وتوجه بمعلومات تحديد الموقع هذه الحزمة نحو الاتجاه الصحيح وبذلك تقام وصلة الاتصالات. وهكذا يقدم النظام الموجّه بالأشعة تحت الحمراء سعة اتصالات في تلك الأماكن عند الحاجة، وبالتالي فهو يعمل بالطريقة الأكثر وعياً بالطاقة.

ويشيع أسلوب نماذج القنوات للقيام بإدارة طيف الضوء المتاح "ضمن النظام"، وتمكن إدارة ذلك من خلال المعايير التقنية الخاصة بالتطبيقات المعنية. ويمكن الاطلاع على بعض المعلومات بهذا الصدد في المرجع [17].

3.4 المسألة 3: التنسيق الدولي والإقليمي

يفضّل طيف الضوء المرئي الذي يطابق أو يتوافق مع المعايير الدولية (أي معايير ETSI لأوروبا) وكأي نظام وجهاز، ينبغي أن يمثل لقوانين ولوائح البلدان. ولكن من المهم ألا تنطوي أجهزة الاتصالات بالضوء المرئي على أي مخاطر صحية. وينبغي تركيبها بشكل صحيح وآمن بحيث لا تنتج أي تداخل كهرومغناطيسي ضار (EMI).

5 الخصائص التقنية والتشغيلية للاتصالات عريضة النطاق على مسافة قصيرة عبر الضوء المرئي

يتضمن هذا القسم أيضاً نصاً مقتبساً من المرجع [16] بشأن المنتجات والنماذج الأولية. وهي ليست بالضرورة تطبيقات عريضة النطاق ولكنها أدرجت لإظهار التكنولوجيا المتاحة.

1.5 مرسل الاتصالات بالضوء المرئي

تردد الموجة الحاملة: يكون تردد الموجة الحاملة محدوداً في نطاق ترددات الضوء المرئي.

أسلوب النقل: يمكن أن يقدم قطاع الاتصالات الراديوية أساليب متعددة لتشغيل أجهزة الضوء المرئي المادية لاتصالات بمعدل بيانات منخفض وعال تسمح بالاستخدام الأمثل لعرض النطاق البصري المتاح على وحدة إضاءة معينة لدعم اتصالات مستشعرة بالصور واتصالات ثنائي المساري الضوئي منخفضة المعدل واتصالات ثنائي المساري الضوئي عالية المعدل.

سلامة العين والرفيف: سيكون الضوء المشكّل آمناً للعين البشرية في جوانب التردد وشدة الضوء. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الضوء المشكّل لن يجلب أمراضاً مثل الصرع الحساس للضوء.

التحكم في التعقيم: سيدعم المعيار التحكم في التعقيم لجميع التطبيقات.

مدى الاتصالات: يعتمد مدى الاتصالات على عوامل خارجية متعددة (تكبير الإشارة، تسوية الإشارة، مصدر القدرة، وما إلى ذلك). وهذه هي جوانب التنفيذ وهي تقدّم كمبادئ توجيهية ليس إلّا. وستتفق اللجنة على استخدام نفس نموذج القناة لتقييم قدرات أداء المخططات المقترحة.

التعايش مع الضوء المحيط: سيتعايش المعيار مع الضوء المحيط الذي يمكن أن ينعكس على سطح جهاز إرسال ومع ثلاث مجموعات لخدمة الاتصالات بالضوء المرئي.

التعايش مع أنظمة الإضاءة الأخرى: سيتعايش المعيار مع أنظمة الإضاءة الأخرى.

تحديد هوية المرسل: سيدعم المعيار مخططاً لتحديد المرسلات عند نقل مستقبل أو مرسل إلى موقع آخر. ويمكن لمستقبل أن يحدد هوية مرسل لجهاز الإرسال.

2.5 مستقبل الاتصالات بالضوء المرئي

يقيس مستقبل الاتصالات بالضوء المرئي شدة الضوء المرئي ويفك شفرة المعلومات المرسلة، حسب حاجة استخدام التطبيق.

ونظراً لكونه جزءاً من جهاز المستخدم، ينبغي أن يكون مستقبل الاتصالات اللاسلكية البصرية مضغوطاً ومنخفض التكلفة، وينبغي ألا يتطلب محاذاة متعبة وينبغي أن يلتقط ما يكفي من القدرة الضوئية لتمكين سعة بيانات عالية باتجاه المقصد. ومن ثم، ينبغي أن يكون له زاوية رؤية كبيرة وفتحة كبيرة. بيد أن زيادة المساحة النشطة للكاشف الضوئي عادةً ما يصاحبها خفض في عرض نطاقه، ومبدأ "etendue"، الذي يميز مدى "انفساح" الضوء من حيث الزاوية والمساحة، يعني ضمناً تعذر تصغير جداء الفتحة بالزاوية الجسمية. ويمكن استخدام عدسات عين السمكة لتكبير فتحة المستقبل، أو بصريات غير عاكسة كمرآة مركّزة مكافئة مركّبة، تُستخدم عادةً لتركيز الطاقة الشمسية. ويمكن لصفيف ثنائي الأبعاد من الكاشفات الضوئية السريعة، المدججة مع مضخمات كهربائية مسبقة فردية ومرحلة تجميعية، أن يحافظ على عرض نطاق كبير [11]. وبدلاً من ذلك، يمكن فصل وظيفة تجميع الضوء عن وظيفة كشف الضوء، ليتحقق الأداء الأمثل لكل من هاتين الوظيفتين على حدة.

ويمكن لمقرن شبكة واسعة السطح (SGC)، الذي يجمع الضوء الوارد والمدمج بدليل موجي مع ثنائي مساري ضوئي سريع، أن يدعم استقبال OOK Gbit/s متعدد [12]. وبصيف من مقرنات SGC بالإضافة إلى جامع على الرقاقة، تمكن مواصلة توسيع الفتحة دون المساس بعرض النطاق. وتمكن إزالة "قيود etendue" من خلال التحويل بالطول الموجي (λ) للضوء المستقبل وحصره في الدليل الموجي للوح مشوب بالفلوروفور [13].

وفي الاتصالات اللاسلكية البصرية الموجهة بحزمة، تدعو الحاجة على وجه الخصوص إلى تحديد موقع أجهزة المستخدم وتتبعها. فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام تقنيات Wi-Fi، أو انعدام مخطط هوائي 60 GHz [14]، أو وسوم ثنائي المساري الضوئي للأشعة تحت الحمراء على جهاز المستخدم المراقب بكاميرا رخيصة [15]، وما إلى ذلك.

وتناسب الاتصالات اللاسلكية البصرية بشكل خاص البيئات التي تكون فيها الاتصالات الراديوية (أو ستكون) أقل جدوى بسبب مجموعة من العوامل:

- شح الطيف
- الحاجة إلى سعة عالية للغاية
- الإعراض عن استخدام تكنولوجيا الراديو
- التشريعات
- الحاجة إلى الإرسال اللاسلكي الذي يمكن احتواؤه داخل المبنى.

والاتصالات البصرية قابلة للتطبيق على أنظمة مختلفة. وتعتمد كيفية تنفيذها في هذه الأنظمة على مدى الإرسال المطلوب. وبناءً على هذه المديات، يمكن تقسيم تطبيقات الاتصالات اللاسلكية البصرية إلى خمسة تصنيفات كما يلي:

- الاتصالات اللاسلكية على المدى بالغ القصر، تنطوي على مدى يطبّق على اتصالات من رقاقة إلى رقاقة حيث يمكن تطبيق الاتصالات اللاسلكية البصرية من خلال وسيلة تسمى التوصيل البيني البصري عبر الفضاء الحر (FSOI). وهي تتيح التوصيل البيني المباشر بين الرقائق عبر شعاع من الضوء. ويمكن أن يحل هذا التطبيق بعض الإشكالات الحالية في التوصيل البيني الكهربي القائم على النحاس، كمعدلات البيانات، والتداخل الكهرومغناطيسي، واستهلاك القدرة.
- الاتصالات اللاسلكية قصيرة المدى، تطبّق عادة على تطبيقات شبكة منطقة الجسد اللاسلكية (WBAN) وتطبيقات شبكة المنطقة اللاسلكية (WPAN). والهدف منها هو جمع البيانات وإرسالها في محيط شخص ما. ويجري تطوير أنظمة جديدة باستخدام الاتصالات اللاسلكية البصرية في الرعاية الصحية. وهي تُعرف باسم شبكة منطقة الجسد اللاسلكية البصرية (OWBAN)، لأنها قد تقدم بديلاً آمناً وخالياً من التداخل لشبكات WBAN القائمة على الترددات الراديوية.
- الاتصالات اللاسلكية متوسطة المدى، تنطوي على مدى يطبّق على الشبكات المحلية اللاسلكية (WLAN). ويمكن تمييز أنظمة الاتصالات اللاسلكية البصرية الحالية ضمن تصنيف هذا المدى بين الاتصالات بالضوء المرئي والاتصالات بالأشعة تحت الحمراء الموجهة بحزمة. ويعتمد نظام الاتصالات بالضوء المرئي عادة على نظام الإضاءة المحيطة لثنائي المساري الضوئي، ويعيد استخدام ثنائيات المساري الضوئية لتشكيل البيانات. وبالتالي، فإن نظام الاتصالات بالضوء المرئي يغطي مساحة واسعة، حيث يتعين على مطاريف المستخدم المتعددة أن تتقاسم سعتها بواسطة بروتوكول MAC مناسب. ولا تقدم الاتصالات بالأشعة تحت الحمراء الموجهة بحزمة سوى توصيل مباشر بين الأجهزة. ويمكن أن تحزم الحزم المتعددة بشكل مستقل مطاريف المستخدم داخل الغرفة، وبالتالي يمكن لكل مطراف أن ينال سعة مضمونة دون تعارض مع مطاريف أخرى. ويمكن لهذه الأنظمة الحلول محل، أو تفرغ حمولة، الأنظمة الحالية (كأنظمة Wi-Fi) نظراً لأنها تعمل في مدى طيف أعلى على نحو يتباين مع الشبكات المحلية اللاسلكية القائمة على الترددات الراديوية. ومن التطبيقات الأخرى للاتصالات اللاسلكية متوسطة المدى، الاتصالات بين المركبات والاتصالات من السيارات إلى البنية التحتية.

والاتصالات اللاسلكية طويلة المدى قادرة على الوصول لمسافات تتراوح بين 300 m وحوالي 10 km. وهي تطبّق مثلاً على توصيلات من مبنى إلى مبنى وشبكات المنطقة الحضرية اللاسلكية لدى الشركات والأسواق الحضرية. ويطبّق نظام الاتصالات اللاسلكية البصرية نظاماً يسمى الاتصال البصري عبر الفضاء الحر (FSO)، وهو توصيل مباشر بين جهاز إرسال وجهاز استقبال.

ويمكن للاتصالات اللاسلكية على المدى بالغ الطول أن تصل إلى مسافة تقارب 84 000 km، مما يجعلها مثالية لاتصالات الطيران والاتصالات الفضائية. ويطبّق لها نظام شبيه بنظام الاتصال البصري عبر الفضاء الحر (FSO)، ولكنه يستخدم حزمة ضوء ضيقة جداً وقناة فراغية لإرسال واستقبال المعلومات. ويُطلق على هذا النظام اسم الشبكة البصرية اللاسلكية الساتلية للاتصال البصري عبر الفضاء الحر (OWSN FSO).

وقد بُذلت جهود كثيرة للتنبؤ بتطبيقات محددة لتكنولوجيات النفاذ. ولكن يصعب في الواقع كثيراً التنبؤ بماهية أهم التطبيقات والأجهزة خلال أكثر من بضع سنوات. وتتبادر إلى الذهن "الإنترنت" و"الهواتف الذكية" و"الحواسيب اللوحية" و"أنظمة الملاحة"، ولا يُتوقع نجاحها إلا في اللحظة التي يبدأ فيها النجاح بالفعل.

ويشكل النجاح العالمي لتوليفة من الأجهزة/أنظمة التشغيل/البنى التحتية الثابتة والمتنقلة/الأنظمة البيئية القائمة للتطبيقات قاطرة نجاح التطبيقات.

3.5 أنشطة التقييس الحالية

في عام 2011، أكمل فريق العمل المعني بمعايير IEEE 802.15، معيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات IEEE Std 802.15.7-2011 بشأن "الاتصالات البصرية اللاسلكية قصيرة المدى باستخدام الضوء المرئي" [3]. وقد أُجيز مشروع لمراجعة هذا المعيار في ديسمبر 2014 باسم الاتصالات اللاسلكية البصرية (OWC) التي تتضمن التعرف بشئائي المساري الضوئي (LED-ID) واتصالات الكاميرا البصرية (OCC) والأمانة الضوئية (LiFi)، وهو مشروع ناشط حالياً [6]. ويعتزم وضع معيار للوسائط الشفافة بصرياً باستخدام أطوال موجية ضوئية تتراوح بين 10 000 nm و 190 nm. وفي مارس 2017، قُسم هذا الفريق. وسيستمر الفريق المعني بالمعيار 802.15.7m في العمل على اتصالات الكاميرا الضوئية، في حين تأسس فريق المهام المعني بالمعيار IEEE 802.15.13 ليتولى مشروع "الاتصالات اللاسلكية البصرية بمعدل عدة غيغا بتات في الثانية (OWC)" الذي يستخدم ثنائيات المساري الضوئية عالية السرعة [7]. بالإضافة إلى ذلك، فإن الفريق المعني بالتكنولوجيا المساعدة للمركبات (VAT) في إطار المعيار IEEE 802.15، ينظر في الاتصالات بالضوء المرئي كخيار اتصالات.

وفي أواخر عام 2016، أنشأ فريق العمل المعني بمعايير IEEE 802.11 فريقاً معنياً بموضوع (TIG) الاتصالات الضوئية [8]، بهدف تحديد الفرص التقنية والاقتصادية السانحة باستخدام واسطة الضوء للاتصالات اللاسلكية. وفي عام 2018، تمت الموافقة على طلب إجازة هذا المشروع. ويتولى فريق المهام bb لدى فريق العمل المعني بمعايير 802.11 المسؤولية عن وضع وثيقة المعيار في هذا الصدد.

ولجنة الدراسات 15 لقطاع تقييس الاتصالات مسؤولة عن وضع المعايير من أجل البنى التحتية لشبكات النقل البصرية ولشبكات النفاذ وللشبكات المنزلية والشبكات الكهربائية، والأنظمة والتجهيزات والألياف البصرية والكبلات. وهذا يشمل التقنيات المرتبطة بها للتركيب والصيانة والإدارة والاختبار والمعدات والقياس وتكنولوجيا طبقة التحكم من أجل السماح بالتطور في اتجاه شبكات النقل الذكية بما في ذلك دعم تطبيقات الشبكات الذكية. وتتولى هذه اللجنة المسؤولية عن معيار G.vlc المعنون "مرسل-مستقبل الاتصالات عالية السرعة بالضوء المرئي ضمن المباني - توصيف معمارية النظام والطبقة المادية وطبقة وصلة البيانات".

4.5 مجموعة الأنشطة ذات الصلة بالاتصالات بالضوء المرئي في البلدان

1.4.5 أبحاث الاتصالات بالضوء المرئي في الصين

Huawei و China Telecom و Sanan Optoelectronics و Shenzhen Absen و Unilumin و Cnlight و جامعة Tsinghua هي المؤسسات/الشركات في الصين التي تركز على إجراء أبحاث وتطوير منتجات قائمة على الاتصالات بالضوء المرئي.

2.4.5 أبحاث الاتصالات بالضوء المرئي في اليابان

مختبر ناكاجاوا في جامعة كيو وشركات Panasonic و CASIO و NEC و FUJI Electric هي مؤسسات/شركات أبحاث وتطوير منتجات الاتصالات بالضوء المرئي في اليابان.

3.4.5 أبحاث الاتصالات بالضوء المرئي في كوريا

جامعة سيول الوطنية للعلوم والتكنولوجيا وجامعة كوكمين وجامعة كونغجو وجامعة نامسيول وشركات Samsung و LG و ETRI هي مؤسسات/شركات أبحاث وتطوير منتجات الاتصالات بالضوء المرئي في كوريا الجنوبية.

4.4.5 أبحاث الاتصالات بالضوء المرئي في هولندا

تجري في جامعة إندوهوفين للتكنولوجيا، قسم تكنولوجيا الاتصالات والكهرومغناطيسية، مجموعة الاتصالات الكهربائية البصرية. وشركات Signify (المعروفة مؤخراً باسم Philips Lighting) و KPN و KIEN هي أيضاً شركات في مشاريع الاتصالات بالضوء المرئي ذات الصلة.

5.4.5 أبحاث الاتصالات بالضوء المرئي في تركيا

المؤسسات البحثية الرئيسية التي تعمل في مجال الاتصالات بالضوء المرئي هي Okatem و Ozyegin و Tubitak Bilgem و جامعة Istanbul Medipol. وشركات Ford Otosan و Farba و Aselsan و Turk Telekom هي شركات في مشاريع الاتصالات بالضوء المرئي ذات الصلة.

6.4.5 التعاون بين الاتحاد الأوروبي والصين

تدير شركة Eurescom GmbH مشروع البحث التعاوني بين الاتحاد الأوروبي والصين، إنترنت الضوء الراديوي (IoRL)، الذي يجري تنفيذه بشكل تعاوني بين جامعة Brunel وشركة Viavi Solutios وجامعة Leicester والمعهد العالي للإلكترونيات في باريس وشركة Mostlytek وشركة Issy Media ومنظمة Building Research Establishment ومعهد Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS ومركز ديموكريتوس الوطني للأبحاث العلمية ومؤسسة Joada وجامعة وارسو للتكنولوجيا وشركة Arcelik وشركة RunEL ومعهد هولون للتكنولوجيا وشركة Ferrovial وشركة Oledcom ومؤسسة Fundación Centro de Innovación وشركة de Infraestructuras Inteligentes وجامعة Tsinghua وشركة Leadpcom وشركة Shanghai-Feilo/Yaming. ويطوّر المشروع التمثيل الافتراضي لوظائف شبكة من الجيل الخامس/شبكة معرفّة بالبرمجيات من أجل المباني حيث تكون نقاط شبكة النفاذ الراديوي الهجينة للاتصالات بالضوء المرئي والموجات المليمترية مدمجة في نقاط النفاذ إلى أنظمة الضوء المنتشرة في كل مكان.

5.5 مجموعة الأنشطة ذات الصلة بالاتصالات بالضوء المرئي في الهيئات الأكاديمية ودوائر الصناعة ومعاهد البحوث

Basic6 1.5.5

Basic6 هي شركة ناشئة تأسست في الولايات المتحدة الأمريكية لتطوير نظام GeoLiFi لتحديد المواقع داخل المباني، والذي يستخدم بنية الإضاءة التحتية في متجر لإيصال رسائل مجهولة المصدر إلى العملاء والموظفين عن المحيط القريب، ومعلومات عن منتجات، وعروض ترويجية ذات صلة، وقوائم تسوق مرئية. وفي الوقت نفسه، يقدم هذا الحل لمُتاجر التجزئة تحليلات تفصيلية لمقاييس مثل معدلات التعاطي مع العملاء والموظفين، بالإضافة إلى فترات طول المقام في المتجر وأقسامه. وتعمل الشركة على برمجيات وتنشط في إقامة شراكات مع شركات الإضاءة الأخرى التي تقدم عتاد LiFi (كشركة OLEDCOMM [28]) وهي شركة فرنسية ناشئة تابعة لجامعة (Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines).

2.5.5 نقطة توصيل LiFi لدى معهد Fraunhofer Heinrich Hertz (HHI)

تتيح نقطة توصيل LiFi التي جرى تطويرها في معهد Fraunhofer HHI تركيب شبكة خاصة عالية السرعة دون استلزام مد أي كابلات. ويقدم النظام معدلات بيانات عالية تصل إلى 1 Gbps، على مسافة تصل إلى 30 m، ويمكن ضبط مقاسه الصغير بسهولة، وتركيبه بتكلفة زهيدة. وقد رُكب نموذج أولي منه في قاعة مؤتمرات في جزيرة مايناو بألمانيا (بحيرة كونستانس). ويقدم معهد HHI كذلك مكونات من أجل الاتصالات بالضوء المرئي بواسطة ثنائيات مساري ضوئية بيضاء جاهزة باستخدام ثلاثة ألوان ضوئية (RGB)، وهي قادرة على الارتقاء إلى سرعات تصل إلى 3 Gbits/s.

وبالإضافة إلى وحدات LiFi الإذاعية التي ترسل البيانات في اتجاه واحد، فإن التكنولوجيا المطوّرة في معهد Fraunhofer IPMS تقدم إمكانية إجراء اتصالات آنية وثنائية الاتجاه بإرسال "كامل الازدواج".

Hyperion Technologies 3.5.5

Hyperion Technologies، هي شركة تركية ناشئة، وهي تطور حلولاً قائمة على الاتصالات اللاسلكية البصرية المتطورة لتمكين شبكات الجيل التالي من الاتصالات اللاسلكية على مستويات النفاذ وكذلك الوصلات الوسيطة. وساهمت الشركة بمشروع تقييس المعيار 802.15.7r1 وما زال حضورها مستمراً في أفرقة تقييس المعيار 802.11 بشأن الاتصالات الضوئية والمعيار 802.15.13 بشأن الاتصالات اللاسلكية البصرية.

Lucibel 4.5.5

Lucibel، هي شركة فرنسية متخصصة في تصميم حلول الجيل الجديد من الإضاءة القائمة على تكنولوجيا ثنائي المساري الضوئي، وقد قامت بتطوير، وهي في طور تسويق، أول وحدة إضاءة LiFi صناعية بالكامل في أوروبا: Ores LiFi [5]. ويتيح حل Lucibel LiFi نشر شبكة لاسلكية كاملة من خلال معدل خط ثنائي الاتجاه يصل إلى 42 Mbit/s. ويقدم نظام Lucibel LiFi توصيلية متنقلة عالية السرعة ضمن شبكة في نفس الوقت الذي يدعم فيه النفاذ و"التسليم" المتعدد. ويمكن لكل وحدة إضاءة LiFi أن تخدم في وقت واحد عدة محطات LiFi (حتى ثمانية). وخواص التسليم الوظيفية المنفذة تتيح للمستخدمين الحفاظ على توصيل مستقر تلقائياً من وحدة إضاءة إلى أخرى. وكانت Sogeprom، وهي كبرى شركات التطوير العقاري التابعة لمجموعة Société Générale Group، أول مستخدم يختبر LiFi ذات عرض النطاق العالي في مقره الباريسي بتركيب أول نموذج تجريبي لشركة Lucibel. وتقوم شركة Microsoft أيضاً بتنفيذ حل LiFi في مركز الابتكار التابع لها في حي Issy-les-Moulineaux بغية تقديم الجيل التالي من التوصيلية اللاسلكية لعملائها.

LUCIOM 5.5.5

LUCIOM هي شركة فرنسية ناشئة أنشئت في أكتوبر 2012. وتمتلك الشركة العديد من المنتجات في محفظتها مثل:

- Geo VLC: مجموعات الإرسال/الاستقبال ذات عرض النطاق المنخفض لموقع داخل المباني ولها خواص وظيفية مختلفة.
- حلول ذات معدلات بيانات عالية بمرسلات الإنترنت عبر LED LiFi ومفاتيح USB LiFi/أشعة تحت الحمراء التي تقدم معدلات بيانات تبلغ 20 Mbit/s (وصلة هابطة) و 5 Mbit/s (وصلة صاعدة).

LVX System 6.5.5

LVX System هي شركة أمريكية تتخذ مركز كينيدي للفضاء مقراً لها، وتقدم، بواسطة تكنولوجيا حاصلة على براءة اختراع، أنظمة إضاءة ثنائي المساري الضوئي عالية الجودة تقوم أيضاً ببيت تدفق بيانات عالي السرعة بشكل آمن. وقد وقعت مؤخراً اتفاق قانون الفضاء مع وكالة ناسا (NASA).

pureLiFi 7.5.5

pureLiFi هي شركة ناشئة تأسست في عام 2012 على يد الأستاذ هاس من جامعة إدنبره لتسويق تكنولوجيا الاتصالات بالضوء المرئي بعد أربع سنوات من البحوث المكثفة. وقامت الشركة في البداية بتطوير وحدة سقف تسمى Li-Flame وهي قادرة على الاتصال بمعدل 10 Mbit/s في الوصلة الهابطة و 10 Mbit/s في الوصلة الصاعدة على مدى يصل إلى 3 m باستخدام مصابيح ثنائي المساري الضوئي العادية. وقد ارتقت شركة pureLiFi الآن بوحدة Li-Flame إلى وحدة LiFi-X، وهي جيل جديد من المحركات والمستقبلات رُفع الستار عنها في المؤتمر العالمي للاتصالات المتنقلة عام 2016. وتقدم وحدة LiFi-X نقطة نفاذ توصل بأي مصباح ثنائي المساري ضوئي مفعّل بوحدة LiFi. وهي تقدم اتصالات كاملة الازدواج بمعدل 40 Mbit/s للوصلة الهابطة و 40 Mbit/s للوصلة الصاعدة، بالإضافة إلى قابلية تنقل كاملة ومستخدمين متعددين لكل نقطة نفاذ إلى LiFi.

Velmenni 8.5.5

Velmenni هي شركة إستونية ناشئة أجرت تجارب ناجحة لتكنولوجيا LiFi في مختلف المكاتب والبيئات الصناعية في تالين، استونيا، وتقوم حالياً بالعديد من المشاريع التجريبية للاستفادة من الاتصالات بالضوء المرئي في سياقات صناعية متنوعة (بالتعاون مع شركة Airbus لاختبار التكنولوجيا على متن الطائرات). ويتكون النموذج الأولي من مرسل مستقبل ثنائي مساري ضوئي

ومستقبل كاشف ضوئي خارجي موصول بحاسوب محمول عبر مفتاح USB. ويعمل النظام في نظام ازدواج (الوصلة الصاعدة والوصلة الهابطة) وتصل سرعة معدلات البيانات المبلغ عنها إلى 1 Gbit/s. وتبلغ المسافات المثبتة بين المرسل والمستقبل عدة عشرات من السنتيمترات. ولكن سيستغرق النموذج الأولي عدة سنوات قبل أن يصبح منتجاً تجارياً.

9.5.5 نظام متكامل ومتقدم للاتصالات بالضوء المرئي وعبر الخطوط الكهربائية في تسينغوا

جامعة تسينغوا هي جامعة وطنية في الصين. وتركز هذه الجامعة على البحث والتطوير التقنيين الرئيسيين في مجال الاتصالات عبر الخطوط الكهربائية (PLC) والاتصالات بالضوء المرئي (VLC). وبعد عدة سنوات من البحث والتطوير، تم اقتراح نظام متكامل ومتقدم للاتصالات بالضوء المرئي والاتصالات عبر الخطوط الكهربائية¹. ويوفر النظام إطاراً موحداً لمعالجة الإشارة في كلا المجالين الكهربائي والبصري. ويدعم خدمات المعلومات بدون إشارة تردد راديوي أو في بيئات عالية الحساسية للترددات الراديوية مثل المناجم العميقة وأنفاق الكبلات الكهربائية ومحطات الكهرباء والطائرات والمصانع والمستشفيات.

ويستفيد النظام من التوصيلات الطبيعية بين شبكة الكهرباء وشبكة الإضاءة، باستخدام الاتصالات عبر الخطوط الكهربائية (PLC) كشبكة أساسية والاتصالات بالضوء المرئي القائمة (VLC) على ثنائي المساري الضوئي LED كنقطة نفاذ، لدعم الخدمات المتنقلة كذلك. ويستخدم النظام الشبكة وحيدة التردد لزيادة تغطيته بفعالية والحد بشكل كبير من انقطاع الاتصالات الناجم عن حركة المستعمل والكائنات الحاجة. ويعتمد النظام أسلوب التضخيم والإحالة في الإرسال لخفض تكلفة التنفيذ واستهلاك الطاقة الكهربائية ومتطلبات المساحة داخل وحدة الإضاءة.

وتستخدم المؤسسة الحكومية لتوزيع الكهرباء في الصين هذا النظام بالفعل في نفق تحت الأرض لكابل الإمداد بالطاقة الكهربائية.

10.5.5 مشروع بحث مشترك بين الاتحاد الأوروبي والصين – إنترنت الضوء الراديوي

إنترنت الضوء الراديوي (IoRL) هو مشروع بحث مشترك بين الاتحاد الأوروبي والصين بشأن الجيل الخامس في إطار برنامج أفق 2020، ويعمل على تطوير حلول الاتصالات عريضة النطاق من أجل المباني من خلال استغلال انتشار نقاط الحصول على الضوء الكهربائي الموجودة وإمكانية النفاذ إليها، وقدرات النطاق العريض لتكنولوجيتي الموجات المليمترية والاتصالات بالضوء المرئي، ومرونة الشبكة المعرفة بالبرمجيات/التمثيل الافتراضي لوظائف الشبكة. ويصمّم المشروع من الناحية الصناعية حلاً قائماً على الضوء الراديوي ذا بصمة إلكترونية صغيرة بما يكفي لإمكانية دمجها في مجموعة كبيرة من عوامل الشكل للأنظمة والمنتجات الاستهلاكية الحالية للضوء الكهربائي.

6 الجوانب الأخرى ذات الصلة باتخاذ قرارات بشأن الضوء المرئي (احتياجات المستخدمين، الجوانب الاجتماعية – الاقتصادية)

فيما يتعلق بسلامة العين، يتعين أن يكون الضوء المشكّل الذي يمكن رؤيته بالعين البشرية آمناً فيما يتعلق بتردد وشدة الضوء (وفق معيار IEC 60825-1:2014 على سبيل المثال)، وينبغي ألا يجلب الضوء المشكّل أمراضاً مثل الصرع الحساس للضوء.

جوانب سلامة العين بالإضافة إلى مراجع

الجزء الأكثر هشاشة في العين البشرية هو شبكية العين، التي تقع في الجزء الخلفي من العين والتي تؤدي عملية الرؤية الفعلية. ويصل الضوء المرئي (بوضوح) إلى شبكية العين، وينبغي أن يبقى التعرض للقدرة محدوداً لكيلا يسبب أي ضرر (دائم) للشبكية. وفي الاتصالات بالضوء المرئي، صُممت أنظمة ثنائي المساري الضوئي لأغراض الإضاءة وهي ترسل عادةً مخاريط ضوئية متباعدة وهي لن تؤدي شبكية العين في الظروف العملية. وفي الاتصالات الموجهة بحزمة بصرية، يمكن أن تكون حزم الضوء المرئية (كالتالي قد تأتي من مؤشرات ليزرية) ضارة؛ وينبغي أن تبقى قدرتها أقل من جزء من mW. أما عندما تُستخدم الأشعة تحت الحمراء،

¹ يُستخدم في اللغة الإنكليزية مصطلح آخر مقابل مصطلح Power Line Communication، هو Power Line Telecommunication (PLT).

فإن فيزيولوجيا العين البشرية تستشعر بأن شدة الحزمة موهنة بشدة (من القرنية، والعدسة، والجسم الزجاجي) قبل أن تصل إلى الشبكية. وبالتالي، يُسمح بقدرات أعلى بكثير قبل تجاوز حد سلامة العين؛ وعند أطوال موجية ما بعد 1400 nm، يمكن تقبل قدرات موجات مستمرة تصل إلى 10 mW.

وتوصّف معايير سلامة العين في الوثيقتين التنظيميتين IEC 60825 وANSI Z136. وتوصي الدراسة الواردة في المرجع [18] بما يلي: "بالنسبة لسلامة اللاسلكية البصرية، فإن سلامة العين والجلد هي أكثر القضايا حرجة. وعلى الرغم من أن استخدام عامة الناس للاتصالات اللاسلكية البصرية يكاد يكون آمناً في جميع الظروف، يُستحسن إلقاء نظرة فاحصة على قضايا سلامة الأشخاص الذين يعملون على مقربة من مصادر الضوء المكثفة لأغراض التركيب والصيانة".

القبول والنشر

على غرار أنظمة الاتصالات جميعها، تُتطلب بيانات الخواص الوظيفية وحماية المستخدم على السواء. انظر المرجع [18] الذي جاء فيه ما يلي: "سيستفيد قبول نظام الاتصالات اللاسلكية البصرية ونشره من وضوح الرؤية بشأن العمل البيئي مع المعايير اللاسلكية الرائجة القائمة أو الناشئة، مثل Wifi، في مجال الاستيقان والتجفير والتحوّل السلس بين نقاط النفاذ على سبيل المثال. ويوصى بتشجيع إعادة استخدام الحلول القائمة حيثما أمكن، فيما يتعلق بالاستيقان وتفسير الإشارة على سبيل المثال. وقد تؤدي إعادة الاستخدام هذه إلى تسهيل تطور آليات التشغيل البيئي (لعمليات التسليم على سبيل المثال) بين تكنولوجيات الاتصالات اللاسلكية البصرية والاتصالات الراديوية. ويمكن كذلك أن تستفيد هذه الطريقة من التطورات الجديدة ذات قاعدة المستخدمين الصغيرة نسبياً من تحسينات الحلول ذات قاعدة المستخدمين الكبيرة".

السيناريوهات الصناعية والتصنيعية

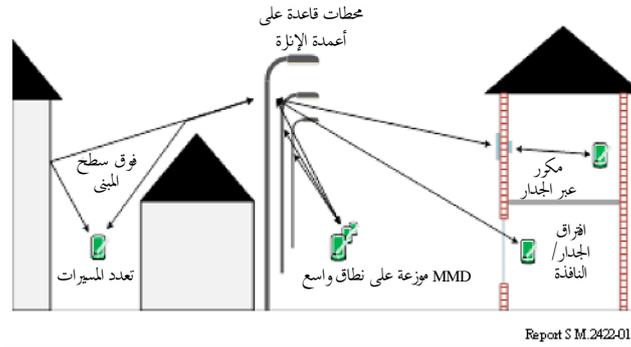
في السيناريوهات الصناعية والتصنيعية، تُستخدم حلول سلكية في الوقت الحاضر بشكل أساسي بسبب المتطلبات العالية فيما يتعلق بالمتانة والأمن وانخفاض الكمون. وتتيح البروتوكولات الصناعية (أي ProfiNet) النفاذ المنتظم إلى الشبكة للعملاء وتضمن إرسال البيانات خلال فترة زمنية محددة وكمون منخفض. ويحظى اللاسلكي الصناعي بجاذبية بفضل سهولة النشر والمرونة. ويمكن أن تقدم الحلول القائمة على الاتصالات بالضوء المرئي فوائد تتفوق على الحلول القائمة على الترددات الراديوية فيما يتعلق بما يلي:

'1' ملاءمة للنشر المكثف: ينتمي التصنيع إلى ما يسمى بسيناريوهات لاسلكية كثيفة يُحتفظ خلالها بوصلات متعددة، وفي الوقت نفسه تقدم جميعها جودة الخدمة العالية المذكورة أعلاه. ويمكن للاتصالات بالضوء المرئي تقديم اتصالات لاسلكية آمنة ذات كمون منخفض نظراً لظروف الانتشار المحصورة جيداً في الخلايا الصغيرة جداً. علاوةً على ذلك، يمكن استخدام الاتصالات بالضوء المرئي كمكمل لأنظمة الترددات الراديوية في تفرغ حمولة البيانات.

'2' التعايش مع خدمات الترددات الراديوية الأخرى: يتمثل أحد الإشكالات الكبرى للشبكات اللاسلكية الصناعية في التعايش مع الخدمات الأخرى. ويتطلب استخدام وصلات الترددات الراديوية الأخرى في نفس الطيف بروتوكولات، مثل "الاستطلاع قبل الإرسال"، مما يعني تأخيرات لا سبيل للتنبؤ بها، ويتعارض مع متطلبات الكمون المنخفض. ويتمثل أحد السبل في الحصول على طيف مخصص اللاسلكي الصناعي. ويمكن للاتصالات بالضوء المرئي أن تفسح سبيلاً آخر للتخفيف من وطأة الوضع الحالي؛ علماً بأن التداخل من الضوء المحيط على الاتصالات بالضوء المرئي تداخل طفيف على النحو الموضح أدناه في فقرة "الجدوى التقنية للاتصالات بالضوء المرئي".

'3' الحصانة ضد التشويش: يمكن للمهاجمين أن يشوشوا بسهولة على طيف الترددات الراديوية المستخدم من مسافات بعيدة خارج المنشأة بأجهزة ترددات راديوية بسيطة. ومن الواضح أن استخدام الوصلات اللاسلكية القائمة على الترددات الراديوية بدلاً من الكبلات يمكن أن يؤثر تأثيراً ضاراً على التشغيل الآمن لمرفق التصنيع الموصولة بشكل عام. بالإضافة إلى ذلك، قد لا يكون وجود التداخل الكهرومغناطيسي القوي مناسباً للاتصالات الترددات الراديوية، كما هو الحال في مصنع الحديد والصلب أو في محطات الطاقة النووية أو في محطة توليد الطاقة. ومن ناحية أخرى، فإن الاتصالات بالضوء المرئي خاملة إزاء تشويش الترددات الراديوية والتداخل الكهرومغناطيسي، لأن انتشارها ينحصر داخل المنشأة.

الشكل 1



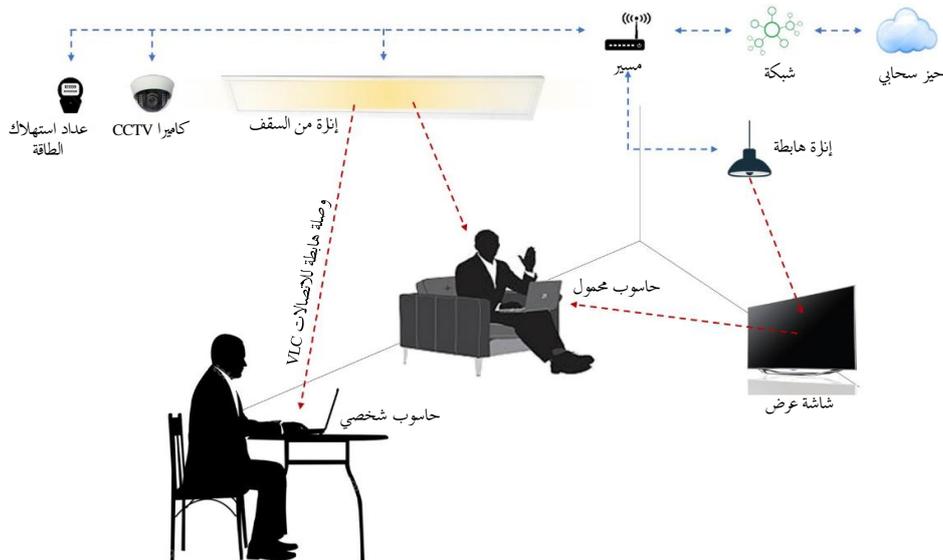
المنزل الذكي

تضم المنازل الذكية حالياً العديد من أنواع الأجهزة المنزلية، ونظماً لإدارة الطاقة، ونظماً للرعاية الصحية، وخدمات وسائط متعددة متقدمة، ونظماً للمراقبة والأمن، من خلال توصيلية سلكية ولاسلكية معقدة. ويمكن تشغيل الأجهزة الموصولة في المنزل الذكي بطريقة تفاعلية ومستقلة، وتحسن هذه القدرات نوعية الحياة داخل الأسرة من نواح مختلفة، مثل أتمتة المهام الاعتيادية، وتقديم الخدمات الصحية، وترشيد استهلاك الطاقة، وتحسين الكفاءة الفردية، وتعزيز أمن المنزل، فضلاً عن الترفيه، وما إلى ذلك.

ويستخدم المنزل الذكي نهج التوصيل الشبكي اللاسلكي المحلي ويستند إلى معايير مثل معايير الشبكة المحلية (LAN) أو شبكة منطقة الجسد (BAN) أو شبكة المنطقة الشخصية (PAN)، التي تُستخدم لوصف شبكة ذات أبعاد أصغر تتراوح بين 12 m و 100 m مثل Bluetooth و ZigBee و WiFi و Z-Wave وغيرها.

ويمكن استخدام الاتصالات بالضوء المرئي لتوصيل الأجهزة التي تنقل معلومات حساسة مثل كاميرات الدوائر التلفزيونية المغلقة وأجهزة مراقبة الأطفال وغيرها، ويمكن أن تكون شبكة أكثر انعزالاً وأماناً [19].

الشكل 2

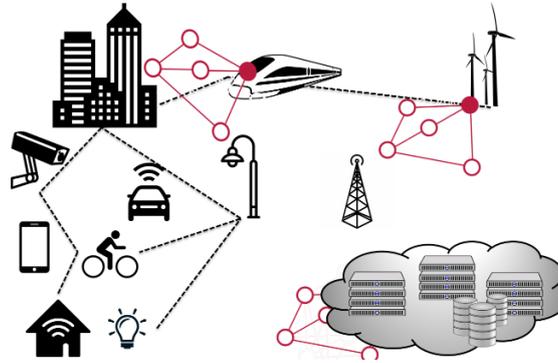


رسم خرائط المدينة الذكية (جينوم المدينة)

يمكن اعتبار المدن متعضيات معقدة حية آخذة في الارتقاء. ولا يعود ذلك إلى مجرد الأشخاص القاطنين في المدينة وهم "أنظمة" معقدة في حد ذاتهم. وتبدو الحياة نفسها معقدة أكثر فأكثر من خلال تطورات معرّقة ومطرّدة. وتؤدي التطورات التكنولوجية، خاصة في مضمار تكنولوجيا المعلومات والاتصالات، دوراً حاسماً في ذلك. ولكن ليس من المسلّم به أن رغد العيش، وهو المرام الرئيسي، سيتحقق من جراء ذلك. وإذا توجد فرص هائلة، قد تلوح نُذرُ شؤمٍ بالقدر نفسه. ولتحقيق تقدم نوعي حقيقي، تقتضي الضرورة اتباع نهج نظامي متكامل. ولن يكفي التفكير والتصميم التدريجي الخطي. وتتمثل الخطوة الأولى في فهم التمييز بين "عتاد" و"برمجيات" المدينة، بمثابة "الجسد" و"العقل" على التوالي في كائن بشري أو كيان حي، أو "نمط جيني" و"نمط ظاهري"، أو "منزل" و"مأوى". الأجزاء الأولى ملموسة، أما الأجزاء الثانية فليست كذلك. ومن الناحية العامة، يُشار إلى الأجزاء الأولى باسم "البنية التحتية" وإلى الأجزاء الثانية باسم "البنية الفوقية". ويتضح ترابط البنية التحتية والبنية الفوقية وتعذر التعامل مع كل منهما على حدة. وثمة تحدّي في ذلك، لأن البنى التحتية هي مجال العلوم التقنية، أما الخبرة في البنى الفوقية فهي تكمن إلى حد كبير في العلوم الاستقصائية.

وبالنظر إلى البنى التحتية، تزداد أهمية شبكات تكنولوجيا المعلومات والاتصالات أكثر فأكثر. وهذا هو المجال الذي يمكن أن تساهم فيه مراكز اللاسلكي والضوئيات. ويُرتقب أن تكون المكونات الرئيسية لجميع الشبكات البصرية والضوئية من جيل جديد من الألياف والدارات الضوئية المتكاملة (PIC). وهذا بالتأكيد هو الحال في الشبكات الأساسية والحضرية. وسيكون للتكنولوجيا اللاسلكية مكان بالقرب من نقاط النفاذ. وتتطور مستقبلي، تمكن ملاحظة تحقق الانتقال من الثابت إلى اللاسلكي عند حواف الشبكة. ويمكن أن يكون مثل هذا المكان جزءاً من أثاث الشارع، وبعبارة أدق "مصباح الشارع"؛ علماً بأن في هولندا وحدها ما يقرب من 4 ملايين من مصابيح الشوارع. ويمكن تشكيلها في شبكة بصرية متشابكة. ومن مصابيح الشوارع يمكن نقل عرض نطاق نحو المنزل أو منه، باستخدام مكررات في الجيل التالي من النواذ متعددة الوظائف في جميع المنازل والمباني البالغ عددها 7,5 مليون منزل و300 000 مبنى. وداخل المنازل والمباني، ستكون الاتصالات بالضوء المرئي هي التكنولوجيا المستقبلية.

الشكل 3



Report SM.2422-03

وبالنظر إلى المنازل والمباني نفسها وكيفية توصيلها ببنية تحتية أقرب إلى البنية المادية في الفضاء العام، يتضح أن قريحة البيئة العمرانية يمكن أن تساهم بحزراتها. وفي تطور يشب عن الطوق، يمكن أن تتجلى فائدة النظر إلى البيوت والمباني والبنى التحتية والبنى الفوقية العامة المشيئة على أنها كائنات حية بجسدها وعقلها، فيُدرس نمطها الجيني ونمطها الظاهري. وفي الواقع، إذا كان يمكن اليوم تحديد الجينوم البشري في غضون ساعة واحدة بأقل من مائة يورو، فلماذا يتعذر ذلك بشأن هذه الإنشاءات المادية الأبسط؟ وأي خيارات هائلة يمكن أن تتحقق! ويتسنى بعد ذلك حساب معلمات كلية مثل مسميات الطاقة والسلامة والاستدامة بدقة. ويمكن تصميم سيناريوهات التحسين وتقييمها.

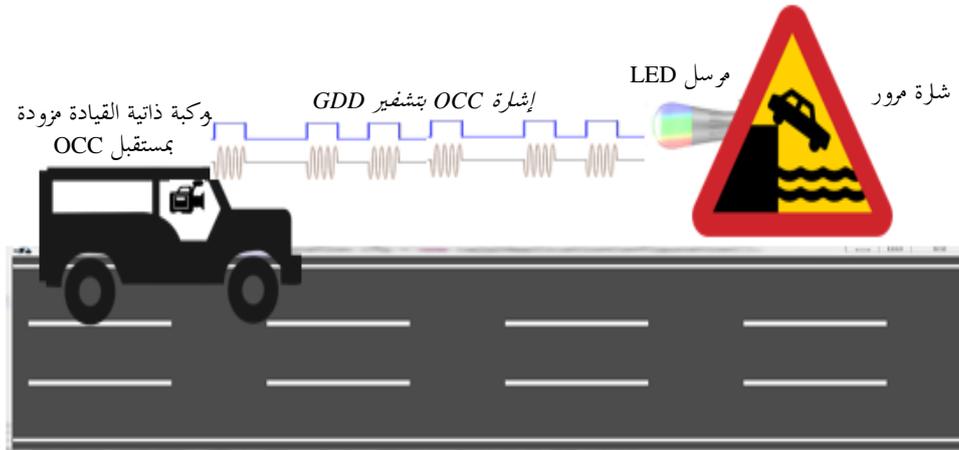
القائمة. وقد أُعد نظام التشفير الخاص به كنظام مستقل عن اللغة، بحيث يمكن تفسير البيانات، بغض النظر عن الاختلافات اللغوية أو الإقليمية. ويهدف ذلك إلى دعم مراسلات نظام النقل الذكي. وثمة حاجة إلى نهج لفرز المجموعة الكبيرة من شارات ومصورات المرور التوضيحية القائمة إلى مجموعات وظيفية - ويتم ذلك عن طريق عناصر المعلومات.

وفي جزء المرسل، يصمّم مشفر (مولد) بيانات قاموس البيانات الرسومية (GDD). ويمكن إرسال البيانات المشفرة باستخدام نوعين من المرسلات، ويتمثل أحدهما في مجرد تركيب مرسل إشارة ثنائي المساري الضوئي على شارة المرور القائمة، فيرسل ثنائي المساري الضوئي البيانات المشفرة المركبة على شارة مرور محددة. وتكمن ميزة هذا النوع من أجهزة الإرسال البسيطة في إمكانية تطبيقه على كل شارة مرور موجودة. والفرق الوحيد بين كل شارة وأخرى هو أن البيانات المشفرة التي تنفرد بها كل شارة تُرسل منها.

وفي جزء المستقبل، يتألف مستقبل قاموس البيانات الرسومية (GDD) من كاميرا مزودة بجهاز استشعار بالصور ووحدة فك تشفير البيانات. ويمكن استشعار الصور على جهاز الاستشعار بالصور خلف عدسة الكاميرا البصرية فُتستقبل البيانات المرسلّة من خلال اتصالات الكاميرا البصرية [20].

الشكل 5

مركبة ذاتية القيادة تستقبل إشارة اتصالات كاميرا بصرية (OCC) من شارة مرور



Report SM.2422-05

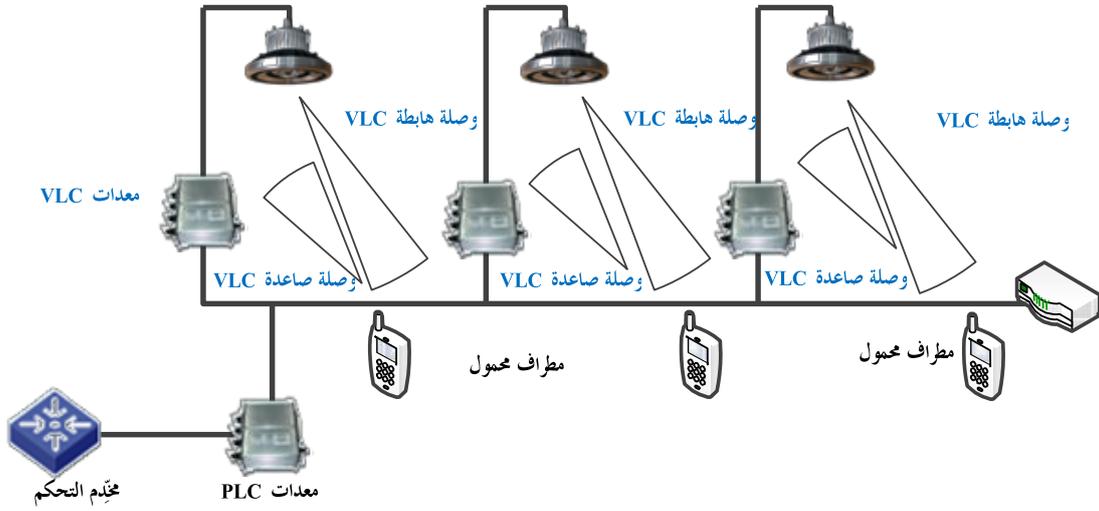
اتصالات المعلومات من أجل التعدين الذكي ومراقبة الأنفاق

لقيت تكنولوجيا الاتصالات بالضوء المرئي، القادرة على دعم الاتصالات وتبادل البيانات ووظائف تحديد الموقع، تطبيقات واسعة في مجالي التعدين الذكي ومراقبة الأنفاق.

وينشأ متطلب وظيفة الاتصالات من كون المناجم أو الأنفاق تقع على عمق عشرات إلى عدة مئات من الأمتار تحت الأرض أو بطول يزيد على كيلومتر واحد. ونظراً لهيكل المناجم أو الأنفاق والخصائص الفيزيائية للكابل، يكون التوهين على الإشارات اللاسلكية كبيراً جداً وتوصيل الأنظمة السلكية صعباً جداً. ولأغراض الصيانة، يتعين على المفتشين التواصل بانتظام مع الأشخاص في مركز التحكم. وفي الوقت نفسه، عند حدوث أعطال أو حوادث في التوصيل، من الضروري حتماً الاتصال بمركز التحكم للتخلص من الأعطاب وإنقاذ التوصيل. ولا يؤثر هيكل المناجم أو الأنفاق على الاتصالات بالضوء المرئي لأنها تستخدم معدات الإنارة للحصول على المعلومات أو تبادلها (بشكل أكثر تحديداً، تجمع بين الاتصالات عبر الخطوط الكهربائية (PLC) والاتصالات بالضوء المرئي (VLC)) من أجل إرسال معلومات الصوت والفيديو، وتحافظ على التواصل في الوقت الفعلي مع مركز التحكم.

الشكل 6

نظام VLC-PLC ومخيم التحكم



وتشمل متطلبات عمليات تبادل المعلومات إرسال البيانات لأجهزة الاستشعار الثابتة وإرسال البيانات للتطبيقات المتنقلة. ويمكن لهذا النظام أن يدمج المراقبة الإلكترونية، والمراقبة بالفيديو، ومعدات متكاملة لجهاز استشعار درجة الحرارة بالأشعة تحت الحمراء في وصلات الكبلات، ودرجة الحرارة، والمروحة، ومضخة المياه، والتيار الأرضي، والحرائق، والغاز، إلى جانب أجهزة حثية من قبيل إنذارات الاقتحام وقنوات الدفاع من أجل الإرسال الإلكتروني في الوقت الفعلي لبيانات المراقبة. وسيحدد الإرسال المنتظم لبيانات المراقبة الأعطاب ويساعد على التخلص منها بدقة أكبر وفي الوقت المناسب. ويمكنه أيضاً تقصير وقت الإصلاح في حالات الطوارئ والحد من الخسائر المقابلة. وخلال هذه العملية، يمكن لموظفي التفتيش استخدام هذا النظام للحفاظ على عمليات تبادل البيانات وتفاعل الخدمة مع مركز التحكم، مما يسهل بشكل كبير مستوى الأتمتة في المراقبة الإلكترونية ويزيد من كفاءة التفتيش.

إنترنت الضوء الراديوي من أجل وسائل الإعلام والترفيه في المباني

تعاني الشبكات اللاسلكية في المباني من الازدحام والتداخل والشواغل المتعلقة بالأمن والسلامة وتقييد الانتشار وضعف دقة الموقع داخل المباني. ويعمل مشروع إنترنت الضوء الراديوي (IoRL) على تطوير شبكة في المباني أكثر سلامة وأماناً ويمكن تكيفها وذكية وتوفر بشكل موثوق زيادة في الصبيب (< 10 G bps داخل المبنى) من نقاط النفاذ المنتشرة في مواقع مختلفة داخل المباني مع قيم كمون $1 > \text{ms}$ ، وتمكن في الوقت نفسه من التقليل إلى أدنى حد ممكن من التداخل والتعرض الضار للمجال الكهرومغناطيسي، وتوفير دقة موقع $10 > \text{cm}$. وبذلك، يحل المشروع مشكلة النفاذ اللاسلكي إلى النطاق العريض في المباني ويشجع على وضع معيار عالمي في الاتحاد الدولي للاتصالات. وسيؤدي ذلك إلى تحفيز مالكي المباني على إيجاد التمويل اللازم لتنفيذ هذا الحل في ممتلكاتهم لزيادة قيمتها، ومن ثم تحفيز سوق منتجات شبكات النطاق العريض في المباني، مما يعود بالفائدة على المجتمع ويحفز الناتج المحلي الإجمالي العالمي. ويعكف مشروع IoRL على تطوير إثبات مفهوم أداة توضيحية محمولة، تُستخدم كأساس لتقييم حل عالمي يستغل قدرات النطاق العريض لتكنولوجيات الاتصالات بالضوء المرئي (VLC) والموجات المليمترية (mmWave)، ومرونة التمثيل الافتراضي لوظائف الشبكة/الشبكة المعرفة بالبرمجيات (NFV/SDN)، وإمكانية النفاذ إلى نقاط الحصول على الضوء الكهربائي الموجودة. ويبين المشروع كيف يمكن دمج حل صناعي أعيد تصميمه للضوء الراديوي باستخدام تكنولوجيات VLC و mmWave في المنتجات الاستهلاكية الحالية للضوء الكهربائي ليصبح نقطة عملية للنفاذ الكهرومغناطيسي في الغرف داخل المباني، ويهدف المشروع في عامه الأخير إلى إثبات إمكانية تشغيله في المنازل والمتاحف ومحطات القطر والمتاجر الكبرى.

7 استنتاجات

تبين المستجدات الأخيرة في الاتصالات اللاسلكية البصرية وأنشطة التقييس ومنتجات الإضاءة القائمة نضوج تكنولوجيا الاتصالات بالضوء المرئي وفوائدها العديدة في تفريغ حمولة الطيف الراديوي.

ويمكن الاستنتاج أن إدارة أجهزة الاتصالات بالضوء المرئي وطيف الاتصالات بالضوء المرئي ليست مهمة تنظيمية، بل أمر ينبغي تنظيمه في المعايير التقنية. ويمكن الاستفادة في هذا الصدد من التعاون الوثيق بين هيئات التقييس المعنية بالاتصالات بالضوء المرئي وتلك المعنية بالتطبيقات الراديوية التقليدية.

المراجع

- [1] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, "Candela Class High Brightness InGaN/AlGaIn Double Heterostructure Blue Light Emitting Diodes", *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994.
- [2] J. S. Kim, *et al.*, "White-light Generation Through Ultraviolet-emitting Diode and White-emitting Phosphor", *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 17, pp. 3696-3698, 2004.
- [3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.7: "Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light", in IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp. 1-309, Sept. 6, 2011.
- [4] A.M.J. Koonen, C.W. Oh, K. Mekonnen, Z. Cao, E. Tangdiongga, "Ultra-high capacity indoor optical wireless communication using 2D-steered pencil beams", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20):7482669.
- [5] Jaesang Cha *et al.*, "A new band plan for IEEE802.15.7m", Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/17/15-17-0174-00-007a-a-new-band-plan-for-15-7m.pdf>
- [6] IEEE 802.15.7r1 Short-Range Optical Wireless Communications Task Group http://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm
- [7] "Multi-Gigabit per Second Optical Wireless Communications (OWC) with Ranges up to 200 meters" <https://development.standards.ieee.org/get-file/P802.15.13.pdf?t=92735500003>
- [8] http://www.ieee802.org/11/Reports/ictig_update.htm
- [9] M. Ayyash *et al.*, "Coexistence of WiFi and LiFi toward 5G: concepts, opportunities, and challenges", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 64-71, February 2016.
- [10] D. Schulz *et al.*, Long-Term Outdoor Measurements Using a Rate-Adaptive Hybrid Optical Wireless/60 GHz Link over 100 m", Proc. ICTON 2017 (invited).
- [11] A.M. Khalid *et al.*, "10 Gbps indoor optical wireless communication employing 2D passive beam steering based on arrayed waveguide gratings", Proc. IEEE Summ. Top., TuC2.3, Newport Beach (2016).
- [12] J. Zeng *et al.*, "A 5Gb/s 7-Channel Current-mode Imaging Receiver Front-end for Free-Space Optical MIMO", Proc. IEEE MWSCAS, Cancun (2009).
- [13] Z. Cao *et al.*, "200 Gbps OOK Transmission over an Indoor Optical Wireless Link Enabled by an Integrated Cascaded Aperture Optical Receiver", Proc. OFC, PDP Th5A.6, Los Angeles (2017).
- [14] S. Collins *et al.*, "High gain, wide field of view concentrator for optical communications", *Opt. Lett.*, p. 1756-(2014).
- [15] A.M. Khalid *et al.*, "Bi-directional 35-Gbit/s 2D Beam Steered Optical Wireless Down-link and 5-Gbit/s Localized 60-GHz Communication Uplink for Hybrid Indoor Wireless Systems", Proc. OFC, Th1E.6, Los Angeles (2017).
- [16] Ivica Stevanović, "Light Fidelity (LiFi)" Federal Office of Communications OFCOM Licences and Frequency Management Division Radio Technology Section, December 14, 2016.
- [17] <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0746-01-007a-tg7r1-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.pdf>
- [18] Optical Wireless Communication: options for extended spectrum use, Stratix and Technical University of Eindhoven commissioned by the Dutch Radiocommunications Agency (Agentschap Telecom) Ministry of Economic Affairs and Climate policy, December 2017.
- [19] <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0492-05-007a-technical-considerations-document.docx>
- [20] GDD based Automatic Traffic Sign Recognition Using CamCom Technology, IEEE 15-18-0031-00-0vat, 2018. 1.

مراجع أخرى

- R. D. Roberts, S. Rajagopal and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 physical layer summary", *IEEE GLOBECOM Workshops*, pp. 772-776, Houston, TX, 2011.
- T. Baykas *et al.*, "Let there be Light Again! An Amendment to IEEE 802 Visible Light Standard is in Progress" *IEEE COMSOC MMTC E-Letters* March 2016.
- M. Uysal, *et al.* "TG7r1 CIRs Channel Model Document for High-rate PD Communications", Online: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/15/15-15-0747-00-007a-tg7r1-cirs-channel-model-document-for-high-rate-pd-communications.zip>
- I. Stevanovic "Light Fidelity", Report OFCOM Switzerland.
-