

■4 群 (モバイル・無線) - 4 編 (無線 LAN, 無線アクセス, 近距離ワイヤレス)

Y 章 光無線通信

(執筆者：若森和彦) [2011 年 6 月 受領]

■概要■

光無線通信は、我々が日常的に使用している放送や携帯電話の電波と同じ電磁波の一種である光 (波) を伝送媒体として、自由空間を伝搬させて相手側に情報を伝達する仕組みを有するものである。それは、我々の生活環境の中で最もありふれた無線通信手段であるため、あまり意識されることはないが、「リモコン」や携帯電話の「赤外線通信」も光無線の応用事例の一つである。更にその利用は、宇宙空間での応用まで広範囲にわたる。また、光波は人間が認識できる可視光及びその前後の広い範囲を含む。

そこで本章では、双方向で情報を伝達するシステムの構成要素の 1 手段としての光無線通信にフォーカスした解説を行うことにする。なお、赤外線データ通信と可視光通信に関しては別章にて詳細な紹介が行われるため、本章では、近赤外域の光を使って既に実用化されたシステムや研究開発が進められているシステムを中心とした、技術概要や応用及び動向について解説する。

【本章の構成】

本章では、Y-1 節「光無線通信の概要」でその歴史、特徴、技術、システムトポロジー、回線設計を述べた後、光無線通信の応用 (Y-2 節)、標準化と安全性 (Y-3 節) について解説する。

■4 群-4 編-Y 章

Y-1 光無線通信の概要

(執筆者：若森和彦) [2011年6月 受領]

Y-1-1 光無線通信の歴史

光無線通信の起源は非常に古く、狼煙（烽火）を使って遠距離まで情報を伝えることが各地で行われていた。その仕組みは、非常に単純な 1 ビット通信であるが、現在使われている光通信（技術的には大きな進歩を遂げているが）と本質的にほとんど差はない。また、フランス革命期以後のヨーロッパでは、Telegraph（腕木通信）と呼ばれるイメージ通信システム（100 語程度のパターン認識ができ、分速 100 km 以上の伝達速度と言われている）が電信の発明まで広く使われていた¹⁾。そして、光学技術をベースにした近代における光無線の起源は、電話の発明者であるベル（A. G. Bell, 米国）の“Photophone（光電話）”の発明であると言われており、電話の発明から僅か 4 年後、1880 年のことである²⁾。

光無線の伝送媒体である光波は、電波に比べて周波数が桁違いに大きいため、電波と異なる物理特性を有する。そのため、電波と同じように光波を無線媒体として扱うためには量子論的制御が必要であり、自由に制御できる人工光源も必要となるため、光無線の技術は遅々として進展しなかった。それでも 1960 年代初めレーザの登場と同時に通信への応用が検討されはじめ、当時の電電公社（現在の NTT）が中心となり様々な通信実験が行われた³⁾⁴⁾。しかし、光波伝搬を行う屋外自由空間における減衰⁵⁾⁶⁾は、大気中の霧や雨の水滴、煙霧、スモッグなどにより著しく増加するため、通信回線として十分な安定性を得ることが不可能であるとの結論に至った。そうしたなか、1970 年に半導体レーザ（LD）の室温連続発振と 20 dB/km という当時としては驚異的な低損失光ファイバの開発が行われた結果、伝送媒体として光を使う通信の研究は光ファイバ通信に向かい、光無線技術は宇宙・軍事分野といった、一部での研究開発を除き忘れられた存在となっていた。

1990 年代になると通信を取り巻く社会環境は大きく変わり、コンピュータネットワークの進展とインターネットの爆発的普及による通信量の指数関数的増大が始まった。更に、携帯電話の普及に象徴される、無線通信の需要増大は電波の周波数帯域不足を招き、同時に通信に対する要求にも構造的変化をもたらしてきた。こうした変化を背景に光無線通信は、電波とは異なる光を伝送媒体として使うための特徴、他の電子機器や電磁波との非干渉性、空間的に容易に閉じ込められる局在性、非常に大きな周波数資源でありながらライセンスが不要である点、更にはファイバ網との接続性、すなわち大容量伝送路が手軽に構築できることなどが認識され、その利用分野が広がってきた^{7)~9)}。現在、光無線通信は、ファイバ通信（Optical Communication）と区別して FSO（Free Space Optical Communication）と慣用的に呼ばれている。

Y-1-2 光無線通信の特徴

光無線システムの特徴を一言で表現すると、光ファイバと無線の 2 面性を有するシステムと言える。閉じた空間（導波路）を使う光ファイバ通信と自由空間を伝搬させる光無線通信は、基本的に同じ技術の上に成立している。また一方で、同じ電磁波である電波を使った無線通信と回線の特長や設計思想が多く の点で共通している。他方、光波の物理的特性に由来する違い

も存在し、そこに光無線通信の特徴が生じる。

電磁波において、3000 GHz 以上の周波数領域は電波法で言う電波ではなくなるため、光波領域を使う通信は無線局免許が不要で自由に使用できる。また、その物理的特性から直進性が強く、遮蔽による伝搬範囲の限定が容易であり、他の電磁波との相互干渉も考慮する必要がない。更に、大容量通信が可能で共通の技術の上に成り立っている光ファイバ通信との親和性に優れている。

すなわち、光無線通信は見通し内に限定されるが、それゆえ高いセキュリティを有した大容量回線を自由かつ簡易に構築できる手段である。

Y-1-3 光無線通信の技術

光無線通信の基本的なシステム構成は、図 1・1 に示すように光ファイバ通信におけるファイバ部分を切断し、そこにアンテナ光学系を取り付けた構造となっている。

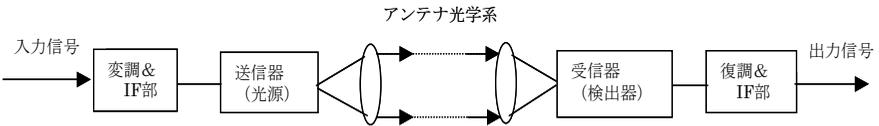


図 1・1 光無線通信の基本システム

光源には LED や LD, VCSEL が用いられ、光信号の受信用検出器には Pin-PD や APD が使われる。既に実用化されている装置においては、800 nm 帯の波長が多く使われている。これは、安価で大きな出力パワーが得やすく、比較的高速変調できる光源があり、大きな受光面積が得やすい安価なシリコン系検出器が利用できるためである。最近では、目に対する安全性と大容量通信のためファイバ通信と同じ 1550 nm 帯も使われる。アンテナ光学系部分は、大小様々なレンズ、フィルタ、スプリッタなどの光学部品が使われ、送受信光の拡散、送信制御や集光、合分波などが行われる。変復調及びインタフェース部(IF部)では利用用途に応じた信号レベルの変換が行われ、接続される各機器との間で信号の授受が行われる。電波の場合、無線側では用途や通信速度などに応じて様々な変調方式が用いられるが、光無線通信ではほとんどの場合ファイバ通信と同様に強度変調方式が使われている。使われるデバイスの組合せは、通信速度や適用距離、利用形態によって変わり、装置のコストやスケール、特長に大きな相違が現われてくる。

通信距離が短い屋内利用や通信速度が遅い場合には、送信用デバイスとして LED が使われることが多い。送信光学系の簡素化や光の拡散、強いパワーを必要とする場合、複数個ないしアレイ状に LED を並べて利用する。LED は、発光面のサイズが大きいため、網膜上で小さな集光点にならず、目に対する安全性に優れている。これに対して、光ビームの拡がりを抑え高速で長い距離の通信を行う屋外光無線通信では、一般的に LD や VCSEL が使われる。通信速度では、100 Mbps 辺りが使い分けの境界となる。そのため、屋外利用の場合でも通信速度 100 Mbps 程度、通信距離 100 m 程度までは LED が利用されることも多い。近年、LED 照明の普及に伴い可視光通信に注目が集まるのも、照明用 LED を通信インフラに利用できる可能性があるためである。

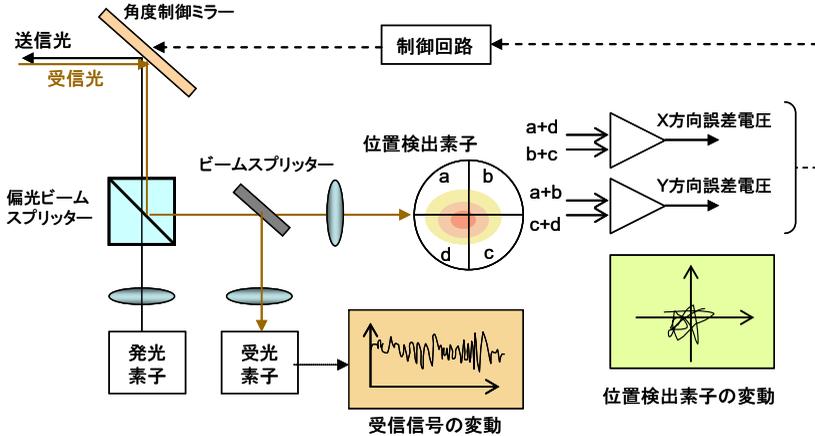


図 1・2 光無線通信における追尾機構例

一方、光無線通信に特有の技術として捕捉・追尾（いわゆる光軸を合わせ保持する技術）がある。すべての装置がそれを具備しているわけではないが、衛星間や屋外など遠隔 2 点間での利用の場合、設置環境や伝搬路の大気擾乱による変動の影響を減じて光軸を保持するため適用される。また、屋内利用の場合には、容易に相手局を探索するためなどの理由により本技術が適用される。光軸サーボと呼ばれる本技術は、常に対向する光無線装置へ向けた光ビームの放射方向を一定に保つように、外乱の大きさ、向き、速度などを検出してその影響を補償する動作を行うため、ビーム到来位置検出とサーボ駆動機構により構成される。図 1・2 は偏光角による送受信光分離による 1 軸光学系での動作例を示している。受信光の一部を 4 分割の位置検出素子に導き、そこでの誤差信号が零になるように角度制御ミラーを駆動させ、送信ビームを常に相手側装置の光軸に一致させる。双方が独立にこの動作を行い安定した追尾を実現する。

Y-1-4 システムトポロジー

光無線方式の重要なポイントは、光通信の特性と無線の使い勝手を如何にマッチングさせるかにある。光無線通信システムの構成は、接続形態と光の拡散（範囲）具合により図 1・3 に示すような 3 種類の基本的トポロジーに分類される。拡散-拡散系は、無線システムと同様に情報のキャリアである光を拡散させ、複数局間との接続（ $N:N$ 接続）の実現、相手局の捕捉など取扱いを容易にするものであるが、光の損失やマルチパス干渉など性能確保が非常に難しく、伝送制御も複雑であるため、リモコンや光マイクなどの片方向伝送以外ではほとんど実用化されていない。拡散-非拡散系は、拡散側の損失による通信範囲の制約があるが、Ethernet の SW-HUB と端末の関係のように $1:N$ のスター型接続が構成でき、屋内光無線 LAN の標準的なトポロジーとなっている。非拡散-非拡散系は光無線通信の基本形であり、性能確保やコスト面で有利である。更に、光の拡がり方を制御することで光軸のアライメントが問題となるが長距離通信も可能であり、様々な用途で多くの装置が実用化されている。

また、接続の柔軟性や収容局数を拡張するため光学デバイスによる時間・空間分割や符号分

割を用いた多元接続の検討も行われている^{10),11)}。

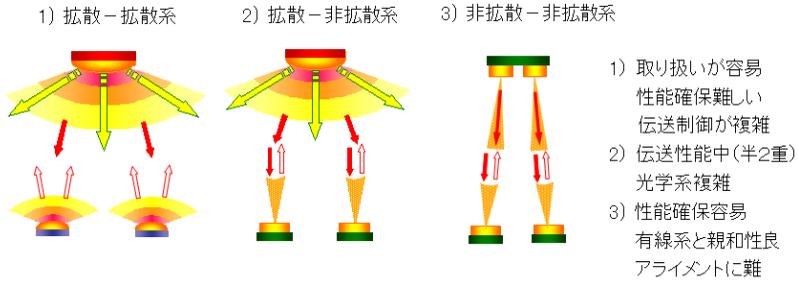


図 1・3 光無線 LAN の伝送トポロジー

Y-1-5 回線設計

他の無線通信と同様に、光無線通信の回線設計も送信電力と最小受信電力及び伝送損失から設計される。送信電力は、安全性(特に眼に対する)の観点から送出される光の強度が制約される。最小受信電力は、受光デバイスの種類と通信レート、変調方式など受信回路を含む SN 比特性で決定される。伝送損失は、空間への拡散度(拡がり角)と受信光学系の効率で決定される。この光の拡がりによる損失は、光無線通信で非常に大きな部分を占め、システムの適用範囲や性能、使い勝手を大きく左右する。送受信電力差からこの損失を引いた残りがシステムマージンとなり、装置の利用形態によってマージンの設定に大きな違いが現れる。

屋内利用のように短い距離では、光の拡散損失以外の伝搬路上での損失は考慮する必要がないため、適用範囲内における光強度のムラを補償する程度のマージン(数 dB)があればよい。

一方、屋外で利用する場合には、大気状態による各種の擾乱要因を考慮したマージン設計が必要となる。一つは大気構成分子による吸収・散乱である。光無線通信で使われる波長域に存在する主な吸収要因は、水と酸素によるものであり、一般にはこの吸収帯を避けた波長が選択されている。散乱は、雪や降雨による幾何光学的散乱によるものと霧や霞によるミー散乱が主となる。特に霧や霞の粒径は光の波長に近くなるため、その散乱、吸収によって失われるエネルギーが大きくなり、屋外光無線通信において最も影響を及ぼす事象となる。しかしながら、気象現象は複雑であり、特定の事象で波長減衰を推定することは困難である。そこで、これらの事象すべてを包含して光の減衰を表す尺度として「視程」が使われる。視程の累積分布確率と光無線リンクの稼働率に関しては多数の実証実験が行われ、装置のマージンが与えられれば視程の累積分布確率が計算できる地域での光無線リンクの稼働率が推定できることが示されている^{12),13)}。

図 1・4 は、1990 年から 99 年の 10 年間の東京における視程の累積分布確率である。この図から、東京都内で光無線の稼働率を 99.99% 以上としたい場合、最小視程距離約 420 m で動作できればよいことが分かる。したがって、装置に必要なマージン X は、視程 V を使った簡易式 $[X=13/V]$ を適用する^{6),14)} と、運用距離が 1 km では約 31 dB、500 m では約 15.5 dB あればよいことが分かる。

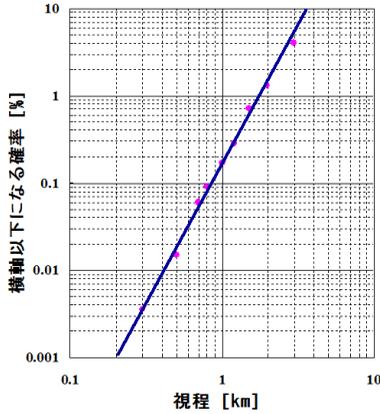


図 1・4 東京における視程の累積分布確率（1990～1999年：大手町気象台データ）

このほかに、大気中を伝搬する光は大気屈折率変動により、受信端でのビーム波面に変動を受ける¹⁵⁾。なかでも屋外光無線通信に強い影響を及ぼすものがシンチレーションと呼ばれる強度揺らぎである。この強度揺らぎは屈折率揺らぎの多重散乱効果として説明され、送信エネルギーの一部を受信する系で受信 SN 比の大きな変動を引き起こす。受信点に到達した光ビーム径と受光アンテナ径の比が大きいほど顕著であり、追尾の安定性などにも影響を与える。ただし、現在利用されている光無線リンクは、TCP/IP プロトコルが主に使われ、瞬間的なリンク断の時間は通常数ミリ秒であるためよほど頻発しない限り運用上支障は生じない。しかし、移動体など高精度の追尾が要求されるシステムやアンテナ開口が小さいシステムにとっては重要な課題となっている。

■4群-4編-Y章

Y-2 光無線通信の応用

(執筆著：若森和彦) [2011年6月 受領]

Y-2-1 屋内利用

屋内での光無線通信の代表的利用例として光無線 LAN システムがある。天井や壁に設置されるサテライトと机上端末との間に、有線と同等の 100 Mbps の通信を 1 : N のスター構成で実現する STD-T50 規格¹⁶⁾に適合したシステムが実用化されてきた¹⁷⁾。こうしたシステムは、光の持つ局所性、セキュリティと安全性に優れた特徴を活かして、官公庁や学校、病院などを中心に利用されてきた。更に近年では、工場や倉庫内などでの制御・データ収集システムでも従来の個別で低速な信号伝送システムからネットワークの統合が進みつつあり、耐ノイズ特性の点からも光無線が注目されている。特に、移動体との通信では、ワイヤの通線は煩雑であり、障害発生の要因となりやすいことから無線伝送路が望まれている。また、同様の理由でエレベータ内との通信、監視映像伝送や情報伝達手段として光無線の利用が増加してきている。図 2・1 は、エレベータでの利用イメージである。エレベータボックスとエレベータシャフト内部の上端または下端に取り付けられた光無線装置で、ボックス内部への情報提供や監視カメラ映像の伝送を行う。

ホームユースの例では、大画面壁掛け TV とチューナー間の映像信号伝送が注目されており、その被伝送信号は HD-TV 信号であるため 1 Gbps 以上の高速伝送が要求される。光無線の場合非圧縮送信が可能で、外部への漏洩の心配がなく、コンテンツ保護の面からもメリットが大きいと期待されている。また最近では、LED 照明に通信機能を持たせる研究開発が進みつつある¹⁸⁾。

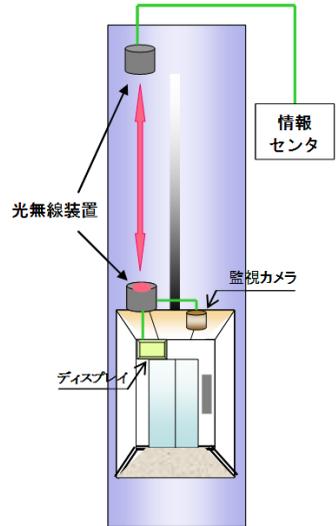


図 2・1 エレベータでの利用イメージ

Y-2-2 屋外利用

屋外利用の光無線システムは、当初から映像伝送など、広い周波数帯域を必要とする無線通信を補完するための研究開発が行われてきた¹⁹⁾。現在、適用距離は数 10 m から数 km の範囲に及び、通信速度は数 Mbps から数 Gbps まで、多種多様な製品が存在するが、基本的構造は 2 地点間を 1 : 1 で接続する形態である。

主要な用途としては、公道、鉄道、河川などを跨ぐビル間で WAN 回線より安価で高速なネットワークを簡易に構築するために利用されることが多かった。それが近年、地域的なイントラネット網への適用や監視カメラ網への適用、移動体通信の基地局アクセス、またデバインド地域へのアクセス回線としての応用などその利用が拡大してきた^{20),21)}。また、災害時の臨時回線

としては、2001 年の 9.11 テロや中越地震の際のネットワーク確保に貢献したことはよく知られている。その他、交通管制システムや ITS (Intelligent Information and Communication Systems) などの社会インフラの一部としての利用²²⁾ や工事現場での装置制御・監視データ伝送、無人搬送システムなどにも利用が広がってきている。図 2・2 に地域的イントラネットの例として、平成 10 年から総務省と文部科学省との共管プロジェクトとして実施されたいわゆる「学校インターネット」で使われた光無線システムによるネットワーク構成事例を示す。本プロジェクトでは、無線アクセスの一種として全国各地域で利用され (256 回線中 93 回線)、回線設計通り稼働結果が得られたことが示されている²³⁾。

宇宙空間は、当初から光無線通信の主要ターゲットであり、様々な検討や実験が行われ、近年では衛星間光無線通信実験の成功も報告されている²⁴⁾。更には、惑星間通信への応用が検討されており、火星との間に光無線リンクを構築する計画が NASA を中心に進められている²⁵⁾。

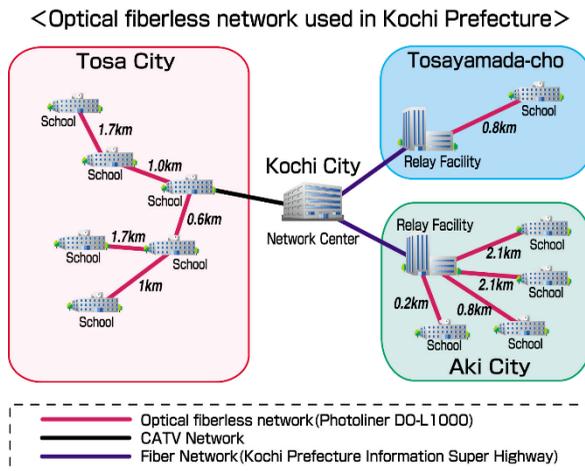


図 2・2 地域イントラ網の利用事例
高知県における「学校インターネット」の光無線ネットワーク構成。

Y-2-3 新しい光無線通信方式の研究開発

従来の光無線方式は、Y-1-3 項で示したように有線と無線のインタフェース間で光-電気変換を介してきたが、この方式では、WDM 伝送や 10 Gbps 超の伝送など進展著しい光ファイバシステムに対応していくことが困難となってきた。そこで SMF から入力された信号光をファイバアンプで増幅し直接空間へ放射し、受信側では光学系で集光した信号光を直接 SMF へ戻す、光電気変換を介さない方式が提案されてきた^{26),27)}。しかしながら、受信信号光をモードフィールド径 10 μm の SMF コアに集光し続けることは、大気擾乱や装置の振動、歪みなど従来の光無線ではあまり考慮する必要のなかった要因までが大きな影響を及ぼすため、安定した通信路を維持することは困難であった。早稲田大学を中心としたプロジェクトチームは、高速応答可能な超小型 2 軸ガルバノミラーを追尾システムに用いて²⁸⁾、SMF への集光を安定化させるフル光接続型の光無線通信装置を開発し、東京都内 1 km で長期の実証実験を行い、初めて安定

した WDM 伝送や 10 Gbps 通信を実証した²⁹⁾。その後、本方式を使った 40 Gbps×32 波長多重による 1.2 Tbps 通信実験も報告されている³⁰⁾。更に、大阪大学と早稲田大学のチームは、本方式を Radio on Fiber に適用する RoFSO (Radio on FSO) の研究開発を行い、WLAN や ISDB-T、3 GPP 信号などの無線サービス信号伝送を実証し、光ファイバと無線通信を融合したユニバーサルプラットフォームへの適用の可能性を示した^{31),32)}。図 2・3 に 4 波の RF 信号を RoFSO システムで 1 km 伝送したときの受信信号スペクトルと ISDB-T 12 seg.信号のコンスタレーション及び WLAN 802.11g のスペクトルマスクテストを示す。

更に近年では、補償光学技術を追尾システムに応用する検討³³⁾や、高速追尾を用いた光無線通信を衛星だけでなく地上の高速移動体との通信に応用する試みも行われている³⁴⁾。

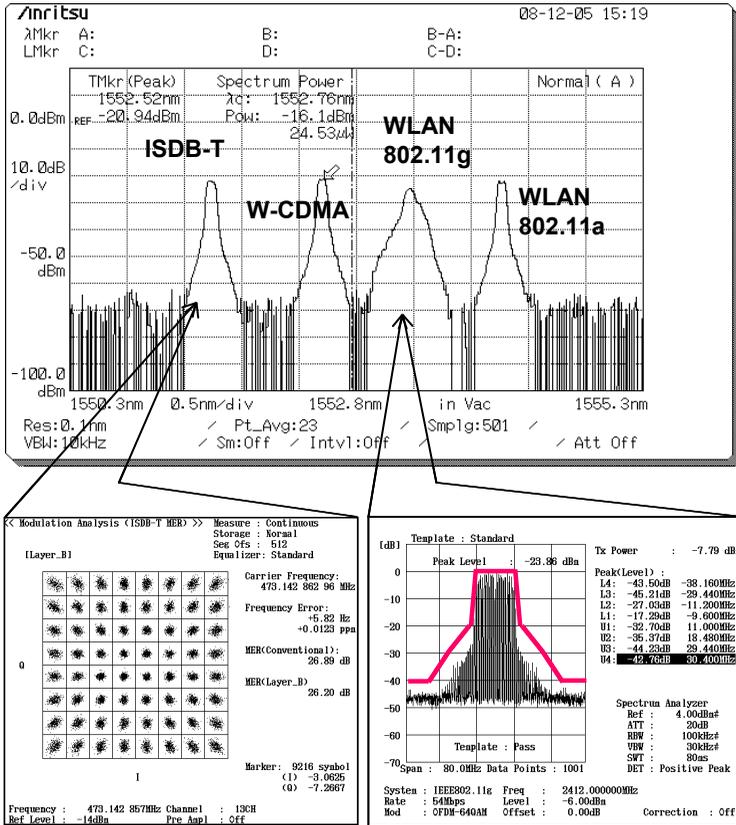


図 2・3 受信信号スペクトルと信号解析例 (ISDB-T constellation map, WLAN802.11g spectrum mask)

■4群-4編-Y章

Y-3 標準化と安全性

(執筆者：若森和彦) [2011年6月 受領]

Y-3-1 標準化の動向

光無線通信は、電波法の規制対象外であるため利用波長や用途に関して特段の規制はない。しかし、光無線通信システム推進協議会では、光無線通信システムの相互接続性や干渉を避けるため、ARIB STD-T50として標準化を進めてきた。当初（1997年）は10Mbpsの屋内用光無線LANを対象としたものであったが、2006年の第3版では1Gbpsの屋内外でのシステムも対象としたものに拡張され、2009年には可視光通信コンソーシアムと共同で対象波長を可視光領域まで拡大した第4版が制定された¹⁶⁾。

国際電気通信連合（ITU）でも光無線に関する検討が始まり、ITU-Tでは、光無線の運用上における妨害や相互干渉を排除するための勧告（Recommendation G.640）³⁵⁾を承認した。ITU-Rでも固定通信分野（W5C）で日本とフランスが中心となり、光無線システムの特性と運用に関する技術報告文書³⁶⁾が作成された。更に、2010年には日本から新しい光無線方式の提案を本文書に追加する提案が行われている。

他の光無線に関連する規格としては、（社）電子情報技術産業協会（JEITA）が定めるリモコンやオーディオ関係の光無線伝送に関する規格（CPX-1209、CP-1205A、CP-1208、CP1209 http://www.jeita.or.jp/japanese/public_standard/）がある³⁷⁾。このなかには、物理層である光伝送部の規格として、副搬送波のキャリア周波数やバンド幅、データ伝送方式などが定められている。

しかしながら、これらはお互いが保護されているわけではない。供給者側は、利用波長などに注意して相互干渉が生じないように留意していると思われるが、意図的に不正な使い方をを行った場合には、妨害光となる場合もある。今後、可視光通信も含め様々の光無線リンクが我々の身近に存在する可能性が出てくる。そうした場合、相互干渉を回避するため、広範囲な標準化検討を行う必要がある。

Y-3-2 光無線通信の安全について

光無線を運用するに当たって注意すべきは眼に対する安全性である。光無線システムの放射光強度は、照明や太陽光に比べると遙かに微弱であるが、光源サイズが小さいため、眼球レンズで収束され、網膜上のパワー密度が大きく増加する。放射光による障害発生は、照射強度、波長、露光時間、光ビームの性質などに依存するため、それらを考慮した安全取り扱い基準が国際的に検討されている。人体に対する人工放射光の安全基準については、国際電気委員会 IEC/TC76 において規格化作業が行われ、1984年に IEC825 “Radiation safety of laser products, equipment classification, requirements and user’s guide” が制定された。その後、数回の改訂が行われ、IEC60825-1 Amendment 2としてまとめられている³⁸⁾。

光の放射レベルが安全か否かは、最大許容露光量（MPE : Maximum Permissible Exposure）が基準となり、眼及び皮膚に対する指標が波長と露光時間で定められている。MPEは、動物実験などから障害発生率が50%となる露光量の1/10とされ、規定面積当たりのパワー密度で与えられる。したがって、眼の水晶体で集光される波長範囲（400～1400 nm）では、2桁以上も眼

の方が皮膚に対して MPE 値は低くなる。1400 nm より波長の長いレーザー光がアイセーフと言われるのは、網膜上に集光されないためである。

光無線通信に関する安全規格は、近年 IEC 60825-12 (光無線通信システムの安全) として独立したシステム規格として扱われることになった³⁹⁾。光無線通信システムのため新たに導入された概念は、アクセスレベルの導入とロケーション分類によるエリア管理の概念である。本規格については、光無線通信システム推進協議会において安全ガイドライン⁴⁰⁾としてやさしく紹介しているので参照されたい。

むすび

古くて新しい技術である光無線通信は、光ファイバ通信をはじめとする様々な要素技術を取り込む形で進化してきた。他方では、リモコンや携帯電話の赤外線通信機能のように、我々が特段の意識をしないほど利用が広まった分野がある一方、無線通信 (放送や家庭内無線 LAN) のように通信として意識する分野ではそれほど身近な存在とはなっていない。しかしながら、光波領域は無線通信にとって非常に大きな周波数資源であり、その潜在能力は非常に大きなものである。今後、一層の進展が確実である光ファイバ網とユビキタスな通信環境への欲求は、無線と光ファイバ網の融合をより強く求めるであろう。光ファイバと無線、両者の特徴を有する光無線通信は、両者をそれぞれ補完し、スムーズに結合できる能力を秘めている。今後の更なる技術開発と応用分野の開拓により、より多くのシーンでその利用範囲を拡大していくことが期待される。

■参考文献

- 1) 中野 明：“腕木通信：ナポレオンが見たインターネットの夜明け,” 朝日新聞社, 2003.
- 2) Optics and Photonics News 4, no.6, p.21, 1993.
- 3) 伊藤, 他：“ヘリウムネオンレーザー光によるテレビジョン信号の屋外伝送実験,” TV 学会誌, vol.22, no.1, p.15, 1968.
- 4) T. Ito et al.：“Optical PCM Transmission Experiment Through the Atmosphere,” The Trans. of the IECE of Japan, vol.E60, no.11, 1977.
- 5) 般川：“レーザー光の大気伝搬,” 信学誌, vol.4, p.503, 1968.
- 6) 森田, 吉田：“大気中伝搬における光波の減衰特性,” 通研実報, vol.18, no.5, p.1165, 1969.
- 7) (財)光産業技術振興協会：“光技術応用システムのフーズビリティ調査報告書 XX II - 光ワイヤレス通信技術-,” pp.79-111, 2002.
- 8) K. Wakamori, T. Hayashi, H. Yamashita, Y. Kimura, and M. Hosoda：“155-Mbps ATM Backbone for an Interbuilding Intranet Using an Optical Wireless System,” in 10th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol.1, pp.85-90, Sep. 1999.
- 9) H.A. Willebrand, B.S. Ghuman：“Fiber optics without fiber,” Spectrum, IEEE, vol.38, pp.40-45, Issue 8, Aug. 2001.
- 10) 坂本俊太, 宮本伸一, 三瓶政一：“光空間伝送システムにおける空間並列伝送/強度分布変調方式の符号化に関する検討,” 信学技報, RCS2007-86, vol.107, no.262, pp.37-42, Oct. 2007.
- 11) 石田友美, 小川賀代：“光学デバイスを用いた光無線通信における時分割多元接続システム,” 信学技報, OCS, vol.107, no.343, pp.17-20, 2007.
- 12) K. Wakamori, K. Kazaura, and I. Oka：“Experiment on Regional Broadband Network using Free-Space Optical Communication Systems,” IEEE Journal of Lightwave Technology, vol.25, no.11, pp.3265-3273, Nov. 2007.
- 13) 若森和彦, 他：“光無線通信システムのための光波伝搬特性調査研究,” 信学技報, SAT, vol.103, no.234, pp.143-148, 2003.
- 14) 光無線通信システム協議会：“屋外光無線通信システム導入ガイドライン,” 2001. <http://www.icsa.gr.jp/>

- 15) L.C. Andrews and R.L. Phillips : “Laser Beam Propagation Through Random Media,” in SPIE-International Society for Optical Engineering, 2nd ed., 2005.
- 16) ARIB STD-T50 4.0 版, “光無線 LAN システム標準規格”, (社)電波産業会, 2009.
- 17) 広橋一俊 : “光無線 LAN システム (ARIB 標準規格 STD-T50),” (社)電波産業会, ARIB 機関誌, vol.53, pp.20-27, 2007.
- 18) 林 新, 広橋一俊, 井川健一 : “照明機能付き高速光無線 LAN 統合システム,” 信学技報, vol.109, no.400, pp.43-48, 2010.
- 19) 例えば, 若森, 他 : “デジタル光 FPU 装置の開発,” 映像情報学会誌, vol.52, no.11, 1998.
- 20) K. Wakamori, et al. : “Regional Broadband Network by Optical Wireless System,” 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference, D4-1-02, 2001.
- 21) H. Willebrand and B. Ghuman : “Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks,” London, U.K.: Sams, 2002.
- 22) 深井, 須田 : “光空間情報伝送機器の応用システム,” OPTRONICS, no.11, p.142-145, 1999.
- 23) 若森和彦, 岡 育生 : “光無線通信システムの地域ブロードバンドネットワークでの運用と評価検討: 学校インターネットにおける光無線の稼働評価,” 信学技報, SAT, vol.105, no.537, 2006.
- 24) Yuuichi Fujiwara, et al. : “Optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS),” Acta Astronautica, vol.61, Issues 1-6, pp.163-175, Jun.-Aug. 2007.
- 25) A.J. Hashmia, A.A. Eftekhara, A. Adibia, and F. Amoozegar : “Analysis of telescope array receivers for deep-space inter-planetary optical communication link between Earth and Mars,” Optics Communications, vol.283, Issue 10, pp.2032-2042, May 2010.
- 26) Y. Arimoto, Y. Hayano, and W. Klaus : “High speed optical feeder-link system using adaptive optics,” SPIE, vol.2990-15, Feb. 1997.
- 27) Y. Aburakawa and T. Otsu : “Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission,” in Proc. of MWP'03, pp.135, 2003.
- 28) K. Takahashi and Y. Arimoto : “Compact optical antennas using free-form surface optics for ultrahigh-speed laser communication systems,” SPIE Journal of Optical Engineering, vol.47(1), 016002, Jan. 2008.
- 29) K. Kazaura, et al. : “Performance Evaluation of Next Generation Free-Space Optical Communication System,” IEICE Transactions on Electronics, vol.E90-C, pp.381-388, Feb. 2007.
- 30) E. Ciaramella, et al. : “1.28 Terabit/s (32x40 Gbit/s) WDM Transmission System for Free Space Optical Communications,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.27, no.9, Dec. 2009.
- 31) Abdelmoula Bekkali, et al. : “Performance Evaluation of an Advanced DWDM RoFSO System for Transmitting Multiple RF Signals,” IEICE Transactions, vol.E92-A, no.11, pp.2697-2705, Nov. 2009.
- 32) K. Kazaura, K. Wakamori, M. Matsumoto, T. Higashino, K. Tsukamoto, and S. Komaki : “RoFSO: A Universal Platform for Convergence of Fiber and Free-Space Optical Communication Networks,” IEEE Communications Magazine, vol.48, no.2, pp.130-137, Feb. 2010.
- 33) J.C. Juarez, et al. : “Free-Space Optical Communications for Next-generation Military Networks,” IEEE Communications Magazine, vol.44, Issue 11, pp.46-51, Nov. 2006.
- 34) 石川翔一, 蛭田真人, 中川 正雄, 他 : “列車通信システムにおける高速移動体追尾方式についての検討,” 信学技報, vol.109, no.400, 2010.
- 35) ITU-T Rec. G.640, “Co-location Longitudinally Compatible Interfaces for Free Space Optical Systems,” ITU, Mar. 2006.
- 36) ITU-R Report F.2106, “Fixed Service Applications using Free-space Optical Links,” ITU, 2007.
- 37) (社)電子情報技術産業協会, JEITA 規格, 赤外線伝送関係,
<http://www.jeita.or.jp/cgi-bin/standard/list.cgi?cateid=1&subcateid=7>
- 38) IEC60825-1 Amendment 2, “Safety of laser products, equipment classification, requirements and user's guide,” 2001.
- 39) IEC60825-12, “Safety of Free Space Optical Communication Systems (FSOCS),” 2004.
- 40) 光無線通信システム推進協議会ホームページ「安全ガイドライン」,
http://www.icsa.gr.jp/activity/guideline/index_sgl_00.htm