

屋外光無線通信システム

若 森 和 彦

The Free-Space Optical Communication Systems

Kazuhiko WAKAMORI

Recently, the free-space optical communication systems (FSO) have been well investigated as a solution for a build-up of broadband network. The FSO technology is capable of providing much higher bandwidth than any other competing wireless solutions. Furthermore, it provides a superior connectivity with optical fiber. This paper describes FSO technology, features and example of applications. This paper will also describe the technical trend and the future observation of FSO.

Key words: FSO (free-space optical communication systems), optical wireless, laser beam transmission, meteorology, atmospheric attenuation, visibility, availability

光無線通信システムは、TVのリモコンに代表されるように、われわれにとって最も身近でかつ古くから使われてきた通信手段である。そして、1960年代に、レーザーの登場と同時に屋外光無線を通信へ応用する研究が数多く行われた¹⁾。しかし、大気中を伝搬する光波減衰^{2,3)}は、大気中の微粒子(霧や雨、煙霧、スモッグ等)により大きく変動し、当時想定された通信回線へ適用するには安定性が得られないとの結論に至った⁴⁾。そうしたとき、半導体レーザー(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ーの開発が成功し、以後、光無線通信は光ファイバー通信の発展の影に隠れて、宇宙・軍事部門を除くと長らく忘れられた存在となっていた。

ところが、1990年代になると、通信を取り巻く環境に大きな変化が生じてきた。ひとつは携帯電話とインターネットに代表されるライフスタイルの変化であり、他方は規制緩和による通信の自由化である。携帯電話は、圧倒的な利便性からすでに固定電話を凌駕し、他の無線システムの普及も相まって、マイクロ波の周波数帯域の不足を招きつつある。また、インターネットの爆発的な普及は、従来の音声中心のトラフィックからデータ中心のトラフィックに移

行するのみでなく、従来の“人と人”の通信から“機械と機械”の通信という構造的変化を伴っている。この変化は、人間のもつ時間的空間的制約を超えることを意味し、通信データ量の劇的増大(ビット爆発)をもたらしている。一方、規制緩和は、競争による価格低下だけでなく、各種のサービスを自由に提供することも可能とした。そのため、次々に提案される新サービスに柔軟に対応するため、従来からの網構造に変革を促す結果となっている。

こうした中、光無線通信のもつ特性—光ファイバーと無線とを合わせたような、大容量でプロトコル的にファイバーとの接続性にすぐれ、無線のようにインストールが容易でありながらライセンスが不要であり、他との干渉がなくセキュリティの確保が容易である—が再認識され、新たな研究開発が活発化し、その利用分野が広がってきた。

本稿では、屋外光無線通信システムの特徴ならびに技術的概要について解説するとともに、その利用状況を紹介する。また、その技術動向と将来展望について考察する。

1. 屋外光無線通信システムの概要

われわれ関係者の感覚からすればかなり普及してきたと

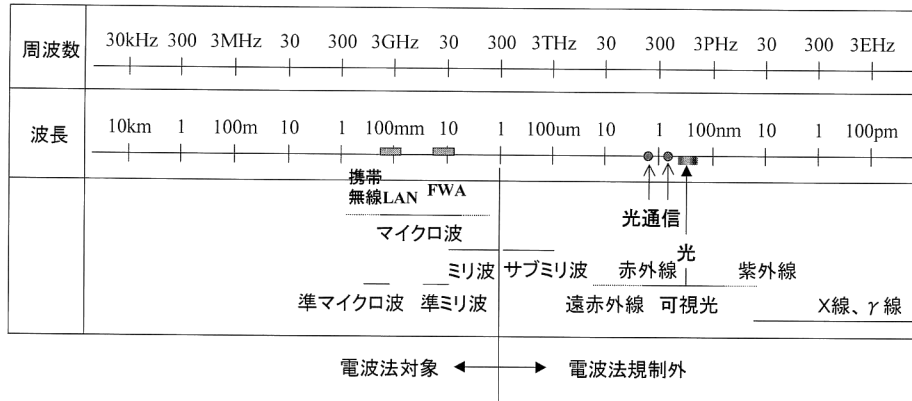


図1 電磁波の周波数。

感じる光無線通信であるが、本稿をお読みの多くの方は、「光無線?」と思われるのではと推測する。基本的に“光無線”とは、電波を使った無線通信と同様に、自由空間を伝搬路として近赤外領域の光（電磁波）を使って通信を行う方式であり、FSO (free-space optical communication systems) と総称される。その中で、伝搬路である自由空間がおもに屋外にあるものが、一般的に屋外光無線通信と呼ばれる。

1.1 屋外光無線通信システムの特徴

図1に電磁波（電波、光）の周波数を示す。われわれが一般に光と感じているのは可視光域のわずかな部分であるが、光通信にはそのすぐ外側の近赤外と呼ばれる領域の特定波長（ファイバー通信ではおもに 1550 nm と 1300 nm 付近、光無線通信では 800 nm 付近）が利用されている。そして、われわれが日常利用している放送波や携帯電話、無線LAN等で使われる電波と光の周波数領域との間では3~5桁の差がある。この周波数の差が、光無線の特徴として現れることになる。

式(1)は、ビーム広がり角の回折限界 ($\Delta\theta$) を示している。ここで λ : 波長, D : アンテナ径である。

$$\Delta\theta = 2.44\lambda/D \quad (1)$$

式(1)より、光は電波に比べはるかに広がり角が小さいことがわかる。このため、電波のような反射波によるフェージングを考慮する必要がない。実用上、アンテナの見込み角を小さくできるため、外乱光の影響を減じ空間的分離が容易となる。また、波長が短いため、回折により遮蔽物の裏側に回り込むことができない。このため、見通し内通信となるが、逆に盗聴が難しくセキュリティの確保には好都合となる。

さらに、光の性質として、他の媒体や電子機器との干渉

がなく、光間の相互干渉も通常問題にならないため、電波のように周波数帯域や出力に対して法的規制を受けない。ほとんどの国では、図1のように300GHzを境に規制帯域を定めているが⁵⁾、光領域は規制対象外となっている。そのため、光無線は世界中どこでも自由に利用することが可能である。

一方、屋外における無線通信は、衛星放送の降雨による減衰のように、伝搬路である大気状態の影響を受ける。光波も同様に、大気中の微粒子などの吸収・散乱による減衰や大気の擾乱による影響を受ける。

1.2 屋外光無線通信システムの技術概要

光無線通信システムは、伝搬路が閉じた空間（導波路）であるファイバー通信に対して自由空間であるため、送受信部にアンテナ系が付随することになるが、基本的にはファイバー通信と同じである。波長はおもに800nm帯が使われる。理由は、安価で大きな出力が得やすい光源(LED, FP-LD)があり、やはり安価で大きな受光面積を得やすいシリコン(Si)系光検出器が使えるためである。電波の場合、用途や通信速度に応じて各種の変調方式が使われるが、光無線ではほとんどの場合、ファイバー通信同様、強度変調方式が用いられている。そのため、ファイバーとの親和性がよく、ある意味、ファイバーリピーターもしくはメディア変換装置とみなすことができる。図2に、光無線通信システムの基本的なブロック図を示す。図3に、基本的な利用イメージを示す。

屋外光無線通信システムでは、その適用距離と通信速度によって、システムのスケールと適用技術に相違が出てくる。例えば、アンテナ光学系は、通信距離が長くなると伝送損失を低減するため大型化する傾向があり、通信速度が高くなるに従って小さな受光径の受光素子にビームを入射させる必要が出てくるため、高精度化が要求される。また、

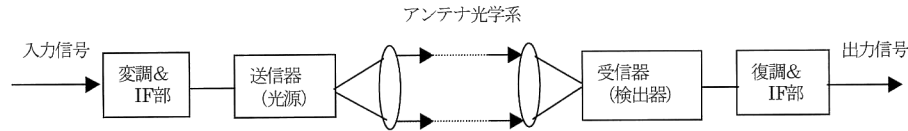


図2 光無線通信システムのブロック図。

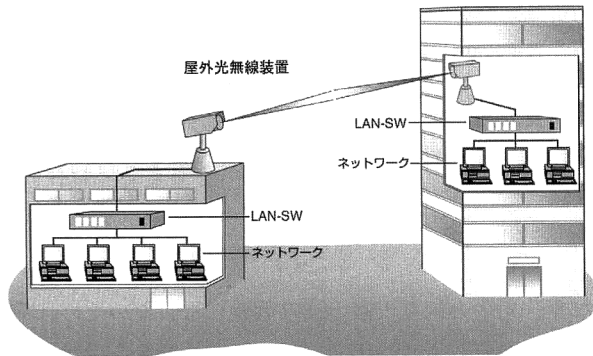


図3 屋外光無線通信システムの基本的利用形態 (ICSA 屋外光無線導入ガイドラインより)。

光無線特有の技術として、捕捉・追尾（いわゆる光軸を合わせ保持する技術）がある。すべての光無線装置がそれを具備しているわけではないが、衛星間光通信のような遠隔2点間での光軸のアライメントと保持のために、またビル間接続等では、設置点である構造物の歪みや伝搬路である大気屈折率変動によるビーム位置の移動に対する補償などの理由により、本技術が適用される。

2. 光の大気伝搬特性と稼働率

2.1 大気伝搬損失

屋外光無線通信は大気中を伝送路とするため、大気中の気体分子、エアロゾル、雨や雪等の吸収・散乱の影響を受ける。

吸収は、大気組成分子によるものであり、地表近傍における水平伝搬では CO_2 、 O_2 および水蒸気 (H_2O) の影響が主となる。われわれが遠くの景色や星空を目にできるのは、可視光域が大気の窓と呼ばれる吸収の少ない波長帯にあるためであり、屋外光無線でも吸収の少ない 800 nm 帯 (750~860 nm) および 1550 nm 帯が使われる。

散乱は、光の波長 (λ) と散乱体の半径 (r) との関係で、「レイリー散乱 ($r \ll \lambda$)」、「ミー散乱 ($r \approx \lambda$)」⁶⁾ と呼ばれ、散乱体が光の波長に比べ著しく大きい場合、複雑な幾何光学的散乱となる。大気中の気体分子やエアロゾルの粒径は、光無線で使われる光の波長に比べ十分に小さいことから、レイリー散乱が支配的となる。霧や霞は粒径が光の波長に近い場合ミー散乱を引き起こす。雪や雨滴の場合は幾

何光学的散乱となり、一般論はなく近似的に取り扱われる。

屋外光無線通信において考慮すべき光波減衰を生じる要因となる気象現象は、降雨・降雪と霧や霞である。雨滴等の粒度分布は、Marshall と Palmer⁷⁾ によって与えられており、10分間降雨強度 R (mm/10 min) に対して光の減衰量は、 $X = 4.9R^{0.63}$ (dB/km) で示される。雪の場合も同様であるが、雪質によって計算に使われる各係数が異なってくるため複雑化する⁸⁾。他方、霧や霞はその粒径が光の波長に近くなるため、散乱・吸収によって失われるエネルギーが大きくなる。

しかし、気象現象は複雑であり、特定の事象で光波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波減衰を表す尺度として、「視程」を使って光波減衰特性を評価する方法がよく使われている⁹⁾。

視程とは、地表の水平方向における大気の混濁度を示す尺度であり、明るい空を背景として黒い物体を識別する距離として定義されている。識別比5%を気象光学距離 (MOR: meteorological optical range) といい、各地の気象台で観測されている視程 (気象用語) と同義に使われている。

降雨の場合と同じく、ミー散乱を行う大気散乱粒子の粒度分布から与えられる電磁波のエネルギー損失は

$$X = 4.343 \times 10^5 \gamma \quad (\text{dB/km}) \quad (2)$$

ここで、 γ は大気散乱粒子の粒度分布から導かれる減衰係数である。視程を V とすると、コントラスト識別限界値 ϵ は

$$\epsilon = e^{-\gamma V} \quad (3)$$

式 (3) を式 (2) へ代入すると

$$X = 4.343 \times \ln(1/\epsilon) / V$$

となり、これに $\epsilon = 0.05$ (MOR) を代入すると

$$X = 13 / V \quad (\text{dB/km}) \quad (4)$$

となり、簡単に光の減衰を推定できるためよく利用される。また、波長依存性と粒子サイズ分布を考慮した次式もよく使われる。

$$X = 17D (550/\lambda)^q / V \quad (\text{dB/km}) \quad (5)$$

$$q = 0.585 V^{1/3} \quad D: \text{伝搬距離 (km)}$$

両式とも、屋外光無線通信で対象となる数百 m～5 km のレンジで実測値とよい一致を示すことが知られている¹⁰⁾。

気象による光波減衰の評価は、経験則によるところも多く決して一様ではない。考え方や式の導出等の詳細は文献^{3,6,11)}を参照されたい。

このほかに大気伝搬損失を引き起こす要因として、大気屈折率の変動による各種のゆらぎを受ける¹²⁾。なかでも、屋外光無線通信に強く影響を及ぼすものが、シンチレーションと呼ばれる強度ゆらぎ（夜空の星の瞬きをイメージすると理解しやすい）である。強度ゆらぎは屈折率のゆ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 S/N 比の劣化を引き起こす。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になる。しかし、ゆらぎ自体は瞬間的な事象であるため、頻度が多くない限り、一般的に使われる TCP/IP プロトコルを使った通信では、その影響は無視できる程度のものとなる。

2.2 屋外光無線の稼働率

屋外光無線通信の稼働率または回線設計もまた、他の通信システムと同様に伝送損失のマーヅンを見込んだ設計が行われる。ただ、前述した気象現象の影響を考慮して行われるため、それは確率的なものとなる。光波減衰に関与する降雨や霧等の気象変動は複合的で時間的・構造的変動を伴うため、個々の要因を個別に評価し、それを統合して均一的な推測を行うことを困難にする。しかし、他の無線通信と同様に、代表的な伝搬条件における変動を実測し、そのデータの理論解析から伝搬変動の確率を推測することは可能であると考えられる。

衛星放送などのマイクロ波～ミリ波帯では降雨強度の確率分布が使われるのに対して、屋外光無線では視程が使われる。ある地域における稼働率を推定しようとする場合、当該地域における視程の累積分布確率を使う方法が推奨されており、推定値と実際の稼働率はマクロ的によい一致を得ていることが報告されている¹⁰⁾。図4は、1990年代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わかる。したがって、装置に必要なマーヅンは、式(4)の $[X=13/V]$ を適用すると、運用距離が1 kmでは約31 dB、500 mでは約15.5 dBとなる。

光無線通信システムの普及と標準化を促進する目的で設立された光無線通信システム推進協議会(ICSA)¹³⁾では、この視程の累積分布確率から得られる稼働率を基準に、個々の装置の通信距離やマーヅンを定義することを推奨し

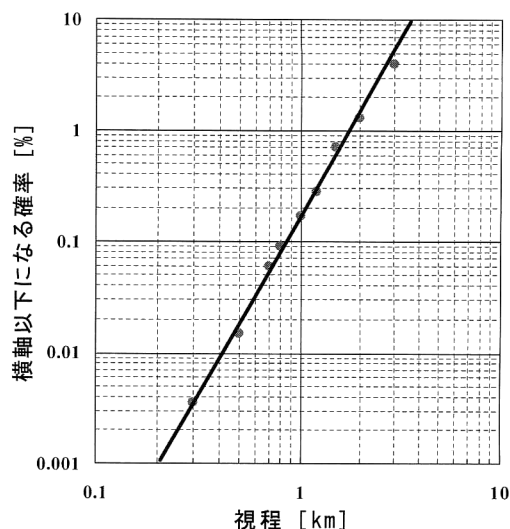


図4 東京における視程の異積分布確率(1990～1999年)。

ている⁹⁾。

しかし、視程は局所性も強く降雨強度などに比べると観測密度が薄いため、十分なデータ量が得られているとはいえない面があり、データの取得と蓄積および評価方法の改善が今後の課題である。

3. 屋外光無線通信システムの利用例

屋外光無線通信システムは、電波法の規制がなく自由に大容量のデータ伝送が可能であるため、身近な空間から宇宙まで広く利用や研究が行われている¹⁴⁾。誌面の関係上詳しく触れられないが、ネットワーク応用以前から、監視・放送分野の映像伝送や工場関係でのFA(factory automation)分野、さらに交通管制などの社会インフラの一部としても利用されてきた¹⁵⁻¹⁷⁾。

そして、1990年代後半からのネットワークの進展とともに、通信ネットワークの一部として利用が拡大してきている。従来、その利用形態は、私的ネットワーク内で公道、鉄道、河川などを跨ぐ手段として、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¹⁸⁾や、都心部の狭域内のビルを接続して通信サービス回線として提供する地域通信事業やISP事業への利用が検討され、北米ではサービスを開始した事業者が現れはじめた¹⁹⁾。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事業として実施された、いわゆる「学校インターネット・プロジェクト」がある。ここで、屋外光無線も無線アクセスの一種として利用(256回線中93回線)された²⁰⁾。

一例として、図5に高知県における光無線ネットワーク

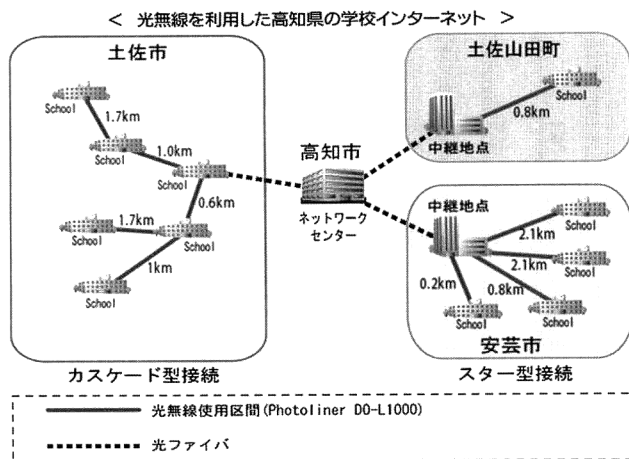


図5 高知県における光無線ネットワーク構成図。

表1 光無線リンク区間の稼働率。

地域	リンク距離	稼働率 (%)	装置マージン (dB)
静岡県浜松市	700 m	99.99	20
静岡県浜松市	1.2 km	99.90	20
高知県安芸市	2.1 km	99.70	20
群馬県太田市	3.4 km	98.50	23

の構成を示す。ここでは、ネットワークセンターのある高知市から近隣市町の中継点まで光ファイバーで中継し、そこから各学校へ光無線でアクセスする構成をとっている。また、表1にはわれわれが本プロジェクトでサポートしてきた地域の代表的な光無線区間の稼働率（監視手法上、回線品質が約1 Mbps以上確保されていると推定できる状態とした）を示す。これは、プロジェクトの運用開始から昨年末までの3～4年間取得を続けた監視データから計算したものである。図6には、観測例として、昨年8月の浜松での台風通過時の監視データを示す。降水量は、本ネットワークの近くに位置する浜松測候所のデータである（1時間あたりの降水量であり、瞬間的な降雨強度はずっと大きい場合もある）。降雨によって視程が悪化するため、リンク距離の長い回線の劣化がみられるが、1 km程度の回線にはほとんど影響がないことがわかる。この日の最大10分間降雨量は1時10分ごろに記録された9.5 mmであり、このとき、1 kmの光無線区間でも若干回線監視パケットのロスが生じているのがわかる。

移動体通信分野においては、第3世代への移行に伴い基地局整備の迅速化や、スポット需要および電波不感地帯解消、需要過剰地帯対策のための極小セル局設置などが急務となっている。また、新世代方式では高速データ伝送がトラフィックの中心となるのは必至であり、セルあたりのサ

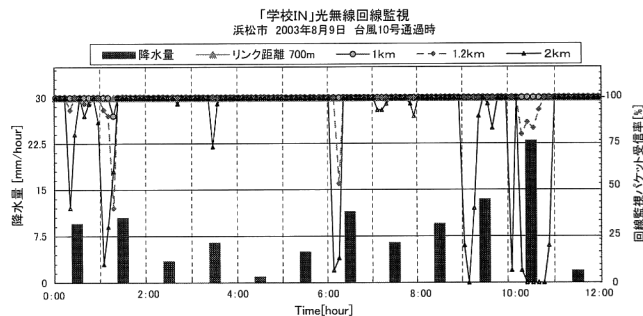


図6 光無線回線の稼働状態（強雨時）監視パケットの受信率が75%を下回ると回線速度がほぼ1 Mbps以下になる。

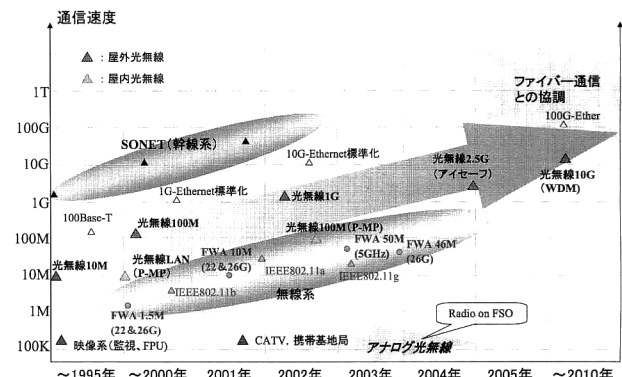


図7 光無線のロードマップ (ICSA 技術部会資料より)。

ービス半径も狭くなるため、多数の基地局とそれを結ぶエントランス回線の大容量化が重要となってくる。エントランス回線には、光ファイバーが利用されるが、基地局となる建物に敷設されていない場合も多々ある。そこに屋外光無線を利用しようとする検討が行われ^{21,22)}、すでに一部では実用化しつつある。現在実用化されている方式は、携帯電話の複数の無線周波数チャンネルを副搬送波多重 (SCM) で一括してアナログ伝送するものであり、radio on FSOと呼ばれる。デジタル伝送と比べると、所要 S/N 比や歪み特性など厳しい面が多く、伝送路の擾乱要件の大きい屋外光無線での対応は難しかったが、近年の技術進歩により実現可能となった。

4. 屋外光無線通信システムの技術動向と展望

4.1 屋外光無線通信システムの技術動向

筆者の独断的解釈ではあるが、屋外光無線通信システムは、1990年代前半までの個別のアプリケーションに対応したアナログ的システムである第1世代から、現在の光ファイバー通信技術をベースとし、IP網に適応した第2世代へと進化してきた。図7に、光無線通信システムのロードマップを示す。当初10 Mbpsで伝送距離数百 m程度であっ

たものが、1 Gbps で1~2 km へと、Ethernet の標準化に歩調を合わせ（数年遅れで）高速化が進展してきている。そのポジショニングは、無線の約10倍の容量をもち、有線系と無線系の中間に位置することがよくわかる。

これまで、光無線通信システムは、800 nm 帯の技術（LED または FP-LD と Si 受光素子）の上に展開してきた。しかし、いっそうの高速化や通信事業者のいわゆる公衆網への対応に向けては、技術的なブレークスルーが必要となると考える。

短期的には、現在のファイバー通信で使われる 1550 nm 帯への移行である。通信用の LD とファイバーアンプの技術が使えるため、高速化は容易となる。さらに、この波長域になると、眼球で網膜上に焦点を結ばなくなるため、安全性が大幅に高まり（アイセーフと呼ばれるゆえんである）²³⁾、送出できるレーザーパワーを大きくすることができる。ただし、Si に比べ容量の大きな InGaAs 系受光素子を使うことになるため、受光径がより小さくなり、光学系の高精度化が必要となる。

長期的には、ネットワークの融合を目指す方向での技術開発である。ひとつは光ファイバーとのシームレスな接続の実現であり、radio on FSO はそのひとつの形であるが、より進んでファイバーの信号を光-電気変換することなしにファイバー…空間…ファイバーへとシームレスに接続できれば、波長多重(WDM)などへの対応も可能となり、透過性のよい(bit rate free, protocol free, topology free を目指す) フォトニックネットワークの一翼を担うシステムとなりうると考える。そのためには、大気減衰やゆらぎを補償するためのパワー制御技術や高精度追尾、波面補償技術²⁴⁾が必要になると思われる。

もうひとつの方向は、アクセス回線(コンシューマー)向けの小型・低コストで使いやすい光無線装置の技術開発である。この10年間で光無線の価格性能比は100倍以上になっているが、この数年で急速に普及した無線LANに比べると割高の感があり、装置規模が大きいことは否めない(実際には、数百mのビル間通信を無線LANで屋外アンテナとセキュリティーサーバーを使って構築するコストとの間にほとんど差はない)。また、電波のようにP-MP(point to multi-point)を実現しにくい点も、アクセス系のコストのためには課題となっている。こうした課題を解消していくためには、マイクロマシン技術を応用したビーム制御や小型高効率の光学系の技術開発が必要となると思われる。限られたエリア内での使用となるため、伝搬路の減衰も考慮する必要のない屋内光無線では、拡散光源と複数受光の方式でP-MP通信を実現¹⁴⁾しているが、条件が大き

く異なる屋外で実現させるためにはアーキテクチャーとプロトコルの開発が必須となる。

4.2 屋外光無線通信システムの展望

光の領域は、無線通信にとって非常に大きな周波数資源であり、その利用は緒についたばかりであるといえる。今後とも、無線通信における大容量化とセキュリティーへの要求は拡大し続けるものと思われる。とりわけ、オフィスからのデータ漏洩の防護、逼迫する電波の周波数資源の節約、都市部で悪化する電波環境対策、十分な需要が見込まず投資の採算がとれない地域の高速ネットワーク環境の整備(デジタルデバインドの解消)など、無線とファイバー網をスムーズに結合できる能力を秘めた光無線の適用に強い関心ももたれている。

こうした期待に応え利用範囲を広げていくためには、光無線装置の使い勝手や性能を向上させる新しい技術の開発とともに、システムの運用や構成等のアーキテクチャーの検討も望まれる。さらに、ユーザーの安心感を高めるため、回線設計基準の明確化が重要課題である。そのため、光波の大気伝搬データの取得・蓄積と解析による伝搬特性の評価が今後も重要である。

古くて新しい技術である光無線通信は、今後も研究開発の進展によりさまざまなシーンで他の通信方式やネットワーク技術との有機的結合を強め、利用範囲を拡大していくことが期待される。

文 献

- 1) 例えば、伊藤猷頭ほか：“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，22，No.1(1968)15.
- 2) 般川謙司：“レーザー光の大気伝搬”，電子情報通信学会誌，4(1968)503.
- 3) 森田和夫，吉田不二夫：“大気中伝搬における光波の減衰特性”，通研実報，18(1969)1165.
- 4) K. Morita: “Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain,” Rev. Electr. Commun. Labs. Jpn., 19(1971)798-842.
- 5) 日本では、電波法，第一章(総則)，第二条一項.
- 6) E. J. McCartney: *Optics of the Atmosphere* (John Wiley & Sons, New York, 1976).
- 7) J. S. Marshall and W. M. K. Palmer: “The distribution of raindrops with size,” J. Meteorol., 5, No. 6(1948)165.
- 8) 鈴木道也：氷雪電波・光工学(昭晃堂，1987)pp.11-44.
- 9) 屋外光無線通信システム導入ガイドライン(光無線通信システム協議会，2001). http://www.icsa.gr.jp/activity/index_07_03_01.htm
- 10) 松本秀樹，鮫島彰孝，鈴木敏司，成井 勝，服部倫和，宮本祐一：屋外光無線伝搬特性に関する調査研究(光無線通信システム協議会，2003).
- 11) H. Weichel: *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* (SPIE, Bellingham, WA, 1990).
- 12) 有賀 規：空間伝送光学(水曜社，2000)pp.76-80.

- 13) 光無線通信システム推進協議会 (ICSA). <http://www.icsa.gr.jp/>
- 14) 光技術応用システムのフィージビリティ調査報告書 XXII—光ワイヤレス通信技術— ((財)光産業技術振興協会, 2002).
- 15) 若森和彦ほか：“デジタル光 FPU 装置の開発”, 映像情報学会誌, **52** (1998) 1630-1636.
- 16) 深井 貫, 須田 薫：“光空間情報伝送機器の応用システム”, *Optronics*, No. 11 (1992) 79-83.
- 17) 鮫島彰孝：“小糸工業の光空間伝送装置”, *Optronics*, No. 214 (1999) 142-145.
- 18) K. Wakamori, *et al.*: “Regional broadband network by optical wireless system,” *2001 Asia-Pacific Radio Science Conference*, D4-1-02 (2001).
- 19) “2001: A year of challenges and opportunities,” *Broadband Wireless*, **2** (2001).
- 20) 若森和彦ほか：“屋外光無線方式によるブロードバンドネットワークの構築と運用評価”, 情報処理学会第 62 回全国大会, 6S-6 (2001).
- 21) 鈴木敏司：“ブロードバンドと光空間通信”, 広帯域光空間通信シンポジウム 2001 予稿集 (2001). http://www.icsa.gr.jp/images/pdf/011121_03cannon.pdf
- 22) Y. Aburakawa, *et al.*: “Experimental evaluation of 800-nm band optical wireless link for new generation mobile radio access network,” *2002 Int. Topical Meeting on Microwave Photonics*, P3-13 (2002).
- 23) IEC60825-12 “Safety of Free Space Optical Communication Systems (FSOCS),” IEC 76/251/CD (2002).
- 24) 有賀 規：空間伝送光学 (水曜社, 2000) pp.182-187.
(2004 年 4 月 23 日受理)