

Free Space Optics (FSO) 通信の伝送特性

松本 充司[†] 塚本 勝俊^{††} 若森 和彦[†]

全光ネットワークを基盤としたユビキタス環境の実現を目指す次世代ネットワークにとって、光ファイバ網と無線システムの有機的結合は必要不可欠である。

本論文では、自由空間と光ファイバ網の間で光信号を何ら変換すること無く透過的に接続するフル光接続技術を用いた次世代の光無線システムの開発について述べる。初めに、空間光をシングルモードファイバへ安定に結合するために必要な高速高精度追尾の必要性について述べ、それに大きな影響を与える大気ゆらぎの性質について考察する。次に、この追尾技術を用いた次世代型光無線システムの設計例と従来システムでは実現が困難であった 10Gbps 伝送や波長多重伝送等の評価実験の結果について示す。さらに、電波を光ファイバに閉じ込め伝送する Radio on Fiber 技術と本システムを融合させることで、無線信号のままの形態の信号伝送の可能性について示す。

An Experimental Study on Transmission Characteristics for Free Space Optical (FSO) Communication

Mitsuji Matsumoto[†] Katsutoshi Tsukamoto^{††} Kazuhiko Wakamori[†]

One of the ultimate goal in next generation network design is to achieve an ubiquitous environment enabling seamless connectivity with any wireless access systems and optical fiber core networks.

This paper describes a study on the next generation free-space optical (FSO) communication system which will not need any conversion of the transmitted/received light signal to electrical form and achieves all-optical connection. It is necessary to develop a technology for tracking the free-space optical signal and focusing it into a single mode fiber (SMF). We demonstrated stable and reliable transmission at 10Gbps and DWDM signal transmission which is not possible to achieve using conventional FSO systems. The experimental result verified that the next-generation FSO system offers a bit-rate and protocol transparent transmission whose capacity is equivalent to an optical fiber. Furthermore, by applying this technique for Radio on Fiber transmission, we propose an advanced DWDM Radio on FSO (RoFSO) system in which multiple RF signals transmission is possible

1. はじめに

近年、インターネットによる情報流通の増大、特に映像を中心とする高速大容量マルチメディア情報転送の要望が高まり、高速情報基盤ネットワークの構築が期待されている。特に、我が国では複雑多様化するビジネス社会で u-Japan 構想を実現する担い手として光ファイバを中心とする超高速ブロードバンドネットワークの建設が急ピッチで行われている。しかしながら、採算性や投資効率の面で光ファイバネットワークの建設が困難な地域も多く存在する。都市部においても河川や鉄道の横断、光ファイバの引き込みの困難な集合住宅、管路や電柱がなく容易に光ファイバの敷設ができない地域も存在する。こうした地域にブロードバンド環境を構築するために、ワイヤレスシステムの導入が有望視されている。中でも光ファイバとのインタフェース、設置が容易で、高速・大容量情報を瞬時に伝送可能な超高速光無線通信技術 (FSO: Free-Space Optics) が電波資源の有効利用の観点からも有効な手段として認識されている。今後、光ファイバ網と無線システムの有機的結合は、全光ネットワークを基盤としたユビキタス環境の実現を目指す次世代ネットワークにとってますます重要となってくる。

この光無線システムは、電波を用いる無線通信システムと比較すると、他の媒体との干渉が少なく電波法規制の対象外であるため、見通しさえ確保できれば自由に設置し、利用することができる。また、信号伝送に利用できる帯域幅が広いと、容易に高速大容量通信を実現でき、簡便かつ低コストで高速大容量の通信回線を構築する手段として注目され利用が広まってきている[1] [2][3]。

特に、光信号のままファイバ-空間-ファイバへと伝送する新しいFSO技術は、さまざまな応用展開が期待されている。とりわけ、電波を光ファイバに閉じ込めて伝送するRoF (Radio on Fiber) 技術と光無線との融合は、光ファイバ上にある各種信号をその形式にとらわれず伝送することを可能とし、混在する異種ネットワークの解決策として期待され、光ファイバ通信と無線通信を融合する統合型光無線 (RoFSO: Radio on Free-Space Optics) システムとしての研究開発が進められている。

RoFSOシステムにおいては光ファイバと異なり、大気変動の影響を直接受け、受信光強度や到来角が変動するため、伝搬光を安定的に光ファイバに導光することや、その信号品質を確保することは非常に困難であった。特に、品質要求が厳しい無線信号に対しては、伝搬時の品質変動に関する十分な検討が必要である。そのため、ワイヤレスサービス信号の伝送において、さまざまな気象条件の下で大気伝搬時の特性を明らかにし、RoFSO システムによる無線信号伝送の可能性の確認および定量的評価手法を確立する必要があった。

現在、広く使われている $0.8 \mu\text{m}$ 帯の波長を使った光無線システムでは、使用されている光

[†] 早稲田大学国際情報通信研究センター, 東京都新宿区

Global Information Telecommunication Institute, Waseda University, 3-9-10, Nishiwaseda Shinjuku Tokyo

^{††} 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻, 大阪府吹田市

Graduate school of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-cho Suita-shi, 367-0035 Japan

学デバイスの特性上、通信速度は2Gbps程度までが実用上の限界であり、さらには目に対する安全性の面から送信出力も制約されている。このような制約を打破する次世代の光無線システムとして、光ファイバ網と同じ1.55 μm 帯の波長のレーザ光を用いて自由空間を伝送し、直接光ファイバに結合する方式についての研究が1990年代の終わりから2000年代初頭にかけて活発に行われるようになった。2000年には空間光との結合が容易におこなえるマルチモードファイバ(MMF)を受信系に用いて、2.5Gbpsで変調された光信号を波長多重(DWDM)技術によって16波多重化して通信容量40Gbpsの伝送系を実現した実験が報告されている[4]。しかし、MMFは10Gbpsを超える伝送には適しておらず、光無線通信の受信機にMMFを用いるためには、特別に設計した高速・広帯域受光デバイスが必要で、システムの性能を向上させるために不可欠な光ファイバ増幅器を受信機側に用いることができない。なぜなら現在開発されている通信用の光ファイバ増幅器は、1.55 μm 帯で良好な性能を発揮し、全てシングルモードファイバ(SMF)による接続を前提としているからである。これにより、1.55 μm 帯のレーザ光をSMFに直接結合する技術(全光接続)が、被伝送信号に変更を加えずに、ファイバ網とでシームレスな接続ができる。しかしながら、空間を伝搬してきた光ビームを大きな開口のレンズで受信し、光信号を10 μm の開口のSMFに結合させることは非常に困難である。屋外においては、大気ゆらぎによる伝送路上での擾乱が避けられず、装置設置面の振動や熱ひずみも発生する。この結果生じる光ビームの到来方向の変動は、SMFに集光する際に大きな強度変動を生じさせ、通信の安定性を確保することが困難となる。このため、SMFを用いた光無線伝送の報告では、安定な設置環境を工夫したり、大気揺らぎの少ない夜間での伝送実験報告が多かった[5]。

大気揺らぎの影響を補償する手段としては、補償光学(Adaptive Optics)が有効と考えられ、1990年中ごろから地上と衛星との超高速光通信に補償光学を用いることの有効性を示唆する提案が行われた[6]。最近では、補償光学を実装しSMFへの直接受信を可能とした光無線装置による実験報告が行なわれた[7]。ただし、これは航空機と地上との伝送で、大気密度の低い環境での動作実証に関するものであり、地上の大気揺らぎの強い環境下における補償光学の有効性についてはまだ明確ではない[8]。我々は、安定した全光接続を実現するため、到来角変動の影響を補償する高速・高精度の追尾機構を実装した光無線システムを開発し、建物の熱変形や振動、大気揺らぎのある環境での動作評価実験を重ねてきた。

本論文は、大気揺らぎの性質と自由空間とSMFを透過的に接続しかつ安定に維持するための追尾技術および本追尾技術を実装した次世代光無線装置を使ったフィールド実験を紹介する。そこで得られたフル光接続の有効性の事例として、一波長では世界初の10Gbps伝送やDWDM伝送等の結果を示し、安定した全光接続実現の可能性を示した。さらにこの技術を、電波を光ファイバに閉じ込め伝送するRoF(Radio on Fiber)技術と融合し応用展開することで、光ファイバ上にある各種信号をその形式にとらわれず、光信号のままファイバから空間へ、さらに再びファイバへと伝送する統合型光無線(RoFSO:Radio on Free-Space Optics)システムについての検討事例を示す。

2. 光ファイバと自由空間のフル光接続

2.1 全光接続による次世代空間光通信の概念

始めに我々が実現しようとする光無線システムの概要を図1に示す。

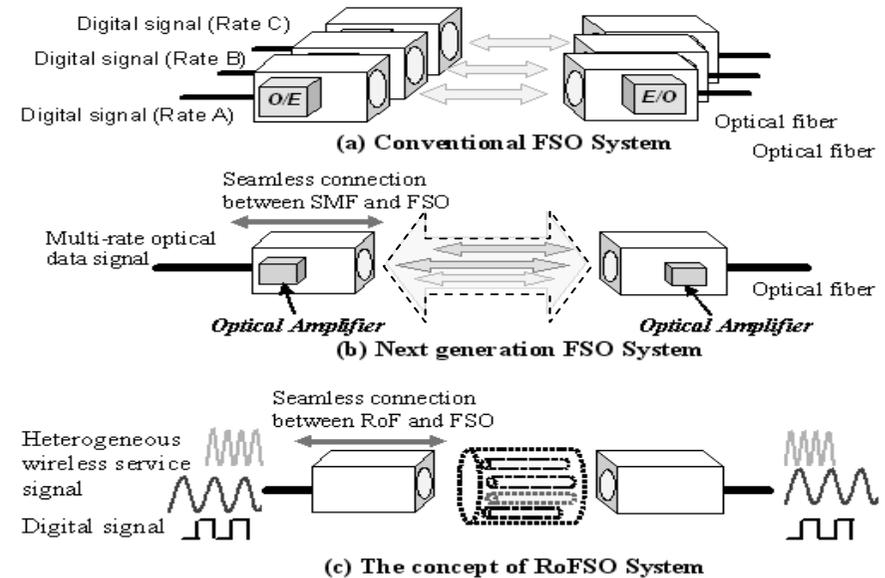


図1 光無線方式：従来方式(上)と全光接続(中)、RoFSO光無線(下)

図1(a)は、従来型の光無線システムであり、光ファイバと異なる0.8 μm 帯の伝送媒体とするが、光ファイバ側と空間側との間に光・電気変換を含む構成となっている。この場合、光・電気変換に伴う通信速度の制約があり、異なる通信サービス毎に個別の変復調・符号化等を行うインタフェースを用意する必要がある。

図1(b)は、我々が実現しようとする次世代型光無線システムである。光ファイバ網と同じ波長1.55 μm 帯を利用することで、ファイバ増幅器を利用して空間伝送で生じた損失を補償することができる。電気・光変換を伴わない本システムは、1本の光ファイバと同等の能力を無線空間に拡張するものであり、伝送されるサービスの通信速度や信号形態の制約から解放される。例えば、波長多重伝送技術を使い各種のサービスを独立かつ同時に提供可能となる。

図 1(c)は、無線信号をそのままの形でファイバ中に伝送する RoF 技術と融合させることで、無線サービスへの適用が可能な RoFSO システムの概要図である。

一般に光ファイバ網で用いられている波長 $1.5 \mu\text{m}$ あるいは $1.3 \mu\text{m}$ 帯の SMF は、その中心部に屈折率の高い直径約 $9 \mu\text{m}$ のコアがある。この中を、基本モードで伝搬する光信号の振幅分布は Gauss 関数で近似でき、その直径は約 $10.5 \mu\text{m}$ になる。光無線システムの光学系によってファイバ端面に結像した信号光の電磁界成分の中で、このモード分布に整合する成分のみが SMF 中を伝搬できる。このためには、以下の 3 つの条件を満たす必要がある。

- (1)レーザ光の入射方向が SMF の軸と一致する。
- (2)結像したスポットの中心が SMF のコアの中心に一致する。
- (3)結像したスポットの直径がモードフィールド径に一致する。

一方、一樣強度の空間光を円形開口の光学系で結像した時のスポットの分布は Airy 分布となり、Gauss 分布とは異なるため結合効率は 100%にはできず、上記の最良の条件でも 0.9dB の結合損失が発生する。さらに(2) が満たされず、スポット中心がコア中心に対して $1 \mu\text{m}$ ずれたとすると、さらに 0.9dB の損失が発生する。一方、SMF からレーザ光をレンズ等で平行光にして送信した場合、その分布は光学系の開口径で制限されたガウスビームとなり、これがある距離だけ伝送した場合の自由空間伝送損失は解析的に計算できる[9]。

2.2 空間光の大気伝搬特性

大気中を伝搬路として通信する光無線システムには、さまざまな伝送損失の要因が存在する。まず問題になるのは、伝搬路上に生じる霧や降雨等による減衰である。これは、減衰の発生確率と利用環境におけるシステムに対する要求から適当な設計が可能であることが示されている [10]。さらに、レーザ光が大気中を伝搬する際には、大気の局所的な屈折率変化によって位相ゆらぎを受け、これが受信レーザ光の強度変化(シンチレーション)や到来角変動となって現れる。安定した全光接続を実現するためには、これらの結果として生じる受信信号光の変動を抑圧することが重要となる。なお、ファイバ網との接続を考慮する場合、水蒸気による吸収帯が $1.5 \mu\text{m}$ 帯の波長の短い側(S バンド)にあることに留意する必要がある。

大気温度の時間変動は数 10Hz の比較的早い変動成分を持っており、この温度変化に伴う屈折率の変動は 3×10^{-4} 程度の小さなものであるが、屈折率揺らぎの中を透過してきたレーザ光には数波長程度の波面(位相)揺らぎが生じる場合があり、ビーム遠方界では大きなシンチレーションが発生する。このランダムな屈折率ゆらぎの分散を決めるパラメータを屈折率構造関数 C_n^2 と呼び、一般に温度変化の大きな夏季の日照時の最大が $C_n^2 = 1 \times 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$

程度、夜間のゆらぎの小さい場合が $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ 以下と言われている。この値をもとに、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、直径 4cm のガウスビームを距離 1km にわたって伝送したときのビーム軸

上でのシンチレーションインデックス (σ_I^2) の最大値と最小値を、大気ゆらぎが小さいとした摂動関数による近似理論[11]で計算すると、各々 $\sigma_I^2_{\text{max}} = 0.52$ および $\sigma_I^2_{\text{min}} = 0.007$ となる。ここでシンチレーションインデックスとは、受信光の強度を I 、時間平均を $\langle I \rangle$ とすると、以下の式で定義される、規格化された変動の分散を示す量である。

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (1)$$

3. フル光接続光無線システムと精追尾機構

3.1 光アンテナと精追尾機構の評価

図2に我々が実験で使用した全光接続光無線システムの精追尾システムによりレーザ光の到来方向変動を補償した例を説明する[12]。

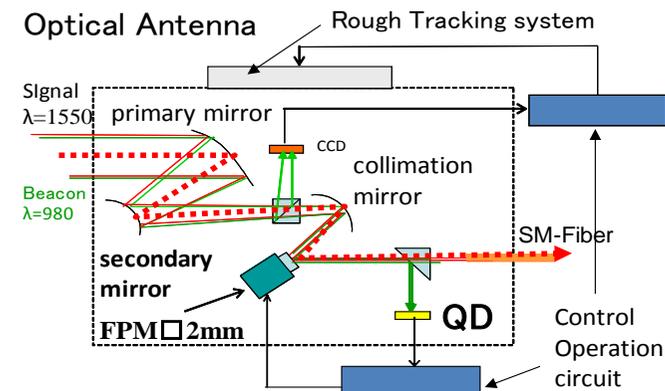


図 3. 10Gbps 伝送実験システム

光アンテナ部及び制御部は建物の屋上に設置され、室内に置いた各装置との間は1本の SMF で接続される。送信光と受信光は光サーキュレータで分離される。ビット誤り率試験装置 (BERT)からの試験信号 ($2^{31}-1$ の系列の PN 符号)は、図の左下の 10Gbps 送信機で 1552nm の光信号に変換され、高出力光ファイバ増幅器で増幅された後、屋上の光アンテナに送られる。一方、光アンテナで受信した光信号は、図の上部の低雑音光ファイバ増幅器で増幅し、半値幅 0.4nm の光フィルタで雑音を除去した後、InGaAs 受光素子で電気信号に変換され、クロック・データ再生回路で受信ビット列となる。この受信ビット列と送信符号との比較によりビット誤りを計数する。

光アンテナは、3枚の軸外し非球面鏡で構成され、信号光の送受信とビーコン光の受信を有効径4cmの主開口を通して行う。受信した信号光は、光アンテナで光束径を1/20に縮小した後、精追尾ミラー駆動機構で到来角の変動を除去し、ファイバカップラでSMFに伝送される。受信ビーコン光は、背景光や送信ビーコン光の回り込み等の影響を除去する光フィルタを通してファイバカップラと一体化した追尾センサで追尾誤差の検出に用いられる。検出器である4分割受光素子(QD: Quadrant Detector)には直径1mmのSi-APDを用い、その最小受光感度は-56.7dBmである。この追尾センサの視野は $\pm 125 \mu\text{rad}$ で、追尾コントローラは、この誤差信号によりミラー駆動機構を駆動する。ビーコン光の送信は、専用の直径5mm開口の4つのコリメータから行われ、その広がり角は全角で0.5度程度としている。

ビーコン波長は、対向する装置で異なる波長(980nmと970nm)を用い、受信側ではこの波長に合わせた光フィルタを用いてビーコン光を検出する。光アンテナで受光したビーコン光の一部はCCDカメラに供給され、初期捕捉と粗追尾のために用いられる。CCDカメラの視野は水平方向(Az)が ± 0.72 度、垂直方向(EI)が ± 0.54 度である。捕捉制御は、CCD上のスポットの輝度重心を計算し、ビーコンの到来方向が光アンテナ軸の中心に近くなるように2軸ジンバルで光アンテナ全体の方向を制御する。

光アンテナの主開口からファイバ接続端までの透過損失は-4.9dBであった。この値は空間光とSMFとの理論結合効率(0.9dB)よりも大きい。この損失には光アンテナの波面精度あるいは収差による損失が-1.7dB、ビームスプリッタによる分岐損失が-0.2dB含まれており、この他にファイバカップラの結像レンズの収差、モードフィールド径と結像スポット径との不整合による損失が-2dB程度存在すると考えられる。しかし、ゆらぎの影響を減じるためSMFへの集光をデフォーカスで行う従来報告されていたファイバ受光における損失[13]に比べ大きく改善されている。

図4に大気ゆらぎに伴う到来角変動の抑圧効果を計測した例を示す。この測定では、追尾系を動作させた場合と停止させた場合における追尾センサ出力を連続して取得している。

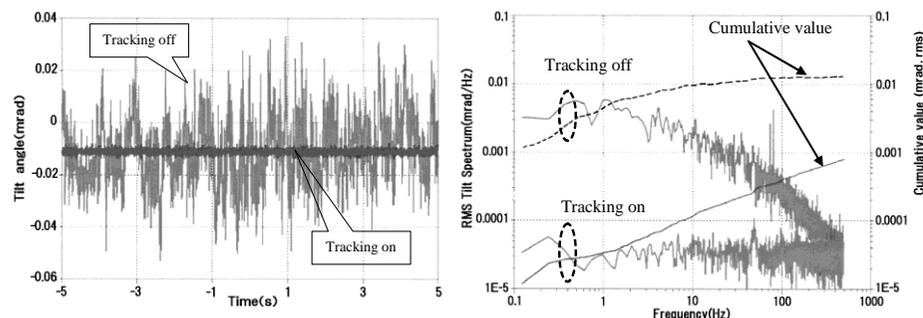


図4 大気ゆらぎに伴う到来角変動に対する追尾系の抑圧効果

図は水平(Az軸)方向の計測結果である。図(a)は、追尾誤差信号の時間的変動を記録したもので、追尾を行わない場合 $80 \mu\text{rad(pp)}$ の誤差が発生しているが、追尾を行なうとその誤差は小さくなっている。図(b)は、このデータをフーリエ変換により周波数解析した結果であり、スペクトル密度とそのrms積算値を示している。10Hz程度までの低周波数領域ではほぼ理論どおり1/100の抑圧能力が得られ、100Hzまでの積算では、 $12 \mu\text{rad(rms)}$ の到来角変動が $0.4 \mu\text{rad(rms)}$ 程度までと1/30の抑圧結果が得られている。

3.2 フル光接続光無線装置の評価

この装置を1km離れた早稲田大学の2つのキャンパス(西早稲田と大久保)に設置し、フィールド評価実験を2005年9月から2006年3月にかけて実施した[14][15]。本装置の特性を評価するため、従来の光無線装置では実現困難であった、10Gbpsの単一波長光信号伝送実験の結果を図5に示す。

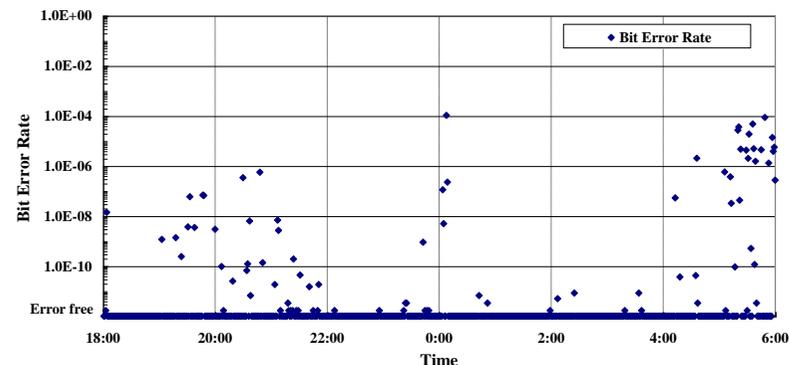


図5. 距離1kmの単一波長10Gbps伝送実験の誤り率評価結果

実験は図3に示された構成で行われ、1分間の積算により計測されたビット誤り率(BER)が示されている。この実験で使用した光受信機の最少受信感度は-37dBmである。12時間にわたってエラーの少ない安定した伝送ができていた[12]。なお、図中で発生しているエラーは数ミリ秒以下の受信信号強度の低下により生じたバーストエラーであり、インターネットの基盤プロトコルであるTCP/IP上にはこの影響はほとんど現れない。これを実際のアプリケーションを想定した実験で示す[14]。実験は、波長多重実験と合わせ図3の10Gbps計測装置に代えて、Gbit-Ethernet回線と2.5Gbpsの試験信号を収容、さらに無変調の2波長の光を加え4波多重とした。各光信号はITUグリッド波長に100GHz間隔で設定され、DWDM合分波器で多重・分離が行われる。Ethernet回線は、メディア・コンバータで光・電気信号変換が行われ、スイッチを介し

て接続された PC 間で大きな容量のファイル転送を行い、転送時間からスループットを計算している。なお、スイッチと PC 間は 100M-Ethernet での接続となっている。図 6 はスループットと 1 分間の積算で計測された 2.5Gbps 伝送時の BER を 24 時間連続計測した結果である。メディア・コンバータの受光モジュールと BER 計測の光受信機の最小受信感度はほぼ同じ -34dBm である。BER 計測では時々エラーが生じているが、スループットはワイヤ接続時と同等の性能が変わらず得られている。これは、生じたエラーの大部分は短時間のバーストエラーであるため、スループットにはほとんど影響していないためである。また、BER 計測用の信号光と Ethernet 回線の信号光および他の 2 信号光の間での干渉は何ら観測されず、安定した WDM 伝送が実現できている。

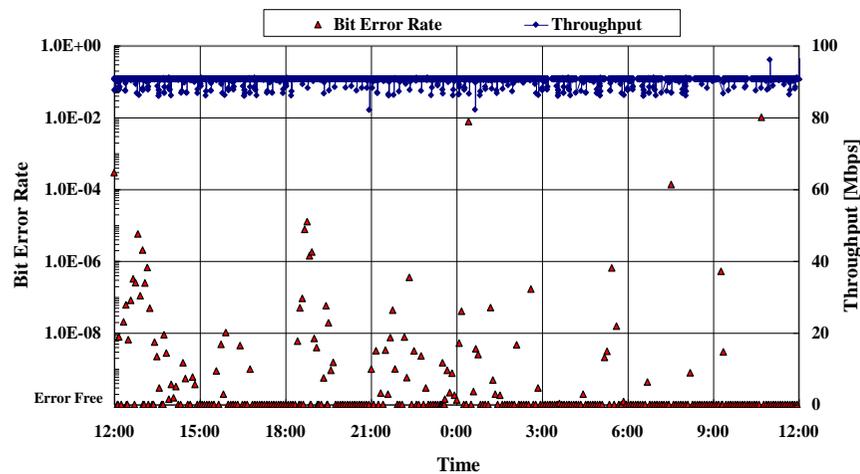


図 6 WDM 伝送時のスループットと BER 特性

上記結果が示すように、大気ゆらぎの影響を補償するための精追尾機構を用いたフル光接続光無線装置は、従来の光無線装置では実現できなかった 10Gbps 伝送や WDM 伝送を安定的に実現できることを示した。しかし、強いゆらぎが生じている環境下では、本装置で想定した以上のフェージングが生じている状況があり、その場合、受信信号光強度の低下によるバーストエラーの発生増加が計測結果に現れている[15]。今後このような強いゆらぎの環境下でも安定な信号伝送を実現するためには、追尾サーボ系について、より一層の性能向上が必要となる。また、大気揺らぎと適用距離に関する回線設計手法の検討も重要となる。

4. RoFSO システムの検討

フル光接続と RoF 技術を結びつけるシステムの検討について示す。フル光接続光無線システムは、SMF と透過的な物理レイヤを提供するものであり、理想的にはそこに供される信号に依存しないはずである。そこで、RoF で提供される電波形式のまま光に変換された信号を本システムによりそのまま伝送する RoFSO システム[16]の可能性を評価する実験について示す。使用した追尾方式および実験構成は 3 章で示したものと基本的に同じである。

ここでは無線サービスの一例として、3G 携帯電話規格の W-CDMA テスト信号[17]を使った伝送実験の結果を示す。図 7 に実験構成図を示す。

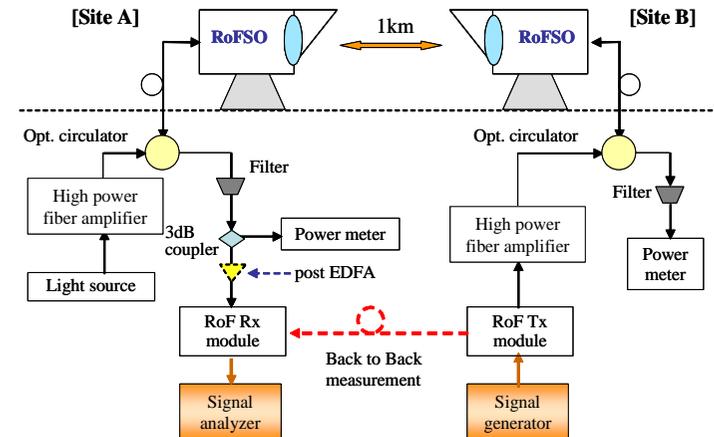


図 7 RF (3GPP テスト信号) 伝送のフィールド実験概要図

信号発生器から -20dBm 出力でテスト信号を RoF 送信器に入力し光信号に変換する。伝搬後に受信された光信号は、3dB カプラで 2 分岐され、片方は受信信号光強度をモニタ、他方は RoF 受信器に入力されて電気信号に復調される。これを信号評価装置で解析する。受信信号光を増幅する場合は、光ファイバンプをカプラと RoF 受信器の間に挿入する。逆方向には、参照光を送信している。使用した RoF 装置の特性を直接接続して計測した結果、いくつかの W-CDMA テスト信号規格の中で最も余裕度が少なく、ダイナミックレンジの観点から特に重要と考える ACLR (Adjacent Channel Leakage power Ratio: 隣接チャンネル漏洩電力比) で計測評価を行う。ACLR 特性は、搬送波パワーと搬送波中心周波数から $\pm 5\text{MHz}$ と $\pm 10\text{MHz}$ の離長周波数におけるパワーとの比で表される。測定結果を図 8 に示す。

図(a)は伝送後の ACLR 信号スペクトルであり、各周波数において所要規格値(45dB@±5MHz, 50dB@±10MHz)を満足している。図(b)は受信信号光強度と 5MHz 離長での ACLR の関係を計測した結果である。直接接続(Back to Back)の場合、入力信号光が大きい時の ACLR の劣化は過大入力による RoF 受信器の歪増加によるものである。空間伝送後は、受光強度変動による振幅ゆらぎの影響と思われるピークレベルの飽和が見られるが、直接接続とほとんど同じ特性が得られている。さらに、光増幅による光信号強度低下を補償することで、信号品質を満たす受光範囲が-15dBm から-25dBm に広がっている。10MHz 離長においても同様の結果が得られている。光アンプによる光伝送部の信号強度低下および変動の補償により、信号品質を満たす受光範囲の拡大、すなわち耐候性の改善や適用距離の延長など特性の改善が可能となる。

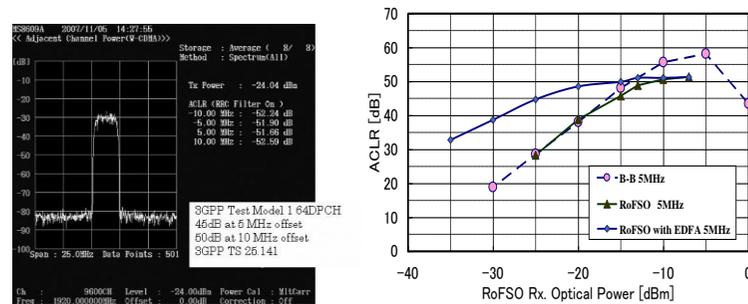


図8 ACLR 信号伝送特性

これらの結果は、フル光接続光無線システムが、デジタル信号伝送のみならず RF 信号伝送を含むあらゆる信号をファイバと同等に扱い、無線環境と有線環境とをサービスレベルでも融合させる可能性のある技術であることを示し、ヘテロロニアス・ネットワークのソリューションとしても期待[18] [19]できることを示している。

5. むすび

自由空間と光ファイバ網との間で光信号を何ら変換すること無く透過的に接続する次世代の光無線システム技術について述べた。特に、空間光を SMF へ安定して導光するため重要となる大気ゆらぎの特性とそれによる影響を抑圧するための高速高精度追尾手法について説明し、それを搭載した光無線装置を開発し、長期フィールド実験によって評価した。その結果、従来実用化されている光無線システムでは実現できなかった DWDM 通信や 10Gbps 通信が実現可能であることを示し、基礎的実験レベルに留まっていた空間と SMF を直接接続する、光・電気変換を伴わない光無線システムを

安定的に動作させることができることを示した。さらに、本システムを RF 信号伝送に用い、各種無線サービス伝送へ適用する可能性について提案した。

実証実験を通じて得られた結果は、フル光接続による次世代光無線システムがビットレートや伝送プロトコルに依存しないファイバと等価な伝送路の提供を可能とし、さらに、種々の無線サービスの提供も可能とする、統合型光無線(RoFSO: Radio on FSO)システムの実現の可能性を示している。そして、次世代ネットワークに要求される、無線環境と有線環境をサービスレベルで有機的融合を実現するソリューションとしての可能性を示した。

今後、強いゆらぎが生じる環境下における安定性向上のための追尾サーボ特性の改善や、追尾制御の安定性や耐環境マージンを高めることで、より信頼性の高いシステムに向けた検討を行う計画である。また、本システムを実際に運用する場合の適用範囲に関する検討を進める必要がある。

謝辞

本研究は(独)情報通信研究機構の委託研究として実施されたものであり、関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1) (財) 光産業技術振興協会, “光技術応用システムのフィージビリティ調査報告書 X X II - 光ワイヤレス通信技術”, pp. 79-111, 2002.
- 2) ITU-R Document 9B/TEMP/107, Annex 7 to WP9B/167 - Preliminary draft new Report - “Fixed service applications using frequency bands above 3 000 GHz,” June 2006.
- 3) H. Willebrand and B. Ghuman, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Sams Publishing, 2002.
- 4) G. Nykolak, P. F. Szajowski, A. Cashion, H. M. Presby, G. E. Tourgee and J. J. Auburn, “A 40 Gb/s DWDM Free Space Optical Transmission Links Over 4.4km,” *Free-Space Laser Communication Technologies XII*, Proc. SPIE Vol. 3932, pp. 16-20, Jan. 2000.
- 5) D. Y. Song, Y. S. Huh, J. W. Cho, J. H. Lim, D. W. Lee, J. S. Lee and Y. Chung, “4 x 10 Gb/s terrestrial optical free space transmission over 1.2 km using an EDFA preamplifier with 100GHz channel spacing,” *Optics Express* vol. 7, no. 8, pp. 280-284, Dec. 2000.
- 6) Y. Arimoto, Y. Hayano and W. Klaus, “High speed optical feeder-link system using adaptive optics,” *Proc. SPIE*, vol. 2990-15, pp. 142-151, Feb. 1997.
- 7) Raymond M. Sova, Joseph E. Sluz, David W. Young, Juan C. Juarez, Anurag Dwivedi, Nickolas M. Demidovich, III, J. E. Graves, Malcolm Northcott, Jeff Douglass, John Phillips, Don Driver, Andy McClarin, Dave Abelson, “80Gb/s free-space optical communication demonstration between an

- aerostat and a ground station,” Free-Space Laser Communications VI, Proc. SPIE Vol. 6304, pp. 630414, Sep. 2006.
- 8) G. Stephen Mecherle, “Mitigation of Atmospheric Effects on Terrestrial Free Space Optical Communication Systems,” Free-Space Laser Communication Technologies XVI, Proc. SPIE Vol. 5338, pp. 102-118, Jan. 2004.
- 9) Bernard J. Klein and John J. Degnan, “Optical Antenna Gain. 1: Transmitting Antennas,” Applied Optics, Vol. 13, No. 9, pp. 2134-2140 Sep. 1974.
- 10) 光無線通信システム推進協議会, “屋外光無線伝播特性に関する調査研究,” June 2003.
- 11) Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, “Laser Beam Propagation through Random Media,” Second Edition, SPIE press, 2005.
- 12) 有本好徳, “シングルモードファイバ結合による光空間通信機の設計と性能評価,” 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J91-C, No. 1, pp.38-49, January 2008.
- 13) Y. Aburakawa and T. Otsu, “Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission,” Proc. MWP2003, pp. 135-138, 2003.
- 14) K. Kazaura, K. Ohmae, T. Suzuki, M. Matsumoto, E. Mutafungawa, T. Murakami, K. Takahashi, H. Matsumoto, K. Wakamori, Y. Arimoto :”Performance Evaluation of Next Generation Free-Space Optical Communication System,” IEICE Trans. Electron., Vol. E90_C, No. 2, pp.381-388, Feb. 2007.
- 15) 若森和彦, Kamugisha KAZAURA, 鈴木敏司, 大前和憲, 松本充司, 高橋浩一, 松本秀樹, 村上匡亮, 有本好徳 : “次世代光無線システムの研究開発—ファイバ網とのフル光接続に向けての実験的検討—”, 信学論文誌 C, Vol. J91_C, No. 1, pp. 28-37, Jan. 2008.
- 16) K. Tsukamoto, S. Komaki, M. Matsumoto : “Development Project of Radio on Free Space Optics,” Proc. of SPIE for Photonic West 2008 Free-Space Laser Communication Technologies XX conference, Vol. 6776, pp. 677606_1-8, Sep. 2007.
- 17) 3GPP TS 25.141, 3rd Generation Partnership Project. <http://www.3gpp.org/>, 2002.
- 18) S. Komaki : “Microwave Technologies for Software Radio Networks,” Proceedings of APMC2003, Vol.3, No.FC7-1, pp.1780-1785, Nov. 2003.
- 19) M. Matsumoto, K. Kazaura, K. Wakamori, T. Higashino, K. Tsukamoto, and S. Komaki: Experimental Investigation on a Radio-on-free-space Optical System Suitable for Provision of Ubiquitous Wireless Services, The 27th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2010), Vol. 6, No. 4, pp.400-405, Xi'an, China, 22-26 March 2010