限りなく実用に近づいた空間光伝送技術

井上 憲人

光ファイバ通信では、すでにチャネルあたり100Gbps伝送が長距離／メトロで実用段階に入っており、アクセス系では10Gbpsが利用可能になっている。しかし、光ファイバを使用した有線通信だけですべての高速大容量伝送需要に応えることはできない。有線技術で対応できない空隙を埋める技術の一つが、光無線技術だ。

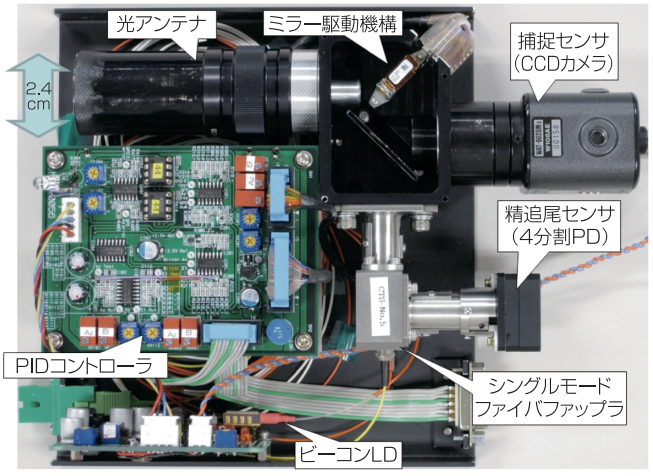
情報通信機構（NICT）が開発している空間光伝送（光無線）技術は、衛星通信の技術をベースにしている。衛星通信の伝送距離は、静止衛星間では7万～8万km、衛星と地上との間で4万kmと言われる。衛星通信で使用していた技術、「相手の位置を識別してその方向に指向性の鋭いレーザビームを正確に当てる捕捉追尾技術」を活用して、地上での光空間通信をNICTが始めたのが2002年頃。それから5年ほどの間に、10Gbps、320Gbps、1.2Tbpsと大容量伝送の成果が相次いで発表された。これに続いて、2010年5月には、基幹系の光ファイバ伝送で求められる稼働率99.999%がイタリアで達成された。

10Gbps伝送では、2006年に早稲田大学構内のビル屋上に光無線実験装置を設置し、1kmの区間で数時間にわたり、ビット誤り率（BER）10^{-9}の高品質伝送を確認した、と報告されている。宇宙通信ネットワークグループ主任研究員、有本好徳氏によると、10Gbps伝送はチャンピオンデータ。これを超える実験例はまだ現れていないと言う。

その後の開発は、早稲田大学の実験で使用した装置の小型化、低コスト化、実用で使いやすくするために高安定化することがターゲットになった。新開発の装置を使用して、イタリアのサンタナ大学、早稲田大学とNICTが共同で行った伝送実験が、2008年の320Gbps（8×40Gbps）双方向WDM伝送。8台のCW DFBレーザを40Gbpsで変調し、EDFAを使用して2×212mの自由空間光通信（FSO）リンクを構成した[1]。このシステムを1.28Tbps（32×40Gbps）にアップグレードした実験が続けて行われている[2]。さらに、その翌年（2009年）9月には、100Gbpsイーサネット（GbE）プロトタイプ装置を接続して、10日間に渡りNICT内で33m伝送実験を行った。伝送距離の長いリンクでは、2010年1月に調布と小金井間、約8kmでGbE伝送実験を実施。

高信頼リンクの実験では、2010年5月にサンタナ大学内の320mの区間を利用して、1.25Gbpsの伝送容量で稼働率99.999%を達成した。この実験成果の報告は、2011年のOFC/NFOECで発表が予定されている。回線稼働率99.999%は基幹回線に求められる水準（99.98%）を上回る成果。光無線でキャリアクラスの信頼性が実現できることがこの実験で実証されたことになる。有本氏によると、この99.999%は、最悪に近い条件で得られた成果だという。

「前回の実験では、雨一つ降らない天候だったが、今回は極めて悪い条件に恵まれ、その中で99.999%が達成できた。条件としては最悪に近い。実験認可が得られた最長距離320mの途中にあるビルに煙突があり、熱気でかなり強い大気の揺らぎがあった。天候は、若干の小雨を含む5月のイタリアの環境。朝方に薄い霧が出ていた。最終日は通常の雨のデータもとれた。結論として、稼働率の劣化はなかった。320m



光アンテナ：直径 10～48mm
ビーコン光波長：982/972nm
精追尾応答速度：0.2ms
精追尾帯域：5kHz以上
精追尾センサ視野：100μrad.
精追尾ミラー駆動範囲：1.2°
信号光の内部損失：−2.2dB
ビーコン光感度：−46dBm（ダイナミックレンジ、17dB）
消費電力：12V±20%、1W（CCDカメラを除く）
重量：1.2kg（筐体カバーを含む）。

図1　NICTで開発した光無線伝送装置。SMFに直結して使用する（WDM、アナログ伝送等に対応）。

のリンク長、99.999%の稼働率で1Gbps伝送が達成された。」

この実験では、10GbE伝送も行われたが、BER 10^{-5}で稼働率は99.9992%。10Gは、リンクマージンが小さいため、99.999%には達しなかったという。

これらの実験成果を生み出すキーテクノロジーは何か。NICTの開発目標である小型化、低コスト化は、どこまで実現されているか。それを見ておこう。

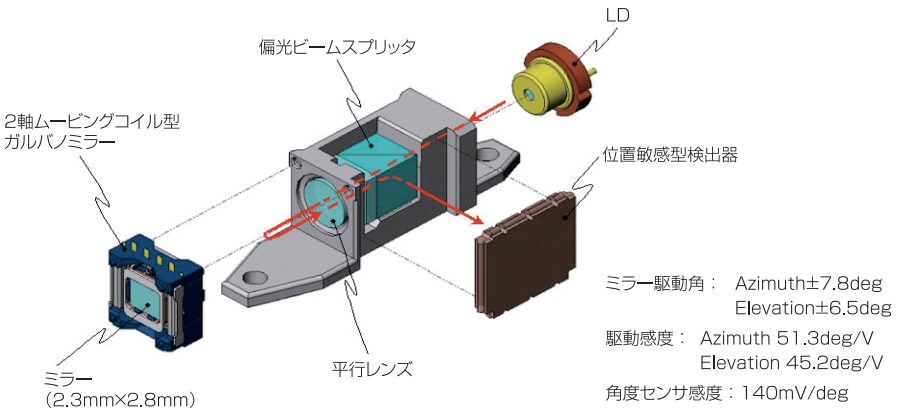


図2　超小型ミラー駆動機構。ムービングコイル型ガルバノミラーによる2軸一体構造。

キーコンポーネント

NICTが開発したコンパクトな光空間通信装置の主要構成部分は、光ユニットと制御ユニットで構成されている(**図1**)。これらのうち主要部分は、光アンテナ、精追尾ミラー駆動機構、シングルモードファイバカプラ。

装置の役割は、イーサネットスイッチやWDM装置などの光伝送装置と接続して、光信号の送受信をするだけで、光-電気(O/E)、電気-光(E/O)変換はしない。レーザ光を対向の装置に送信し、受け側はその光を「捕捉追尾」するだけでよいが、大気に揺らぎがあり、装置の設置環境に振動があり、光路を鳥や虫、人、雨粒などが遮ることがあることを想定すると、捕捉追尾機構には高速、高精度が求められる。基本的な動作原理は次のようになっている。

送受信するのは光信号(1.55μm帯)にビーコン光(0.98μm帯)を多重したレーザ光。望遠鏡が光アンテナとして機能し、入力レーザビームを集め、それをコリメートして平行ビームにする。ビームの揺らぎや到来角変動をミラーの駆動機構で補償して常に安定な平行ビームにしている。ビームは、シングルモードファイバ(SMF)のモードフィールドに完全に一致するようにスポットを安定化する必要がある。有本氏によると、この機構そのものは、カメラの「手振れ補償機構」と同じものだが、カメラの機構よりも100倍の精度が要求される。入射角にすると1000分の1度(1/ 1000°)のビーム制御精度が必要。この役割を担うのが、ガルバノミラー駆動機構だ。

ここでは、国内の光学機器メーカーが開発したムービングコイル型ガルバノミラーアクチュエータを採用している。コイルに電流を流し、永久磁石との間で発生する力を利用してミラー角度を制御する(**図2**)。技術的には光ディスクのピックアップと同じだが、これは2軸一体で角度を上下、左右に振る。光ディスクは、これとは駆動の方向が違い、半径方向と焦点方向に駆動する。

「これは市販品で、キーコンポーネントの一つ。小さくて、高精度、高速にビームをコントロールできるものでなければならない。代替品は極めて少なく、現状では海外にMEMSミラーを使用したプロジェクタ用の技術が一つあるだけだが、日本製の方がパフォーマンスはよい。」

このような補償機構は、誤差情報に基づいて動作する。その誤差情報を提供するのが、もう一つのキーコンポーネント、センサを組込んだファイバカプラだ(**図3**)。SMFへの入射ビームは、入射角、入射位置、スポットサイズ、これら三つが最適条件を満たしていなければならない。スポットサイズの違い、光の位置のズレを検知するメカニズムについて有本氏は次のように説明している。

「入射光は、1550nmの信号光に980nmビーコン光が多重されたレーザ光。誤差信号の検出は、レンズの色収差を利用している。レンズに色収差があって、焦点の大きさが信号光1550nmとビーコン光980nmとでは違う。真ん中に光が当たっても光が漏れるような条件を作り、透明なガラスのフェルールを通

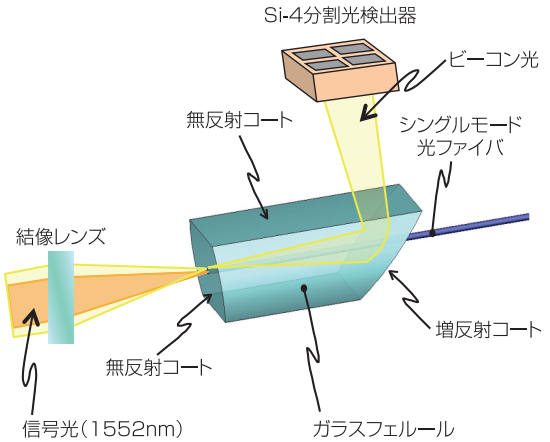


図3　センサを一体化したファイバカプラ。センサは、2mm角 Si-PD(QPD)。

して後ろ側に置いたセンサで検出できるようにしている。」

ビーコン光は、斜め45°に加工したフェルールのバックサイドで反射されて2mm角のSi-4分割光検出器（QPD）に入る。ファイバの基本モードに結合しなかったビーコン光の位置をこのQPDで検出する。この誤差情報を基にアナログPID（Proportional-Integral-Derivartive）サーボコントローラがミラーを駆動してSMFへの到来角エラーを最小化する。現在の補償機構はインテリジェント化されており、実験室で見た限りでは、光路を人が横切ったり、装置に触れて接続が外れたりしても、瞬時に復帰するレベルに来ている。

「以前のバージョンは、接続が外れると初期値に戻り、サーチモードに入ったが、最新の機構はインテリジェントだ。人間が記憶するのと同じように、前の正常動作ポイントを常にアップデートしながら1秒程度の時定数で実質的に記憶している。直近のポイントは、接続が外れる前のため、それを見ないようにして、その一つ前をリファレンスとして瞬時に復帰するようになっている。」

これら二つがキーコンポーネント。上に見た、キャリアクラスの稼働率99.999％は、これらのコンポーネントをベースにした補償機構に負っている。

開発コンセプトとターゲット市場

開発コンセプトは、技術移転、商品化を意識して、コンパクト、低コスト、低消費電力。NICTは、この三つを軸に開発を進めてきた。

装置の消費電力は1W。伝送容量が1Gbpsでも、1Tbpsでも消費電力は変わらない。この装置では、O/E、E/O変換、信号の変復調はなく、単に光を結合して送受信しているだけであるため、消費電力は伝送レートによらず一定。とは言え、低消費電力化は簡単ではなかった、と有本氏は言う。

一例を挙げれば、ビーコン光はmini DIL型アンクールド160mW 980nm励起レーザの電流制御によって、二桁の出力可変に対応している。

「ビーコンに関してはモード安定、シングルモード波長、幅広いパワーが重要だ。980nm励起レーザをビーコンとして使うには、横モードが安定していないとビーコンとして機能しない。モードが変わると強度分布が変わるため、どこから光が出ているか分からなくなる。また、距離に応じてビーコン光の出力を二桁くらい変えないといけない場合があるため、二桁のパワー変動に対して常に縦モードシングルを維持するような、特殊なドライブをしている。」

980nmレーザは、閾値から定格の1/10までの電流駆動。これをアッテネータ（減衰器）と組合せて最大出力で使うと消費電力も部品コストも高くなるため、電流制御のみで二桁の出力変動に対応させている。ただし、励起レーザをこのように使うにはカスタマイズが必要。有本氏は、「励起レーザに元々ついているハイパワー用ファイバブラッググレーティング（FBG）を取外し、カスタマイズした、より反射率の高いFBGに付け替え、低出力で安定度の高いモードロッカーにし、評価して組込んでいる」とコメントしている。

もう一つ例を挙げれば、ミラーの制御用コントローラはアナログタイプが採用されている。デジタルにしない理由は、デジタルコントローラでは消費電力が数100Wになること、アナログの方がパフォーマンスが優れていることだ。同氏によると「消費電力と性能優先で、時間をかけてアナログコントローラを開発した」という。

低消費電力化は、アプリケーション、給電問題を意識した開発だ。100Vの電力供給が得られない場合、太陽電池、風力発電が利用できれば、無給電で運用できる。ファイバ敷設が困難な条件、河川を跨ぐ伝送、飛行場、ビルの密集した都市部、移動体光通信などのアプリケーションでは、低消費電力の光無線が価値を発揮するはずだ。

それには、まず低コストの光無線装置が商品化されて市場で認知されることが必要だ。市場での価格競争力を考慮して、ターゲット価格が200万～400万円となるように装置の開発が進められてきた。使用している部品類のほとんどは、安価な市販品だが、上に見たようにカスタマイズされている。カスタマイズせずに、仕様書を書いてそのまま各メーカーに発注すれば、装置の製造コストは簡単に1000万円を超える、と有本氏は見ている。

市販品がないものは、独自に開発している。光学系に用いている色消しレンズ（波長無依存）はその一例。1～1.6μmまで、同じ光学系で、フォーカスシフトがないレンズが開発されている。仮にこれをCWDMに用いれば、16波長すべてを100Gbpsで変調すると、1台の装置で1.6TbpsのCWDM装置が実現することになる。

このような開発品も含め、NICTの光無線装置は、コンパクト、低コスト、低消費電力を満たす製品に仕上がっており、「商用化レディ、技術移転可能」な段階にある。

NICTでは､次の開発ターゲットとして、新幹線、リニアモーターカー、航空機での利用に向けた実験を計画している。

参考文献

(1) Y. Arimoto et al., Th.3.F.2, ECOC2008

(2) E. Ciaramella et al., IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 21, NO. 16, AUGUST 15, 2009

LFWJ