

■5 群(通信・放送)- 3 編(光伝送技術)

2 章 光加入者系／メトロ系伝送システム

【本章の構成】

- 2-1 光アクセスシステム
- 2-2 FM 一括変換方式
- 2-3 アナログ光リンク



■5群-3編-2章

2-1 光アクセスシステム

(執筆著者：吉本直人) [2010年6月 受領]

光アクセスシステムとは、ユーザ宅から通信事業者の収容局までを光ファイバで結ぶ伝送システムであり、近年では広く普及した光ブロードバンドサービスを支える重要な社会インフラ基盤となっている。本節では、はじめに普及の鍵を握る光アクセスシステムの経済化について述べる。次に、経済性に優れ、我が国をはじめ世界中で普及してきたギガビットイーサネット PON (1G-EPON) システムについて述べる。最後に、将来に向け柔軟な機能拡張を目指した WDM-PON システムなどの技術について紹介する。

2-1-1 経済性を求められる光アクセスシステム

まず設備面での経済化について述べる。光アクセスシステムは局側装置が膨大な設備量になること、ユーザ側の装置や光ファイバのコストがユーザのサービス料金に直接反映されることから、設備の共用化が経済化を図るうえで重要となる。この観点から光ファイバの配線形態によって光アクセスシステムを分類したものを図 2・1 に示す。

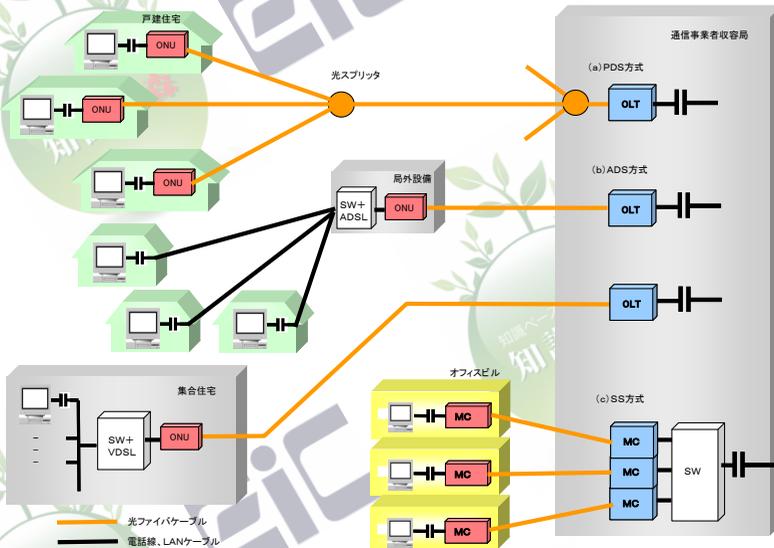


図 2・1 光ファイバの配線形態による光アクセスシステムの分類

SS (Single Star) 方式は、ユーザ宅に設置される光回線終端装置 (ONU : Optical Network Unit) と収容局に設置される光回線終端装置 (OLT : Optical Line Terminal) とをメディアコンバータ (MC) などを用いて point to point で結ぶ方式である。この方式は構成が簡易であるため、保守・運用性やサービスの拡張性も高いといった特徴がある一方、一本の光ファイバを一ユーザが占有してしまうので光ファイバの敷設コストが高い場合は割高となる。ADS (Active

Double Star) 方式は、ユーザ宅と収容局間に多重化(スイッチング)装置と ONU を設置し、多重化された複数ユーザの信号を 1本の光ファイバで収容局に結ぶ方式である。この方式は、1本の光ファイバを複数ユーザで共有できること、またスイッチング装置と各ユーザ宅間は既設の電話線や LAN ケーブルがそのまま活用できるため、早期の光サービスの展開に適している。中国や欧州をはじめ世界で広く採用されている FTTC (Fiber To The Curb) などがこの方式に該当する。しかし、通信事業者の局外に給電や保守の必要な装置を設置しなければならないため、運用性に課題が残る。PDS (Passive Double Star) 方式は現在では広く PON (Passive Optical Network) 方式と呼ばれ、ONU と OLT 間に光スプリッタを設置し、その間を光信号のまま point to multi-point で結ぶ方式である。本方式は、ADS 方式の特徴に加え、光スプリッタは無給電で動作可能であるため保守性も高く、また光ファイバの大容量性・波長多重性などの特徴を最大限活かせる方式として、最近広く一般ユーザへの普及が進んでいる。一般的に FTTH (Fiber To The Home) とは ONU がユーザ宅内にあるものを指すが、ユーザの集約率をさらに高めるため、スイッチング装置などを用いて ONU に複数のユーザを収容する方法もこの方式に該当する。

次に、システム面での経済化について述べる。これまでのアクセスシステムでは、サービスごとに異なるプロトコルを用いていたため、ONU のコストなどが高価なものとなっていた。近年、多様なサービスをすべて IP パケット化 (VoIP : Voice over IP や IP-TV など) し、それを広く普及しているイーサネットフレームで伝送する方式が主流となってきた。この方式を PON 技術に取り入れ、ONU をはじめシステムコストの抜本的低減化を可能としたのが、ギガビットイーサネット PON¹⁾である。

2-1-2 ギガビットイーサネット PON (1G-EPON)

2004年にギガビットイーサネット (GbE) を基本とした上り下りともに最大 1.25Gbps の帯域を有する 1G-EPON が IEEE にて標準化された (1000BASE-PX シリーズ)。図 2-2 に 1G-EPON のフレームフォーマットを示す。GbE と同様のフレームフォーマットであり、ONU でのフレーム変換や余分なフラグメンテーションをすることなく信号をユーザ側 GbE-IF に透過させることが可能であるため、経済性に優れている。PON としての特徴は、プリアンプル部分にユーザ識別子 LLID (Logical Link ID) を設けてある点である。

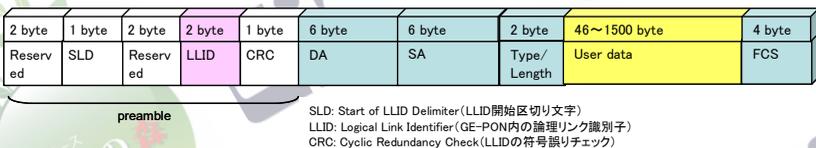


図 2-2 1G-EPON のフレームフォーマット

次に 1G-EPON の多重化技術について述べる。PON は point to multi-point 接続であるため、下り方向では TDM (Time Division Multiplexing : 時分割多重) 技術を用いている。全ユーザの下り信号はすべての ONU に到達するので、ONU は図 2-2 で示した LLID を見て受信フレームを取捨選択する。一方上り方向では、光スプリッタで合流するので衝突を回避する制御

が重要であるため、TDMA (Time Division Multiple Access : 時分割多元アクセス) 技術を用いている。OLTはONUにて付与されたLLIDを見て、どのONUから来たフレームかを判断する。このように、LLIDによって論理的にP2P通信が可能となる (Point to Point Emulation)。

次にPONの特徴であるpoint to multi-point接続を制御するMPCP (Multi Point Control Protocol) の働きについて図2・3に示す。まず、ONUが接続されたとき、OLTがONUを自動的に発見・登録してLLIDをONUに付与すると同時にRTT(Round Trip Time)測定を行い、OLTとONU間の時刻同期を行う(Discovery Process)。次に、ONUはバッファに蓄積している上りデータ量を記したREPORTフレームをOLTに送出する。OLTは、このデータ量をほかのONUの帯域利用状況から、このONUに割り当てる帯域を計算し、データ送出開始時間と割当帯域を記したGATEフレームをONUに送出する。この際、重要な役割を果たすのがDBA (Dynamic Bandwidth Allocation : 動的帯域割当) 技術である。図2・4にDBAの特徴を示す。1G-EPONでは最大32ユーザが帯域を共有するため、固定的に帯域を割り当てるFBA (Fixed Bandwidth Allocation) では、時間帯によって未使用帯域が生じてしまい、帯域利用効率が悪い。DBAを用いることによって、帯域利用効率を最大化し、かつ登録台数に応じて公平に帯域を制御することが可能となる。また、DBAのパラメータを変更することによって、遅延時間要求に応じた優先制御や、QoSレベルに応じたサービス提供も可能となる。

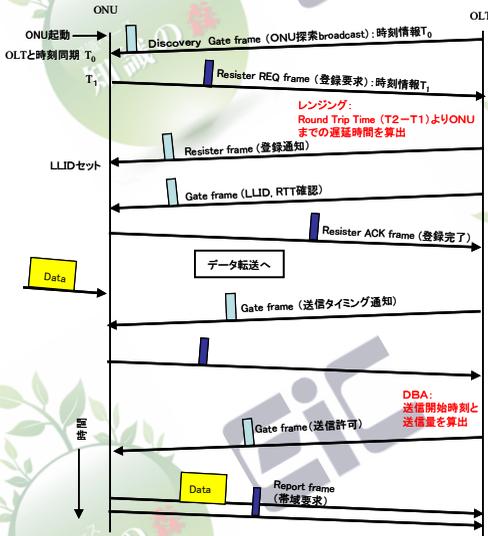
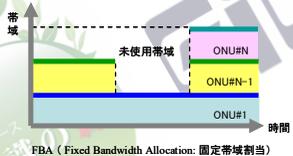
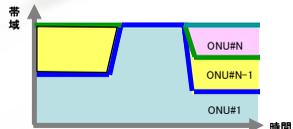


図 2・3 MPCP の主なプロトコルシーケンス



FBA (Fixed Bandwidth Allocation: 固定帯域割当)



DBA (Dynamic Bandwidth Allocation: 動的帯域割当)

図 2・4 FBA と DBA との比較

次に、PONシステムに特有の光送受信技術について図2・5に示す。ONUはOLTの送信許可を受けてから発光・送信をするので、送信デバイスの送信状態-消光状態間の遷移時間 (T_{on}/T_{off}) が必要である。また、各ONUとOLT間の距離が各々異なることから、OLTが受信する信号の強度と位相が異なるパースト的な受信モードとなる。したがって、信号強

度を等価する利得制御 (AGC : Auto Gain Control) と、位相を揃えクロック抽出・同期確立 (CDR : Clock and Data Recovery) を受信フレームごとに素早く行うことが伝送効率を高めるために重要である。1G-EPON では、すでに広く普及し経済性に優れている GbE を基本に仕様を定めている (図 2・5)。GbE の経済性を活かしつつ、帯域利用効率向上のため、いかに Receiver settling time や CDR lock time を低減化するかが技術的ポイントである。

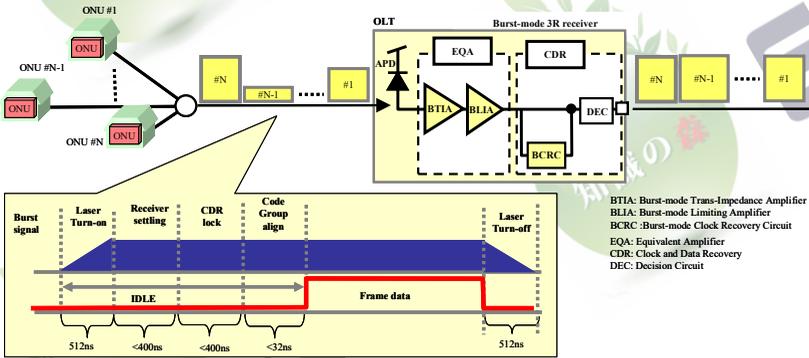


図 2・5 1G-EPON におけるバースト受信器の構成と受信タイミングダイアグラム

次に 1G-EPON の後継として期待されている 10G-EPON について述べる。10G-EPON は IEEE によって 2009 年 6 月に標準化が完了した (10GBASE-PR/X シリーズ)。1G-EPON との backward compatibility を確保するため、1G-EPON で利用している光ファイバ網をそのまま活用できる光送受信レベルの仕様となっている。図 2・6 に伝送信号の波長配置を示す。同一スプリッタ上に 1G と 10G のユーザが混在することを想定すると、下り信号では、WDM 多重できるのに対し、上り信号では TDMA 多重が必要である。その理由は、1G-ONU の光源の経済化のために 100nm もの波長範囲を規定しているため、10G の波長範囲とオーバーラップが生じてしまうからである。したがって、1G/10G デュアルレートバースト送受信技術²⁾や DBA アルゴリズム³⁾の研究がさかんに行われている。

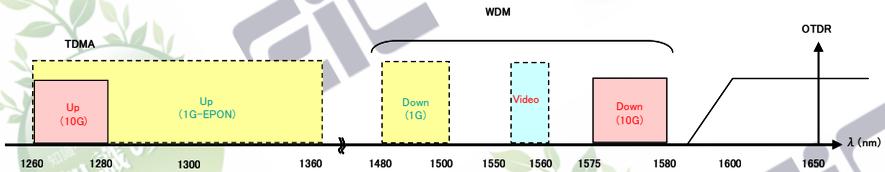


図 2・6 1G-EPON と 10G-EPON における伝送信号の波長配置

2-1-3 WDM-PON

上り信号制御技術や高速バースト受信技術は、伝送速度の上昇によって技術的難度が急速に増してくる。波長を積極的に利用してこの課題を解決しようとするのが WDM-PON である。

図 2・7 に代表的な WDM-PON の形態を示す。一つは、異なる波長を用いて複数の TDM-PON を overlay させる Broadcast 型 WDM-PON である。アクセス区間の総帯域を共用するという点では、1G-EPON などと同様であるが、波長を加えることによりサービスや帯域を必要に応じて upgrade することができる。また、この方式は光スプリッタを用いるので 1G-EPON と同様の光ファイバ網を活用できるメリットがある。ただ、波長割当ての仕組みが加わるため PON の制御がやや複雑になる課題ある。もう一つは、ユーザごとに 1 波長を割り当てる unicast 型 WDM-PON である。波長をユーザごとに割り当てるため、論理的には波長によって光ファイバを占有している SS 方式と等価となる。したがって、PON の制御が極めて簡便になるメリットがある。しかし、必要とされる波長数は数十波長となるため、各 ONU が異なる波長属性を有した場合、その管理・運用が煩雑になるといった課題がある。

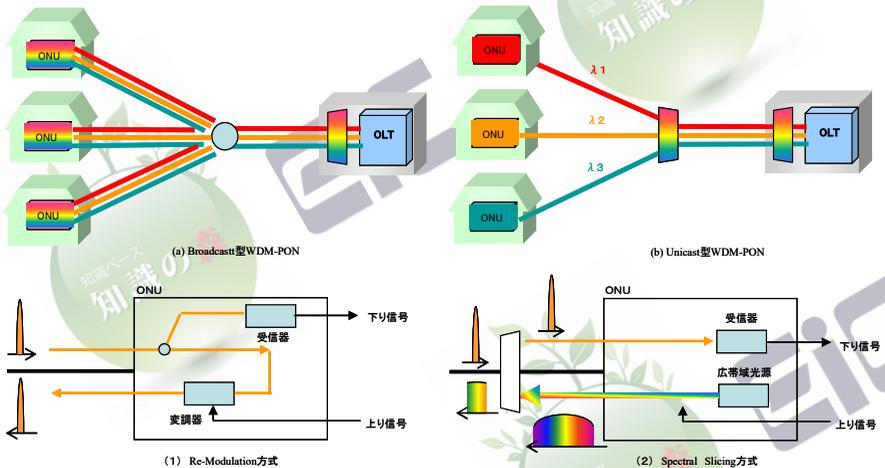


図 2・7 WDM-PON の形態と ONU カラーレス化技術

そこで、ONU の波長属性を実効的に隠ぺいするカラーレス (Colorless) 化技術が重要となる。代表的なものとして、下り信号の波長を上り信号用に再利用する Re-Modulation 方式や波長属性のない広帯域光源 (Broadband Light Source : BLS) を用いた Spectral Slicing 方式などがある。Re-Modulation 方式として、上下信号で異なる変調フォーマットやサブキャリアを適用する方法⁹⁾などが提案されている。また、一心双方向伝送時の課題であるレイリ-散乱による伝送品質劣化を低減化させる方法として、光飽和を用いて下り信号情報を消去する方法⁹⁾などが提案されている。Spectral Slicing 方式の課題として、分散と光出力に起因する伝送距離制限がある。これを解決するため、FEC (Forward Error Correction) 技術の適用などが提案⁹⁾されている。いずれの場合も光デバイスが重要な役割を果たしており、その経済化が期待されている。

■参考文献

- 1) G. Kramer, "Ethernet Passive Optical Network", McGraw Hill, New York (2004)

- 2) J. Nakagawa: "First Demonstration of 10G-EPON and GE-PON Co-existing System Employing Dual-rate Burst-mode 3R Transceiver", Proc. OFC/NFOEC2010, PDP-D10 (2010)
- 3) 村山大輔, "1G/10 デュアルレート EPON に適した動的帯域割当方法" 信学技報, **CS2009-32**, pp.115-120 (2009)
- 4) N. Genay, "Bidirectional WDM/TDM-PON access networks integrating downstream 10Gbit/s DPSK and upstream 2.5Gbit/s OOK on the same wavelength", Proc. ECOC2006, Th3.6.6 (2006)
- 5) H. Takesue, "Wavelength channel data rewrite using saturated SOA modulator for WDM networks with centralized light sources", IEEE J. lightwave Technol. **21**, pp. 2546-2556 (2003)
- 6) S. Kaneko, "Scalability of Spectrum Sliced DWDM transmission using forward error correction", IEEE J. lightwave Technol. **24**, pp.1295-1301 (2006)



■5群-3編-2章

2-2 FM一括変換方式

(執筆著：下羽利明) [2010年5月 受領]

映像配信事業者からの地上デジタル／アナログ信号、BS (Broadcast Satellite) / CS (Communication Satellite) 信号などの多チャンネルの映像信号を FTTH 網によって各ユーザ宅まで伝送する方式として、主に強度変調方式¹⁾と FM 一括変換方式^{2,3)}とがある。強度変調方式は、周波数多重された多チャンネルの映像信号をそのまま光信号の強度に乗せて伝送するのに対し、FM 一括変換方式は、多チャンネルの映像信号を一括して広帯域な FM 信号に変換した後、光の強度を変調し伝送する方式である。

本節では、FTTH 用 RF(Radio Frequency)光映像配信システムの要求条件について述べた後、広帯域に渡って線形性の高い FM 変復調を可能とする光送信機／受信機の構成、ならびに強度変調方式との性能比較について述べる。

2-2-1 FTTH 用光映像配信システムにおける要求条件

図 2・8 に、FTTH 用光映像配信システムの構成例と要求条件を示す。

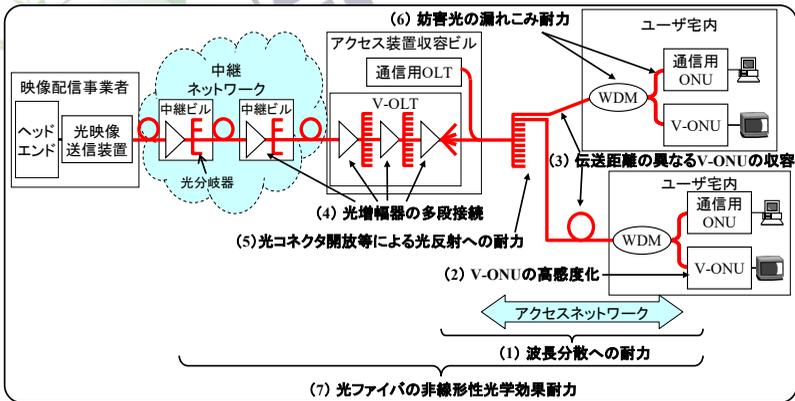


図 2・8 FTTH 用光映像伝送システム構成例と要求条件

映像配信事業者のヘッドエンド設備からは、周波数多重された多チャンネル映像信号が光映像送信装置に入力される。入力された映像信号は光映像送信装置内において、光映像信号に変換され、中継ネットワークに送出される。中継ネットワークにおいては、中継ビルに設置された光増幅装置/スプリッタでの増幅/分岐を繰り返すことによって、広域に光映像信号を伝送することが可能である。その後、光映像信号は、アクセスネットワークにて通信用 OLT からの通信光と波長多重され、宅内まで伝送された後、波長分離され、V-ONU (Video-Optical Network Terminal) において、元の周波数多重された多チャンネル映像信号に復調される。

このような FTTH 型の光映像配信システムには、図中の (1) ~ (7) に示すような要求条件が存在する⁴⁾。それぞれについて、以下に説明する。

(1) 波長分散への耐力

FTTH 用映像伝送システムで用いられている光信号の波長は、 $1.55\mu\text{m}$ 帯を用いているのに対し、一般的にアクセスネットワークに用いられている光ファイバは $1.3\mu\text{m}$ 帯にゼロ分散波長をもつ単一モードファイバである。よって、FTTH 用映像伝送システムに波長分散耐力をもたせるか、波長分散による伝送特性の劣化を光回線設計時に考慮する必要がある。

(2) V-ONU の高感度化

V-OLT (Video - Optical Line Terminal) の最終段光増幅器と V-ONU の間にある光分岐器の分岐数を大きくすると、加入者当たりのシステムコストを低減することが可能となるが、保守者の安全性を考慮すると、V-OLT 内の最終段光増幅器の出力光信号パワーには限界がある。そのため、低い受光電力でも正常に動作する高感度な V-ONU が望まれる。また、V-OLT から V-ONU までの伝送距離を延ばす観点からも V-ONU の高感度化が望まれる。

(3) 伝送距離の異なる V-ONU の収容

実際のアクセスネットワークでは一つの光分岐器に接続される V-ONU までの距離が大きく異なる場合があるため、V-ONU が正常に動作する受光電力の範囲が大きいことが望まれる。

(4) 光増幅器の多段接続

FTTH 用映像光伝送システムでは、中継ネットワークにおいて、光増幅器や光分岐器を多段接続して伝送することにより、一つのヘッドエンドから出た光信号を広域に配信することが可能になる。このため、光増幅器の多段接続による雑音増加や歪の発生に対する耐力を有する映像伝送方式であることが必要となる。

(5) 光コネクタ開放等による光反射への耐力

実際の運用状態では、工事などで一部の光コネクタを開放状態にしたまま運用することを考慮する必要がある。このような観点から、光コネクタの開放などによって発生する光反射による雑音特性劣化が生じにくいシステムであることが望まれる。

(6) 妨害光の漏れこみ耐力

通信用の光と波長多重伝送を行う場合、通信用の光が映像用の光に対する妨害光となって映像信号の伝送品質に影響を及ぼす恐れがある。これを回避するためには V-ONU 入力部の WDM カプラ (波長の異なる光を低損失で合・分波する素子) に十分なアイソレーション特性をもたせる必要がある。また伝送方式としても、妨害光への耐力に優れる方式であることが望まれる。

(7) 光ファイバの非線形性光学効果への耐力

光増幅器から出力される高出力光を長距離の光ファイバで伝送すると、自己位相変調 (Self Phase Modulation) をはじめとする非線形性光学効果が発生し映像信号の伝送品質を劣化させる恐れがある⁵⁾。また、通信光と波長多重伝送を行うシステムにおいては、通信用の伝送速度増加に伴って通信用 OLT の送出光電力を高くする必要が出てきており、誘導ラマン散乱

(Stimulated Raman Scattering) が発生する恐れが高くなる⁶⁾。よって、このような非線形光学効果が起こりにくいシステムを検討するとともに、非線形光学効果に対する耐力に優れる方式を採用することが望まれる。

これらの要求条件を満たす方式として、FM一括変換方式による光映像配信システムが考案された。

2-2-2 光送信装置 (Tx)

現在一般的に用いられている FM一括変換型の光送信装置 (Tx) の構成を図 2・9 に示す。

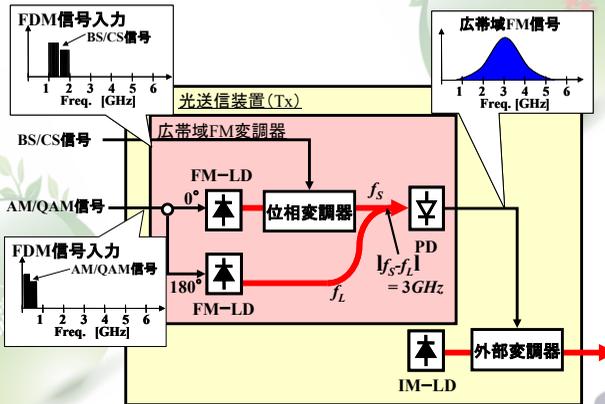


図 2・9 FM一括変換型光送信装置 (Tx) の構成

周波数多重された映像信号は、70~770MHz までの AM/QAM 信号と、1.0~2.1GHz の BS/CS 信号とが、それぞれ別々に Tx に入力される。AM/QAM 信号は、広帯域 FM 変調器内で 2 分岐されたあと、二つの FM-LD (Frequency Modulation-Laser Diode) にて光信号を直接変調する。光信号は、入力信号によって直接変調されることにより、周波数チャープを生じる。このとき、図 2・10 に示すように、AM/QAM 信号を二つの FM-LD に逆位相で入力することにより、一つの FM-LD のみを変調する場合と比較して、残留する強度変調成分を抑圧することが可能となる⁷⁾。一方 BS/CS 信号は、AM/QAM 信号と電気段にて多重され FM-LD を直接変調する方式と、片方の FM-LD の後段に接続された光位相変調器に入力され、光信号を位相変調する方式とがあるが、図 2・2 には後者を記載した⁸⁾。

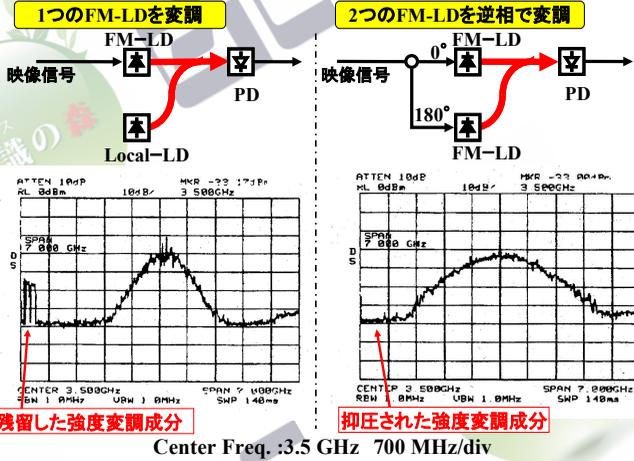


図 2-10 二つの FM-LD を逆相で変調することによる残留 AM 成分の抑圧

二つの FM-LD から出力された光信号は混合され、PD (Photo Diode) で一括受信 (光ヘテロダイン検波) することによって、二つの FM-LD の発振周波数差 (6GHz) に等しい周波数を中心とする、広帯域な電気 FM 信号を得る. PD の後段には、1/2 分周器が接続されており、FM 信号の中心周波数を 6GHz から 3GHz に変換するとともに、位相雑音量も 1/2 に低減している⁹⁾. 1/2 分周器から出力された FM 信号は外部変調器に入力され、伝送用の IM-LD (Intensity Modulation-Laser Diode) からの光信号を強度変調し、伝送ファイバに出力される. なお、BS/CS 信号については、中心 3GHz の FM 信号の左右第 1 次側波のみを伝送しており、2 次側波成分以上の高次成分の存在による伝送帯域不足が生じないような周波数デビエーション範囲としている¹⁰⁾.

2-2-3 光受信装置 (V-ONU)

図 2-11 に、一般的な FM 一括変換型の V-ONU の構成 (a)、ならびに FM 復調 IC の写真 (b) を示す.

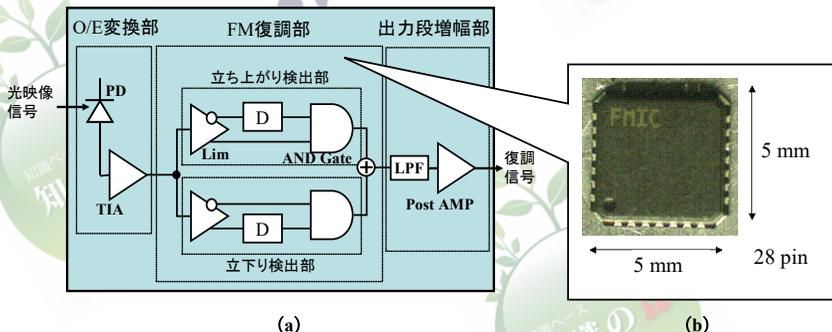


図 2-11 FM 一括変換型 V-ONU の構成 (a)、FM 復調 IC の写真 (b)

図に示すとおり、V-ONUは、O/E変換部、FM復調部、出力段増幅部の三つから構成される。O/E変換部では、光映像信号を受信しFM復調部に入力する。FM復調部では、入力されたFM信号の立上り/立下りをそれぞれ検出し、遅延時間幅(D)に等しいパルス列を出力する遅延検波方式を採用しており、広帯域に渡り高効率で線形性の高いFM復調を可能としている¹¹⁾。出力段増幅部では、復調信号のレベルを適切なレベルまで増幅し出力する。

2-2-4 強度変調方式との比較

図2・12に、出力信号CNR(Carrier to Noise Ratio)のV-ONU入力光パワー依存性(a)、入力光信号のRIN(Relative Intensity Noise)依存性(b)を示す。RINは、中継部の光増幅器で発生するノイズや、光信号源のノイズ、伝送区間の反射によるノイズなどを含んだ値である。

図2・12(a)に示すように、強度変調方式(円形のプロット)では、V-ONUへの入力光パワーに依存してCNRが変化するのにに対し、FM一括変換方式(菱形のプロット)では、光入力パワーが約-15dBmの低い領域までCNRの劣化がほとんどなく、ほぼ一定の値を示している。CNRの規格値を44dBとした場合、FM一括変換方式では強度変調方式に比べ、V-ONUの受信感度が6dB以上の改善されることになる。すなわち、FM一括変換システムでは、NTTビルからユーザ宅のV-ONUまでの区間において光信号の多分岐化、伝送距離の長距離化が可能であることを示している。

また、図2・12(b)に示すように、FM一括変換方式は強度変調方式に比べ、RINの変化に対するCNR依存性が小さく、伝送区間でのRIN劣化を9dB多く許容できる。このことは、FM一括変換方式では、光伝送区間においてより多くの光増幅装置を用い、一つのヘッドエンド設備から広域に光信号を伝送することが可能であるため、ヘッドエンド設備構築のためのコスト削減が期待できることを示している¹²⁾。

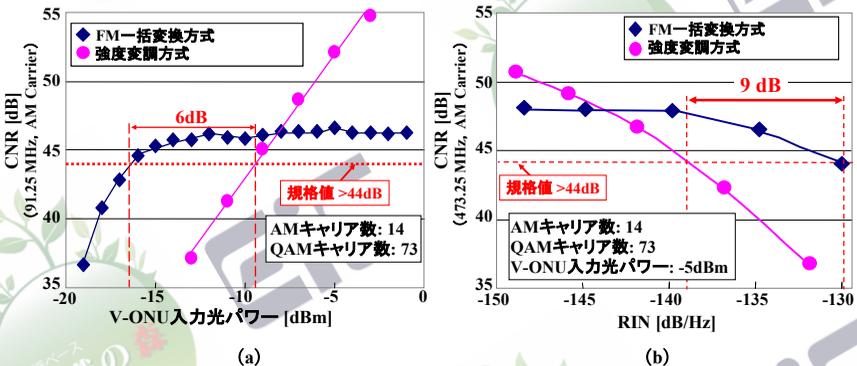


図2・12 V-ONU入力光パワー依存性比較(a)、光信号入力RIN依存性比較(b)

■参考文献

- 1) ITU-T J.186, "Transmission equipment for multi-channel television signals over optical access networks by sub-carrier multiplexing (SCM)," ITU-T, 2002.

- 2) ITU-T J.185, "Transmission equipment for transferring multi-channel television signals over optical access networks by FM conversion," ITU-T, 2002.
- 3) K. Kikushima, H. Yoshinaga, H. Nakamoto, C. Kishimoto, M. Kawabe, K. Suto, K. Kumozaki, and N. Shibata: "A Super Wideband Optical FM Modulation Scheme for Video Transmission Systems", IEEE J.Sel. Areas Commun., 14, 6, pp.1066-1075, 1996.
- 4) 池田, "映像光伝送方式の現状", 映像メディア学会誌, 63 巻, 4 号, 437-443 頁, 2009.
- 5) 下羽, 池田, 吉永, 須川, "FM 一括変換型光映像配信システムにおける光中継ネットワーク設計パラメータの検討", 2010 年信学総合大, B-10-51, 2010.
- 6) 下羽, 森田, 池田, 菊島, 藤原, 青柳, "GE-PON と映像系との波長多重伝送時における誘導ラマン散乱の影響", 2004 年信学ソサイエティ大, B-8-13, 2004.
- 7) 佐伯, 石黒, 米田, 萩原, 渋谷, 江村, "FM 一括変換方式における光ヘテロダイン形 FM 変換器の強度変調成分抑圧方法," 1998 年信学ソサイエティ大, B-10-166, 1998.
- 8) 川附, 下羽, 松木, 吉永, "FM 一括変換方式による BS/CS110 信号の伝送方式 (3) ー光送信装置の試作評価結果ー", 2007 年信学ソサイエティ大, B-8-19, 2007.
- 9) 野嶋, 石井, 川島, 布施, 北地, "AM/FM 一括変換における位相雑音特性改善の検討," 1998 年信学総合大, B-10-94, 1997.
- 10) 吉永, 下羽, 結城, 池田, "FM 一括変換方式による BS/CS110 信号の伝送方式 (1) ーシステム設計ー", 2007 年信学ソサイエティ大, B-8-17, 2007.
- 11) 井筒, 結城, 池田, "FM 一括変換方式による BS/CS110 信号の伝送方式 (2) ーV-ONU における残留 FM 信号の影響と抑圧方法ー", 2007 年信学ソサイエティ大, B-8-18, 2007.
- 12) H. Yoshinaga, N. Shibata "Commercially Deployed Coherent System for Video Distribution," 2008 LEOS Summer Topicals, TuC1.2, 2008.

■5 群-3 編-2 章

2-3 アナログ光リンク

(執筆: 笹井裕之) [2010年6月 受領]

2-3-1 光ファイバ無線

光ファイバ無線とは、光ファイバ中に無線信号を閉じ込めて伝送する技術であり、Radio-over-fiber (または Radio-on-fiber : RoF) と呼ばれている。本項では、まず RoF の概要、伝送形態による RoF 方式の分類と特徴、RoF 技術の研究開発動向について説明する。

(1) RoF の概要

基本的な RoF の構成は、親局側 (センター側) に設置された変復調装置からの無線信号を光信号に変換・伝送し、子局側 (アンテナ側) で光電気変換することで直接無線信号を得ることができる。したがって、子局側では、増幅器やアンテナなどの RF 部品を備えればよく、子局装置の小型化が可能となる。

RoF 伝送では、周波数帯域が限定された無線信号を伝送するため、通常 2 次歪は信号帯域外に発生し、主として 3 次歪のみを考慮すればよい。そのため伝送性能は、搬送波電力対雑音電力比 (CNR)、相互変調歪 (IM3) や、両者を元にしたスプリアスフリーダイナミックレンジ (SFDR) で規定されることが多い。また、移動端末から送信される無線信号においては、移動端末とアンテナ間の距離の変化による、いわゆる遠近問題が発生する場合がある。このため、一般に光伝送性能には極めて大きなダイナミックレンジが要求される。

図 2・13 に、RoF 伝送の構成と、主な伝送劣化要因を示した。RoF 技術は、1980 年代から研究開発が行われ、システム設計技術¹⁾、光多重反射²⁾・レイリー散乱⁴⁾などの伝送劣化解析・対策、ファブリペロー型半導体レーザ (FP-LD) の適用⁵⁾・マルチポイント構成⁶⁾による低コスト化などの検討が進められ、携帯電話システムでの電波不感地対策など、実用化が進んでいる。

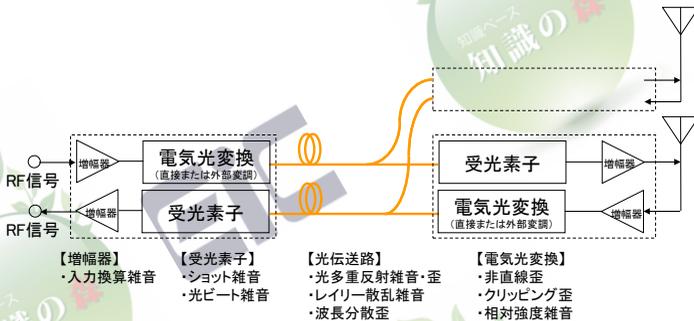


図 2・13 光ファイバ無線の基本構成と性能劣化要因

(2) RoF 方式の分類と特徴

RoF は、光ファイバ中に伝送する信号形態・周波数により、下記の 3 方式に分類できる。

(a) RF-RoF

RF-RoF 方式は、直接変調または外部変調により、無線信号をそのままの形態で光信号に変換して光伝送する方式である。直接変調では、主に半導体レーザが使用され、伝送可能な周波数帯域は 10GHz 程度である。外部変調では、LiNbO₃⁷⁾や EAM⁸⁾などの変調器が用いられ、60GHz 帯の伝送も可能である。伝送性能は、主として変調時の非直線性、伝送路の分散特性^{9, 10)}が支配的となる。3 方式のうち最もシンプルな構成で、実用化で選択されることが多い。

(b) IF-RoF

IF-RoF 方式は、無線信号を周波数の低い IF 信号の状態でも光伝送する方式である^{11, 12)}。RF-RoF 方式と比較すると、アンテナ側に周波数変換部品が必要となるが、電気光変換時の周波数が低いため、伝送性能の制限は緩和される。

(c) D-RoF

D-RoF 方式は、IF 信号（または RF 信号）を AD 変換し、無線信号を一旦デジタル信号に変換して光伝送する方式である¹³⁾。本方式は、RF/IF-RoF 方式に比べ、光反射に強い、光損失の影響が少ない、安価な発光素子が使用可能、などの利点がある。ただし、アンテナ側に ADC/DAC、周波数変換部品が必要となる。

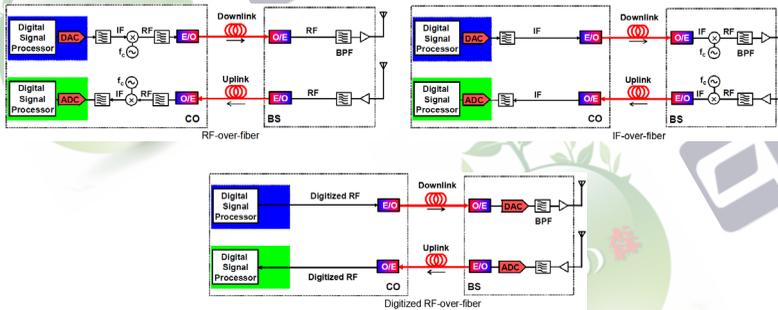


図 2・14 D/IF/RF-RoF の構成図

(3) RoF 技術の研究開発動向

RoF 伝送の基本的な方式は上述したとおりであるが、対象とする無線信号やシステムに応じて、様々な研究がなされている。下記には、主として RF-RoF 方式に関して、無線周波数帯毎の最新研究開発動向を紹介する。

(a) マイクロ波帯 RoF 伝送技術

マイクロ波帯(主に 10GHz 以下)でのトピックは、VCSEL 応用^{15, 16)}、MIMO システム^{17, 18)}、bandpass sampling による D-RoF の改良方式¹⁴⁾があげられる。

VCSEL は、従来の端面発光と異なる面発光型のレーザで、低電流で駆動でき、短波長(850nm 帯)で、安価な光源として、主にデジタル伝送用に実用化されている。そこで、RF-RoF 伝送の低コスト化を目的に、マルチモードやシングルモードファイバでの適用可能

性が検証されている^{15,16)}。また、MIMO技術は、複数アンテナを利用して無線通信容量の増大等を実現する、最新の無線通信技術の一つである。複数アンテナのMIMO信号とRoF伝送との融合でシステム性能を向上される提案等が報告されている^{17,18)}。

また、bandpass samplingを適用し、ADC/DACに周波数変換機能をもたせたD-RoFの改良方式が提案されている¹⁴⁾。本方式は子局の小型化、PONなどのデジタル光伝送系との融合の可能性が高いとして、注目されている。

(b) ミリ波帯 RoF 伝送技術

ミリ波帯 RoF は、特に波長分散の影響による無線信号電力のフェージングが深刻な課題であり¹⁰⁾、これに対するミリ波信号の伝送、受信技術が重要となる。

ミリ波伝送技術では、フェージングを回避するため、片側帯波光信号の生成方法がいくつか提案されている。主なものとして、変調用デバイスの観点からは、マッハツェンダー型変調器の差動駆動を利用した変調方法¹⁹⁾、分極反転構造を導入した変調方法²⁰⁾などがある。また、変調方式の観点からは、光信号の状態を変調信号の周波数を交換する、フォトニックアップ²¹⁾/ダウンコンバージョン²²⁾について、数多く提案されている²³⁾。システム応用としては、光技術により120GHz帯ミリ波信号を生成、HDTV無線伝送の実験²⁴⁾や、有線伝送系(超高速伝送、WDM-PONなど)との融合システムなど、様々なシステム提案がされている²³⁾。

(c) その他：RoF デバイスの標準化

RoF 関連技術の標準化は、活動が開始した段階であり、まず RoF 用光変調器の評価技術の標準化が、IEC で進められている²⁵⁾。標準化の内容は、リモートアンテナシステムなどに普及が進みつつあるLN-MZ変調器の相互変調歪特性の評価技術であり、半波長電圧を測定し、相互変調歪を算出するものである。本標準化案は、高分解能光スペクトラムアナライザやバイアス点の調整操作が不要となる、簡易で精密な半波長電圧の測定法として期待されている。

RoF 技術は無線伝送技術と親和性が大変高く、携帯電話^{26, 27)}、WiMAXアクセス²⁸⁾、地上デジタル放送²⁹⁾などの通信・放送の無線システム向けに、すでに実用化も進んでいる。今後、無線システムの進化を支える技術として、RoF 技術がますます重要なものと期待される。

■ 参考文献

- 1) W. I. Way, "Optical Fiber-Based Microcellular Systems: An Overview", IEICE Trans. Commun., vol.E76-B no.9 pp.1091-1102, 1993.
- 2) J. H. Angenent, I. P. D. Ubbens and P. J. de Waard, "Distortion of a multicarrier signal due to optical reflections," ECOC91 & IOOC, WeC8-4 (1991) pp.569-571.
- 3) T. Tsuchiya, T. Shiraishi, and J. Arata, "Major Factors Affecting Fiber-Optic Transmission System Design for Radio Base Stations", IEICE Trans. Commun., Vol.E76-B No.9 (1993) pp.1136-1144
- 4) 渋谷真, 土門渉, 江村克己, "移動無線用光ファイバファイダにおける光反射雑音の影響の検討" 電子情報通信学会 信学技報, OCS91-78, Vol.91 No.511 (1992), pp.21-28.
- 5) H. Sasai, K. Utsumi, and K. Fujito, "High-performance long-distance fiber-optic transmission using unisolated Fabry-Perot laser for mobile radio systems," Optical Fiber Communication (OFC 97), pp. 13-14, 1997.
- 6) H. Sasai, K. Utsumi, K. Fujito, "Optical access links suppressing optical beat interference with FP-LDs for microwave transmission", Microwave Photonics (MWP96), pp.237-240, 1996.
- 7) M. Sugiyama, "Broadband LiNbO3 Modulators", Microwave Photonics (MWP'04), WB-1, pp.273-276, 2004.
- 8) N. Mineo, K. Nakamura, K. Nakamura, S. Sakai, and T. Ushikubo, "60-GHz band electroabsorption modulator module," in Proc. OFC'98 Tech. Dig., San Jose, CA, Feb. 1998, vol. TuH4, pp. 287-288.

- 9) G. J. MESLENER, “Chromatic Dispersion Induced Distortion of Modulated Monochromatic Light Employing Direct Detection,” *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-20, no. 10, pp. 1208-1216, 1984
- 10) U. Gliese, S. Ngrskov, and T. N. Nielsen “Chromatic Dispersion in Fiber-Optic Microwave and Millimeter-Wave Links,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. 44, no. 10, pp. 1716-1724, 1995
- 11) 岡田洋侍 亀村昭寛 齋藤瓊朗, “移動通信用マイクロ波光伝送システムの検討,” 電子情報通信学会時限研究会, OM195-3, pp. 13-18, 1995
- 12) H. SASAI and S. MORIKURA, “Demonstration of Radio on Fiber Transmission Using Wide Dynamic Range Scheme for IMT-2000 Cellular Systems,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E86-C no.7 pp.1153-1158, 2003.
- 13) 伊東梯, 野島俊雄, 垂澤芳明, “帯域信号/デジタル変換法(BDC)を用いた高ダイナミックレンジ 800MHz 帯光マイクロ波伝送”, 電子情報通信学会 信学技報, MW97-26, Vol.97 No.62, pp.61-66.
- 14) P. A. Gamage, A. Nirmalathas, and C. Lim, D. Novak., and R. Waterhouse, “Design and Analysis of Digitized RF-Over-Fiber Links,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 12, pp. 2052-2060, 2009.
- 15) C. Carlsson, A. Larsson, and A. Alping, “RF Transmission Over Multimode Fibers Using VCSELS—Comparing Standard and High-Bandwidth Multimode Fibers,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 7, pp. 1694-1700, 2004.
- 16) T. Niicho, K. Masuda, H. Sasai and M. Fuse, “Proposal of RoF transmission system using 850 nm VCSEL and 1.3 mm SMF with low-frequency superposition technique,” *Optical Fiber Communication Conference (OFC2006)*, OWG4, 2006.
- 17) T.Yamakami, T.Higashino, K.Tsukamoto, S.Komaki, “An Experimental Investigation of Applying MIMO to RoF Ubiquitous Antenna System,” *Microwave Photonics (MWP2008)*, pp.201 - 204
- 18) 金岡泰弘, 山下育男, 榎村聡, 浅野欽也, 清水聡, “MIMO を適用したマルチゾーン ROF システムによる干渉エリアの伝送特性改善”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J91-C, No.1, pp.61-63, 2008
- 19) G. H. Smith, D. Novak, and Z. Ahmed, “Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, pt. 2, vol. 45, no. 8, pp.1410-1415, Aug. 1997.
- 20) 村田博司, 岡村康行, 笹井裕之, 榎原 晃: “Radio-On-Fiber システム向け 26GHz 帯分極反転構造電気光学 SSB 変調器”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J91-C, No.1, pp.101-110, 2008.
- 21) H.-C. Chien, A. Chowdhury, Z. Jia, Y.-T. Hsueh, and G.-K. Chang, “60 GHz millimeter-wave gigabit wireless services over long-reach passive optical network using remote signal regeneration and upconversion,” *OPTICS EXPRESS*, Vol. 17, No. 5, pp.3036-3041, 2009.
- 22) T. Kuri and K. Kitayama, “Novel photonic downconversion technique with optical frequency shift for millimeter-wave-band radio-on-Fiber systems,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 14, No. 8, pp. 1163-1165, 2002.
- 23) T. Taniguchi, N. Sakurai, H. Kimura, and K. Kumozaki, “Technical Trends in Millimeter-wave Band Radio-On-Fiber Access System,” *PIERS Proceedings*, pp. 24-27, 2009.
- 24) A. Hirata, M. Harada, and T. Nagatsuma, “120-GHz Wireless Link Using Photonic Techniques for Generation, Modulation, and Emission of Millimeter-Wave Signals,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 10, pp. 2145-2153, 2003.
- 25) 市川潤一郎, 宮崎徳一, 清水亮, 橋本義浩, 黒川悟, 小牧省三, 小川博世: “: その IEC 標準化活動について, “ファイバ無線向け光変調器の評価技術とその IEC 標準化活動について, “住友大阪セメント(株) TECHNICAL REPORT 2009, pp.16-22.
- 26) 引馬章裕, 福家裕, 中南直樹, 大矢根秀彦, 小林宏: “FOMA エリアの経済的拡大に向けた無線基地局装置の開発, “ NTT ドコモジャーナル, vol.12 (2004) pp.50-56.
- 27) Y. Horiuchi, “ROF Application to 3G Mobile Systems in Offices and Outdoors,” *MWP 2005*, p.3, 2005.
- 28) B. Chow, M.-L. Yee, M. Sauer, and A. Ng’Oma, “Radio-over-fiber distributed antenna system for WiMAX bullet train field trial,” *Mobile WiMAX Symposium*, pp.98-101, 2009.
- 29) M. Maeda, T. Nakatogawa, and K. Oyamada, “Optical Fiber Transmission Technologies for Digital Terrestrial Broadcasting Signals,” *IEICE Trans. Electronics*, vol.E88-B no.5 pp.1853-1860, 2005.