6. 光通信とその応用

6.1 光ファイバによる画像伝送

日本電気株式会社 上野 義人

1. ま え が き

光ファイバ通信は、新しい伝送方式の一形態として、公衆通信用のみならず、専用通信、構内伝送、装置間伝送等と各方面で注目を浴び、その実現に大きな期待をかけられている。特に光ファイバのもつ広帯域、低損失性をいかした画像伝送システムが早くから開発、実用化されてきた。

ここでは、画像信号として、信号帯域の広いテレビジョンのようなビデオ信号を対象とし、特に放送事業において広く使用されている、ベースバンド帯のビデオ信号や、VSB-AM 変調された IF 帯または、VHF 帯の映像信号や、FM 変調された IF 帯信号等を伝送する光ファイバ通信システムの構成と応用例について、その概要を述べる¹⁾。

2. 光ファイバ伝送システムの構成

現在、主に実用化されている光ファイバの基本構成は、信号源を電気-光変換して光ファイバ伝送し、受信側の受光器で直接 2 乗検波して光-電気変換する強度変調 (IM) 方式が多く用いられている。

一般に、この光ファイバ伝送システムの回線設計におよぼす要因には、図 1 のレベルダイヤに示すように、光ファイバ入力電力、最低受信入力電力および光ファイバの損失と帯域特性から決定される最大伝送距離がある。

この値を決定する基本的な要因として、発光源、受光器の特性の他に、変調方式と信号帯域とがあげられる。発光源として小型で高速変調可能な半導体レーザー (LD)

と長寿命が期待できる発光ダイオード (LED) とがある。光ファイバとの結合損失が LD より 10 dB 程度大きい LED は、もっぱら近距離の光ファイバ伝送システムに使用されている。

発光源の光出力を温度変化や電源変動に対して一定に保つため、光出力の一部を検出して、発光源に加える直流バイアスを制御する自動光出力制御 (APC) 回路が採用されている。

受光器には、光検波電流を増倍して、受信感度を上げるアバランシェフォトダイオード (APD) と高圧電源の必要のないフォトダイオード (PIN) が広く用いられている。

受信増幅回路には、バイポーラトランジスタを用いた広帯域低雑音特性をもつフロントエンドや FET を用いた高入力インピーダンス増幅器等が用いられている。

また、光レベル変動を補償する方法として、パイロット信号やテレビ同期信号を検出して、増幅器の利得を制御する通常の AGC 回路の他に、増幅器出力の信号のエンベロープを検波して、APD のバイアス電圧をコントロールし受信増幅系全体を自動利得制御する全 AGC 方式がある。

図 1 光ファイバ伝送システムのレベルダイヤ

$$L_M = P_0 - P_r - 2L_{CN} - nL_{sp} - d_r \times L_f - \alpha$$

ここで n : スプライス数

α : 光ファイバの帯域制限による等価光損失

¹⁾ "6. Optical Communication and Its Applications; 6.1 Video Transmission Using Optical Fiber" by Yoshito Ueno (Nippon Electric Co. Ltd., Yokohama)

光ファイバとして、広帯域特性を有する集束型マルチモードファイバが好ましいが、短距離の場合、接続や発光源との結合が容易なコア径が大きく、開口値 (NA) の大きいステップ型マルチモードファイバも使用されている。

最近、接続損失の少ない光コネクタやスプライス技術が開発されているので、損失変動の少ない安定な光ファイバ伝送システムを構成することができ、従来用いられている既存伝送システムのように、あまり大きな損失マージンを必要とせず、伝送距離を最大限長く延ばすことができる。

変調方式として、デジタル伝送の場合、直流分がなく、クロック抽出の容易なスクランブル回路を通した2値信号や、運用中の伝送信号の誤り監視が可能な2値AMI符号*や差動パルス位置変調符号等も開発、実用化されている。

アナログ変調の場合、発光源の非直線性による伝送系のひずみが重要な問題であるが、テレビ信号伝送にはアナログ変調方式が広く用いられている。

3. 発光源の非直線ひずみ補償方式²⁾

アナログ変調方式では、発光源の非直線ひずみを低減することが重要である。

発光源の非直線ひずみは、発光部の構造、製作条件に大きく左右され、印加する直流バイアス電流、変調電流の大きさによって変化する。通常、発光ダイオードや半導体レーザーの非直線ひずみは2次ひずみが支配的であり、30~40 dB程度の値である。

これより、アナログ信号を高品質に伝送するためには、何らかの非直線ひずみ補償方式を適用する必要がある。図2に各種非直線ひずみ補償方式の系統図を示す。

プレディストーション型ひずみ補償方式は、非線形素子を用いて、発光源の非直線特性と逆特性の非直線ひずみを信号入力に与える方法で、発光素子のひずみ経時特性により、充分安定な補償特性が得られない欠点がある。

光負帰還方式は、発光源の出力信号の一部をフォトダイオードで光検出して、発光素子の駆動部に負帰還する方法で、負帰還ループの広帯域性を必要とする。

位相差補償方式は、90°位相差の異なる入力信号を2つの同一特性をもつ発光源に加えて、それぞれ発光源の光出力を合成して2次ひずみを打消す方法で、まったく特性の等しい発光素子を必要とする。

フィードフォワード方式は、発光源の出力信号の一

(a) プレディストーション型ひずみ補償方式

(b) 光負帰還方式

(c) 位相差補償方式

(d) フィードフォワード方式

図2 各種非直線ひずみ補償方式

部を抽出して、光検波した後、入力信号との差をとって非直線成分のみを得る。このひずみ成分で他の発光源を駆動して、本来の信号光と合成して、ひずみ補償を行う方法で、構成が複雑であり、低損失の光ファイバ結合回路を必要とする。

非直線ひずみ補償方式の一例として、構成の簡単なプ

図3 プレディストーション方式ひずみ補償効果

* 2値AMI (Alternate Mark Inversion) 符号: 1ビットのデジタル信号を2ビットのAMI信号に変換した符号。

レディストレーション方式のひずみ改善効果を図2に示す。

このひずみ補償回路は、FET の非直線性を利用したもので2次ひずみが補償され、温度特性も良好であるが、3次ひずみ成分以上の高次ひずみは補償されていない。

この簡単な補償方法でも、カラー副搬送波に対する微分利得 (DG) が1% 程度に改善され、かつ微分位相 (DP) も 1° 程度なので、充分高品質カラーテレビ伝送に利用できる。

4. 各種伝送方式の比較³⁾

画像信号、特にカラーテレビ信号を伝送する光通信方式として、テレビ信号で直接発光源を駆動して、光を強度変調する直接 IM 方式、搬送波を入力信号で周波数変調した FM 波で発光源を強度変調する FM-IM 方式、またテレビ信号をパルス化して、発光源を強度変調するパルス化 IM 方式には、PPM-IM, PIM-IM, PDM-IM, PWM-IM, PNM-IM, PFM-IM⁴⁾ 等の各種方式があり、さらにテレビ信号をデジタル変換して発光源を強度変調するデジタル化 IM 方式として、PCM-IM, DPCM-IM, Δ M-IM 等の方式が開発されている。これら各種伝送方式の簡単な比較を表1に示す。

半導体レーザーは、駆動電流の変化によって発振横モードが一定せず、マルチモード発振した状態で光ファイバに結合したとき、全モード伝搬しないと、光振幅ひずみが発生し、光検波したとき、ひずみを発生する。このため直接 IM 方式では、発光特性の安定な発光ダイオードが広く用いられている。また、復調後のテレビ信号 SN 比が高い領域での光検出器として、APD を使用しても PIN フォトダイオードに比較して受信感度の差はあまりなく、高圧電源の不要な PIN フォトダイオードがよく用いられている。発光源の周波数応答や光ファイバの伝送帯域幅が入力信号周波数に比較して狭い場合には、受信部または送信部で周波数特性を補償する必要がある。

光ファイバの周波数特性は、同軸ケーブルのように $\sqrt{f}$ 特性ではなく、ガウス特性に近い特性 (f^2) を示す

表1 各種伝送方式の比較

変調方式	直接 IM	FM-IM	パルス化 -IM	デジタル 化-IM
光 源	LED	LD/LED	LD	LD/LED
光 検 出 器	APD/PD	APD/PD	APD/PD	APD/PD
光ファイバの 所要帯域	狭 い	やや広い	やや広い	広 い
装置規模	簡 単	中 規 模	中 規 模	複 雑
伝 送 距 離	短 い	短 い	やや長い	長 い
S/N	低 い	やや高い	やや高い	高 い

ため、送信部も周波数特性を補償した方が受信後の SN 比を高くすることができる。しかし、発光源の高周波における変調度が大きくなるため、非直線ひずみの影響を強く受ける欠点がある。

5. カラーテレビ伝送実験例

光ファイバによるカラーテレビ信号の伝送実験が各方面で行われており、以下代表的な実験例について、その構成と結果の概要について述べる。

5.1 直接 IM 方式による高品位テレビ伝送⁵⁾

光ファイバを用いて、走査線数 1,125 本、映像周波数帯域 30 MHz のテレビ信号を発光ダイオードで直接強度変調して、光ファイバ伝送する実験が行われている。この実験例では、発光ダイオードの非直線ひずみを逆特性をもったダイオード回路で補償している。

光ファイバとして、ステップ型マルチモードファイバを使用しているため、周波数帯域が狭く、かつ発光ダイオードの周波数応答も低いため、受信増幅器でテレビ信号を増幅後、周波数特性の補正を行っている。

光源: GaAs-GaAlAs LED, 発光波長 0.82 μ m, 3 dB 遮断
周波数 41.5 MHz

光ファイバ入力電力: -10 dBm (駆動電流 100 mA)

光検出器: SiPIN フォトダイオード

光ファイバ: ステップ型ファイバ 損失 8.2 dB/km

3 dB 遮断周波数: 62.3 MHz $\cdot \sqrt{\text{km}}$

長さ 50m の光ファイバを用いたとき、下記の伝送特性が得られた。

光変調度: 80% (変調電流 80 mApp)

周波数特性: 30 Hz~58 MHz, レベル偏差 0.5 dB

S/N: 57 dB (pp/rms), 雑音帯域 30 MHz

DP, DG: 1° (24 MHz), 3%

この結果、高品位テレビ信号を光ファイバ伝送したときの画像品質評価は、同軸ケーブル伝送したときと同等以上の評価が得られた。

5.2 FM-IM 方式によるカラーテレビ伝送⁶⁾

FM-IM 方式を用いたカラーテレビ伝送実験の系統図を図4に示す。送信側では、マルチバイブレーターを使用した FM 変調器により、入力ビデオ信号をパルス変調型の FM 波に変換した後、半導体レーザーを駆動する。

半導体レーザーには、スレシホールド電流の 2/3 程度の直流バイアス電流を印加して、駆動電流に対する光パルスの立上り時間特性を改善している。

光検波した後、パルス化 FM 波の復調には、図4に示すように受信波形を2つの 180° 異なる位相成分に分割し、微分した後、それぞれの出力を合成する。この微分パルス合成波の零交差点を検出すれば、パルス密度変調波が得られる。

(a) FM-IM 方式の構成

(b) 復調器原理図

図 4 FM-IM 方式による光送受信機の構成

このパルス密度変調波をビデオ帯域の低域濾波器に通せば、もとのカラーテレビ信号が再生される。

光源: GaAs-GaAlAs LD, 発光波長 $0.82 \mu\text{m}$

光ファイバ入力電力: -12 dBm

光ファイバ: ステップ型ファイバ, コア径 $70 \mu\text{m}$, 損失 5 dB/km

サブキャリア周波数および周波数偏移: 16 MHz , 4 MHzpp

光検出器: Si APD 雑音増倍係数 0.6

長さ 200 m の光ファイバを用いたとき, 下記の伝送特性が得られた。

S/N : 3 dB (受信光入力 -27 dBm)

周波数特性: $30 \text{ Hz} \sim 4 \text{ MHz}$, レベル偏差 $\pm 0.8 \text{ dB}$

本実験では, 周波数偏移が小さいため, FM 方式の利点を十分に生かしていないが, サブキャリアの周波数を高くして周波数偏移を大きくすることにより, S/N 比の改善が期待できる。

5.3 PDM-IM 方式によるカラーテレビ伝送⁷⁾

FM-IM 方式の変形として, パルス密度変調方式 (PDM) を用いて, カラーテレビ信号を光ファイバ伝送するシステムが開発されている。この方式は, 入力ビデオ信号をマルチプレクサでパルス化 FM 変調した後, パルス幅一定化回路でパルス幅を一定にすると, パルス密度が入力信号の振幅に応じて変化するパルス密度変調波が得られる。受信側では, ただ単に低域濾波器で帯域制限すれば, 原信号が再生される。

光源: GaAs-GaAlAs LD

光ファイバ入力電力: -3 dBm (直流バイアス電流 50 mA , パルス駆動電流 50 mA peak)

光ファイバ: ステップインデックス W 型ファイバ,

損失 3 dB/km , 帯域 $35 \text{ MHz} \cdot \sqrt{\text{km}}$

光検出器: Si APD

全長 10 km の光ファイバ伝送したときの特性を下記に示す。

S/N : 44 dB (pp/rms)

周波数特性: $30 \text{ Hz} \sim 4.5 \text{ MHz}$, レベル偏差 -2 dB

DP, DG: 3.2° , 3%

この方式の難点は, 直接 IM 方式と同じ S/N 比を得るのに必要な受信光入力電力が大きいことと, 光ファイバの伝送帯域幅が狭くて良い特長があるが, あまり狭過ぎると, PDM 波が光ファイバ伝送途中で低域濾波器を通したことと同じように振幅変換され, 光検出したとき, フロントエンドを含めた受信増幅器のダイナミックレンジを大きくとる必要がある。

5.4 PIM-IM 方式によるカラーテレビ伝送⁸⁾

カラーカメラで撮像されたビデオ信号を全長 2 km の架空敷設された光ファイバケーブルで伝送

し, 相手局で折返し試験した結果, 直接モニターした画像と比較して, 良好な伝送品質が得られた報告がある⁹⁾。

この実用化試験に使用された方式には, 半導体レーザーの駆動デューティ比が低く, 変復調回路構成が簡単なパルス間隔変調 (PIM) 方式が採用されている。

図 5 に示すように, PIM 変調波は, 変調部で発生された三角波の振幅と入力信号のレベルとを比較し, それぞれの振幅が一致したときパルスが発生する。

受信側では, 送信側と同じ傾斜をもつ三角波を受信パ

(a) PIM 方式説明図

⑤: 音声用 PIM パルスの時間標準パルス

(b) 映像用, 音声用 PIM パルスの多重化時間関係

図 5 PIM 方式原理図と多重化方法

ルスでリセットした後、低域濾波器を通すことにより、この三角波の包絡線が濾波されて、もとの信号が得られる。

また、音声 PIM 変調パルスを映像 PIM 変調パルスに多重化する方法として、映像 PIM 変調波の変調度が 100% 以下のとき、この映像 PIM 変調パルス列には、空時間間隔が存在する。

したがって、映像 PIM 変調パルスを基準時間として、音声 PIM パルスを、この空時間帯に挿入すれば、多重化できる。

光源: GaAs-GaAlAs LD, スレシホールド電流 160 mA
光ファイバ入力電力: -3 dBm (駆動電流 200 mA_p)
光ファイバ: 集束型多成分ガラスファイバ (SELFOC), 損失 10 dB/km, 帯域幅 100 MHz・km
光検出器: Si APD 雑音増倍係数 0.45
PIM 平均繰返し周波数: 16 MHz, パルス幅約 10 ns

2 km の光ファイバを伝送したときの伝送特性を下記に示す。

S/N: 55 dB (pp/rms)
周波数特性: 30 Hz~5 MHz, レベル偏差 ± 2 dB
DP, DG: 1°, 1%
音声 S/N: 50 dB (rms/rms)

5.5 PCM-IM 方式によるカラーテレビ伝送

PCM-IM 方式によるデジタル伝送実験例は、多数報告されており、カラーテレビ信号をデジタル変換すれば容易に光ファイバ伝送することができる。

発光源として、発光ダイオードを用いてカラーテレビ信号を 32 Mb/s に DPCM 符号化して、伝送している。

また、半導体レーザーを用い 100 Mb/s の符号化速度でカラーテレビ信号を PCM 化して、光ファイバ伝送している。カラーテレビ信号の伝送品質は、ほとんどデジタル変換のための符号器、復号器の性能に支配されている。光ファイバの伝送距離も、中継間隔 8 km で 60 km 中継の伝送実験が NTT 通研で実施された。

5.6 FDM 多重によるマルチチャンネルカラーテレビ伝送¹⁰⁾

ビデオ信号を 3 ch FDM 多重化して、光ファイバ伝送の実験が報告されている。

発光ダイオードの非直線ひずみが大きな品質劣化要因であり、第 2 高調波ひずみが信号帯域内に落ち込まないように周波数配置を選んでいる。

光源: LED 変調度 90% (各 ch 当り 25%), 2 次ひずみ 41 dB, 3 次ひずみ 60 dB
光検出器: Si APD 2 次ひずみ 60 dB, 3 次ひずみ 118 dB
S/N: 42 dB (pp/rms)

光ファイバとして損失 4 dB/km のものを使用すれば、伝送距離は 5 km まで延ばせる。

5.7 VHF 波直接 IM 方式によるテレビ伝送¹¹⁾

VSF-AM 方式で変調されたテレビ信号を IF 帯または VHF 帯で直接光強度変調して、光ファイバ伝送する実験が行われている。

このような搬送波によるビデオ信号伝送では、ビデオ搬送波 f_0 、カラー副搬送波 ($f_0+3.58$ MHz)、音声副搬送波 ($f_0+4.5$ MHz) の 3 周波による 3 次ビート雑音が大きな品質劣化要素となる。

発光ダイオードの 3 次高調波ひずみは、-55 dB 程度が得られており、2 次高調波ひずみは、ひずみ補償回路で充分補償される。このため、3 次ビート雑音レベルは -46 dB 以下となり、通常の放送波中継用 3 次ビート雑音許容値である -33 dB を充分満足している。

したがって、CATV 用途として、VHF 波 12 ch を同時に光ファイバ伝送する実験が行われているが、発光源の直線性と安定度が改良されれば、実現可能性も大きい。

光源: GaAs-GaAlAs LD
ch 数: VHF 波 12 ch
光ファイバ: 集束型光ファイバ 10 dB/km
光検出器: Si PIN

4 km の光ファイバで伝送したときの受信画質評価は、5 段階評価で 3 であった。

5.8 IF (FM 波)-IM 方式によるテレビ伝送

現在、発光源の性能向上により、FM 変調された IF 信号 (130 MHz) で直接 IM する方式が検討されており、光ファイバ 1 km 程度の伝送実験が行われようとしている。

光源: LED
光ファイバ入力電力: -10 dBm
IF 周波数, 周波数偏移: 130 MHz, 10 MHz pp
復調後 S/N: 55 dB (pp/rms)
光検出器: Si PIN

今後、光ファイバによる画像伝送方式は、高い周波数領域の信号伝送へと開発されつつある。

5.9 実用例

光ファイバ伝送システムの現場試験は、日本を含めて世界各国で現在約 100 システム実施されており、実際に光ファイバケーブルを敷設して、実用に近い状態で現場試験が行われている。

これらの実験例の中で、テレビ信号伝送を一般加入者にサービスしている代表例を表 2 に示す。

現在、光ファイバによるテレビ伝送、特に CATV 分野への適用が日本、カナダ、米国で検討され、実用に供されようとしている。

まず、CATV 網の幹線系から導入が始まり、ついで加入者への分配系へと適用されてゆくものと推定される。なお、コンピューター端末の CRT ディスプレイに

表 2 光ファイバによるテレビ信号伝送システム商用試験例

商 用 場 所	変調方式	システム概要	光送受信器	光ファイバケーブル	実施機関、時期
Hastings St. Leonards Bexhill (英国)	FDM-IM	CATV システムの幹線系に使用、距離 1.4 km HF 波 (8.9 MHz)	LED: 波長 0.9 μm ファイバ入力: -9 dBm PIN:	ファイバ: コア径 85 μm 13 dB/km (0.9 μm) ケーブル: 2 芯 外形 7×4 mm	Rediffusion 1976—03
Teleprompter Manhattan (米国)	直接 IM	CATV 用、ビル屋上から階下のヘッドエンド間に使用 距離 240m	LED: PIN: S/N: 52 dB	ファイバ: 集束型 16 dB/km ケーブル: 6 芯 外形 6 mm ϕ	Teleprompter Cable TV 1976—07
Chicago Illinois BTL (米国)	PCM-IM	電話 (576 cH), データ (4.8 kb/s), 白黒テレビ電話の公衆サービス PCM ビットレート 44.7 Mb/s, 全長 2.6 km	LD: 波長 0.82 μm ファイバ入力: -3 dBm APD: 最低入力 -54 dBm	ファイバ: 集束型 5 dB/km ケーブル: 12 芯リボン 2 本	BTL 1977—05 商用期間 1 年
U. S. Navy (米国)	FM-IM	航空母艦 Kitty Hawk 内の CCTV 伝送に使用 距離 100m	LED: PIN:	ファイバ: バンドル	U. S. Navy 1975

光ファイバが用いられている実用例は多い。

〔参 考 文 献〕

6. む す び

以上、光ファイバによるテレビ伝送について、伝送方式、応用例について述べた。

現在、光ファイバ伝送方式も波長多重方式、双方向伝送方式、光直接中継方式等が開発されており、今後、ますます複雑、高度化された光ファイバ伝送システムが出現するが、まず光ファイバシステムの経済性の観点から短距離用のものから導入が活発に行われるであろう。

将来、光ファイバの波形伝送特性が改善されると、光モノリシック IC 回路技術の進歩と相まって、より高度な画像情報を光の状態で直接メーヅ伝送する方式も開発されるであろう。

さらに、1 μm 以上の長波長帯発光、受光素子の開発が進展すると、光ファイバの超低損失性 (0.5 dB/km) とを組み合わせれば、広帯域画像情報を 40~50 km の無中継長距離伝送が可能である。

今後、光学部品の性能向上に伴い、光ファイバによる VHF 帯テレビ伝送のみならず、UHF 帯テレビ伝送の実現性も非常に高くなるであろう。

(昭和 52 年 12 月 7 日受付)

- 1) 光ファイバ通信小特集号, 信学誌, 95, 7 (1976)
- 2) 安木, 篠田: 光ファイバによるビデオ伝送, テレビ学会技報, Vol. 1, No. 1, p. 33, TBS 42-3 (1977.10)
- 3) 上野, 梶谷: 光ファイバによるカラー TV 伝送, テレビ学会画像伝送研資, 13-2 (1975)
- 4) 米田ほか: PFM 変調による光ファイバ TV 信号伝送の検討, 信学会通信方式研資, CS 77-153 (1977.12)
- 5) 三橋, 熊田: 光ファイバによる高品位テレビ伝送実験, テレビ学会技報, Vol. 1, No. 1, p. 19, TBS 42-1 (1977.10)
- 6) 田中ほか: FM 方式を用いた光ファイバによるカラーテレビ信号の伝送実験, 信学会通信方式研資, CS 73-159 (1974.3)
- 7) 中川ほか: 光ファイバによるカラー TV 信号の 10 km 無中継伝送実験, 信学会通信方式研資, CS 77-35 (1977.6)
- 8) 上野, 安木: パルス間隔変調による半導体レーザ通信方式, 信学誌, 59-C, 4 (1976) 193
- 9) 深津, 内藤: 電力会社における光ファイバ応用, テレビ誌, 31, 9 (1977) 706
- 10) E. H. Hara, T. Ozeki: Optical video Transmission by FDM Analogue Modulation, IEEE Trans., CATV-2, 1, Jan. (1977) 706
- 11) F. W. Dabby, et al: System Analysis and Design for an Optical Fiber System for CATV Application, Digest of NCTA Annual Conv. (Apr. 1977)