光ファイバ1心と双方向光増幅器による 多地点画像情報伝送システムの検討

正員 山下 育男 (関西電力株式会社)

正員 青海 恵之 (関西電力株式会社)

非会員 鈴木 拓也 (富士通株式会社)

非会員 加藤 智之 (古河電気工業株式会社)

正員 大村 英之 (古河電気工業株式会社)

Studies of a system gathering multi-channel visual signals using a single optical fiber and a
bidirectional optical amplifier

Ikuo Yamashita, Member, Shigeyuki Seikai, Member (The Kansai Electric Power Co.,Inc.), Takuya Suzuki, Non-member (FUJITSU LIMITED), Tomoyuki Katou, Non-member, Hideyuki Omura, Member (The Furukawa Electric Co.,LTD.)

Bidirectional passive optical network systems including a single trunk fiber and a bidirectional optical amplifier is proposed for the purpose of gathering ITV signals distributed on a line. A FM-SCM technique is used to discriminate the signals. The bidirectional transmission function is realized by using a WDM technique. A novel bidirectional EDFA is applied to long-haul analog signal transmission. The characteristics of gain and noise figure of the EDFA are clarified and they are found to be desirable for the bidirectional analog signal transmission. The transmission properties of the proposed system are confirmed for a 100-km SMF in a cable installed in the field. The satisfied CNR of more than 19 dB for the FM modulated video channel can be attained for over the optical line loss of 60 dB. Finally, stability of the system is confirmed by a continuous measurement of the SNR for two-weeks.

キーワード : 画像伝送 SCM 双方向 光増幅 光パッシブネットワーク フィールドテスト

1. まえがき

無人電気所等の設備監視の手段としてテレビカメラによる画像監視 (ITVシステム) が活用されている。この情報伝送では、複数の監視箇所の映像信号などを有人の監視箇所まで長距離伝送する機能 (上り伝送) と、各無人箇所へカメラ制御信号その他を伝送する機能 (下り伝送) が必要となる。現状はこの機能を一般の対向型の光伝送装置で実現しており、監視箇所毎に光ファイバを割り当てているため、各光ファイバの伝送容量を十分に活用できていないという状況にある。

このような多地点に対して情報の分配と収集を効果的に行う方式として、光サブキャリア多重 (SCM) 伝送⁽¹⁾⁽²⁾を用いた光パッシブネットワークによる方式⁽³⁾⁽⁴⁾が提案されている。光カプラを介して共通の光ファイバで複数の信号を伝送する方式であり、各地点の信号変調について搬送波周波数を異なる値に割り当てることで、光受信

器で複数の信号が同時に受信された場合にも、各信号の識別は可能となる。

本論文では、光パッシブネットワークによる多地点画像情報伝送方式について光ファイバの使用効率をさらに高めるために、光ファイバ1心で双方向伝送を行う方式を提案する。このために伝送用の光信号波長として、上り伝送には $1.55 \mu\text{m}$ 帯を、下り伝送には $1.53 \mu\text{m}$ 帯を用いて波長多重伝送 (WDM) を行う。両方向の光波長を $1.5 \mu\text{m}$ 帯とすることで EDFA が適用可能となるため⁽⁵⁾⁽⁶⁾、長距離伝送化が容易であり、合波と分波も市販の経済的な WDM カプラで低損失に行える。この波長多重と SCM を併用する方式は、光増幅器を含めた伝送システムを最も簡潔に実現する方法といえる。1心双方向伝送を行うには光増幅器に双方向増幅の機能が必要となるため、我々がデジタル信号伝送で提案してきた双方向光増幅器⁽⁷⁾⁽⁸⁾を適用する。これは1台の EDFA と WD

Mカプラとを組み合わせた構成により、双方向増幅を経済的に実現するものである。今回はアナログ伝送であり、デジタル伝送以上に利得平均化と低雑音性を図った高性能な光増幅器が要求されるため、本文では増幅器特性についても詳細に検討を行っている。

本文の構成は次の通りである。第2章ではシステムの構成を示し、双方向増幅器の利得と雑音指数およびその波長依存性について述べる。第3章では双方向増幅器による長距離化の検討として、Carrier-to-Noise Ratio (CNR) を評価基準に回線設計を行う。第4章では本システムの動作確認として京都市内の屋外敷設ケーブル計 100km を用いて行ったフィールドテスト⁽⁹⁾ について述べ、得られた CNR 特性、信号対雑音比 (SNR) 特性を示す。さらに動作安定性の評価のため行った、2 週間の連続測定結果についても合わせて述べる。

2. システム構成と双方向増幅器の特性

〈2・1〉 伝送システムの構成 提案する伝送システム
の構成を図1に示す。FM変調された映像信号(1chあたり
帯域27MHz)及び音声信号(1chあたり帯域200kHz)
を、DFB-LDにより1.55 μm 帯と1.53 μm 帯の波
長の光信号に変換し、光カプラを介して1本の光ファイ
バで伝送する波長多重方式であり、上りと下りの1.55 μm
帯と1.53 μm 帯の光信号をWDMカプラによって分離
することで双方向伝送を実現する。今回はFM変調の搬
送波周波数として、映像信号では1GHz帯(CS衛星放
送配列)を、音声信号では80MHz帯を用いることとす
る。また端局数は最大4局で各局の映像チャンネル数は2
チャンネルとし、最大伝送距離を1.3 μm 零分散のシング
ルモード光ファイバ(SMF)100kmと想定した。零分
散波長が1.3 μm の光ファイバを用いて1.5 μm 帯の光
を伝送することになるため、分散で光源のスペクトル幅
が広がり信号歪が生じるが、今回のチャンネル数であれば
信号周波数を歪周波数を避けて配列することができるた
め、この影響を抑えることができる。これより本システ
ムにおいては、中継器すなわち双方向増幅器の特性、及
び双方向伝送に伴う上りと下りの信号間のクロストーク
が課題であるといえる。

〈2・2〉 双方向増幅器の構成と特性 本節ではまず双方向増幅器の特性を示す。今回提案する双方向増幅器は、図2のように1台のEDFAと1.53 μm 帯と1.55 μm 帯を分離する4つのWDMカプラで構成される。双方のポートから入力された光信号は、WDMカプラの合分波機能により誘導され、共に同じ方向からEDFAに入力される。増幅された光信号はWDMカプラによって分離、誘導され、それぞれ入力ポートと反対側のポートに出力される。この構成では波長帯間のアイソレーションが課題となるが、これについては次節で詳細に述べる。EDFAは多波長の光増幅において高出力が確保できるよう2段構成とし、励起光波長は、増幅器のNFが低減され

図1 多地点画像情報伝送系の基本構成

Fig. 1. Configuration of a bidirectional passive optical network.

るよう前段では $0.98 \mu\text{m}$ とし、後段は $1.48 \mu\text{m}$ とした。

増幅器は双方向で運用されるため、動作時に例えば1.53 μm 帯側の増幅器入力変動した場合、1.55 μm 帯の利得の安定と波長間の平均の維持が問題となる。この観点から双方向増幅器の特性の測定を行った。増幅器に1.55 μm 帯4波(1555,1556,1557,1558nm)を-26dBm/chで入力し、同時に1.53 μm 帯1波を入力して同時増幅する。このとき1.53 μm 帯の波長を1533~1541nmの間で変化させ、また入力光強度も-21~-35dBmの間で変化させながら両波長帯の利得を測定した。1.53 μm 帯の波長を横軸として、両波長帯の利得の最大及び最小値を図3 (a)に示す。1.55 μm 帯は4波全てに対する最大及び最小値である。双方向増幅を考慮すれば、1.53 μm 帯と1.55 μm 帯の両波長帯で利得が平均し、1.53 μm 帯の光強度変動に対する利得変動が小さいことが望ましい。この観点より今回は、1.53 μm 帯側の波長として1537nm周辺を用いることとした。これより1.53 μm 帯側を1537nmとし、増幅器入力光強度を-21~-35dBmとした場合の、1.55 μm 帯の利得と雑音指数を図3 (b)に示す。この条件では1.55 μm 帯の利得は約28dBで安定であり、波長間格差は1dB以内に収まることがわかる。NFも5dB程度であり問題はない。以上から光信号を適当な波長と入力光強度に設定することで、双方向増幅器で良好な特性が得られることがわかった。

〈2・3〉 WDMカプラの特性とクロストーク 図1, 図2の構成から明らかなように, 本システムの双方向伝

送及び双方向増幅器の性能は、 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯と $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 帯を合分波するWDMカプラの特性に依存する。今回は誘電体多層膜による市販のWDMカプラ（JDS製）を適用した。用いたカプラの共通ポートから白色光を入力して測定した $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ポートと $1.53\text{ }\mu\text{m}$ ポートの挿入損を

図2 双方向光増幅器の構成
Fig.2. Configuration of a bidirectional optical amplifier.

(a) $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 帯の波長と増幅器利得
(a) Gain dependence on the wavelength of the light in the $1.53\text{-}\mu\text{m}$ band.

(b) $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯の利得とNF
(b) Gain and NF of the lights in the $1.55\text{-}\mu\text{m}$ band.

図3 双方向増幅器の増幅特性
Fig.3. Gain properties of the bidirectional amplifier.

図4 WDMカプラの特性
Fig.4. Properties of the WDM coupler.

図4に示す。どちらのポートも通過波長については1dB以下の挿入損となっており、相手側の波長帯とは18dB以上のアイソレーションが得られていることがわかる。また通過波長帯幅は約10 nmとなっており、波長設定にも余裕がある。

この伝送システムで生じるクロストークの要因としては、

- (a) 端局のカプラでの $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ポートからの入力光の $1.53\text{ }\mu\text{m}$ ポートへの流入、またはその逆の流入
- (b) 中継増幅器での $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 信号光の $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 出力側への流入、またはその逆
- (c) 伝送路での反射光の流入

が考えられる。

(a)については、WDMカプラにおける $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ポートから $1.53\text{ }\mu\text{m}$ ポートへの信号光の流入、またはその逆の流入は-50dB以下であり、クロストークは-100dBc以下である。(b)については図2の増幅器構成により、EDFA出力光がそれぞれのポートに出力される間に光カプラ（アイソレーション18dB）を2段通過するため、36dBのアイソレーションがとれる。これよりクロストークは-72dBc以下となる。(c)については最悪ケースのカプラ出力端の反射で考える。コネクタの反射減衰量を最悪値の-40dBとすると、送信光強度4dBmの場合、-40dBmの反射光が発生し、カプラのアイソレーションで18dB抑圧されて-54dBmで受信される。信号光を-29dBmで受信するとすれば、信号光と反射光の強度差は25dBとなり、クロストークは-50dBc以下となる。

なお本システムは信号の多重にSCMを用いており、電気系でクロストークはさらに抑えられるため、全システムとしてのクロストークは十分無視できるものと考えられる。

3. システムの伝送品質

本節では、前述の双方向増幅器の特性をもとに、CNRを評価基準として本システムの回線設計を行い、長距離伝送の検討を行う。

光受信器で受信された信号のCNRは次式で表される。

$$CNR = 10 \log \frac{\frac{1}{2}(mMSPr)^2}{[2q\{I_{d0} + M^2 + \chi(I_{dm} + S(nP_r + P_{ase}))\} + I_t^2 + (MSnPr)^2 RIN_{out}]B} \quad (1)$$

m	1ch あたりの変調度	M	APDの増倍率
n	光信号数	χ	APDの過剰雑音指数
S	受光感度 (A/W)	q	電子の電荷 (C)
I_{d0}	受光素子の暗電流	I_{dm}	APDの増倍暗電流
P_r	1光源からの受光電力	B	信号帯域幅
I_t	等価入力換算雑音電流密度		

式 (1) の中の光増幅器出力光のRIN (RIN_{out}) , 及び光増幅器出力のASE強度 (P_{ase}) は、次式となる。

$$RIN_{out} = RIN_{in} + \frac{4h\nu n_{sp}}{P_{in}} + \frac{(2h\nu n_{sp})^2 B_f}{P_{in}^2} \quad (2)$$

$$P_{ase} = P_{ase} B_f = 2h\nu n_{sp} (G - 1) B_f \quad (3)$$

RIN_{in}	光増幅器へ入力される信号の R I N		
P_{in}	光増幅器への信号光入力パワー		
h	プランク定数	ν	信号光周波数
n_{sp}	反転分布パラメータ	G	光増幅器の利得
B_f	光増幅器の利得帯域または光フィルター幅		

また、光増幅器のNFと反転分布パラメータ (n_{sp}) は次式の関係とした。

$$NF = 10 \log (2n_{sp}) \quad (4)$$

式 (1)～(4) を用いて 4 局の信号の 100km 伝送を想定して回線設計を行う。伝送条件の厳しい映像信号について、表 1 の各パラメータを用いて算出したCNRを図5に示す。横軸は受信器への入力光強度、縦軸は中継器（光増幅器）への入力光強度とし、CNRを等高線として表したものである。光受信器への入力が小さくなるにつれてCNRが劣化していく様子がわかる。これは主に光受信器の電気系の雑音の影響といえる。同時に光増幅器入力が小さくなった場合もCNRが低下することがわかる。これは光増幅器への信号光入力力が弱まると、光増幅器の自然放光（ASE）が光信号に比べて増加し、さらに信号光－ASEビート雑音とASE－ASEビート雑音により信号光のRINが劣化するためである。またこれを防ぐため受信光強度を大きくすれば、伝送距離が抑えられるというトレードオフの関係になる。

ここで屋外敷設のSMF 100kmを想定して光ファイバの光損を0.45dB/kmとし、光カプラやコネクタ接続の光損をトータル15dBとすれば、伝送路光損として60dB程度見込む必要がある。送信器出力の光強度を4dBm、光増幅器の利得を28dB、飽和出力を0dBm/chとして、この条件を書き入れたものが図の点線である。100km伝送時にはこれより左側の条件でシステムを運用することに

表 1 計算に用いたパラメータ
Table 1. Parameter for Calculation.

$m = 0.4$	$M = 10$
$x = 0.8$	$S = 0.88 A/W$
$I_{d0} = 10 nA$	$B = 27 MHz$
$G = 28 dB$	$NF = 6 dB$
$I_t = 24.5 pA/Hz^{1/2}$

図 5 映像信号のCNR
Fig. 5. Calculated CNR of the video channel.

なる。同時に映像伝送のCNRは、画像監視用途を考えると19dB以上としたいため、これらを考慮した伝送条件は図の斜線部分となる。すなわちこの範囲内になるような伝送路上の位置に光増幅器を設置して運用すれば、本システムで4局同時の100km伝送が可能となる。

4. 100km 伝送時のCNR特性

前章までの検討をもとに、図6に示すような伝送システムを構成してSMF 100kmの伝送を行い、伝送特性を実験的に確認した。1台の親局と2台の子局からなる構成とし、各子局から帯域27MHzでFM変調された映像信号1chずつが親局に伝送されると同時に、親局から各子局に向け音声信号1chずつが伝送されている。FM変調の搬送波周波数、及び各局の光波長は図の通りであり、出力光強度はいずれも+5dBmとした。光ファイバには、京都市内の電柱に敷設された1.3μm零分散光ファイバケーブルを用いて、折り返し接続により図のように65kmと35kmの伝送路とした。また用いたWDMカプラはどれも1.53μm帯と1.55μm帯のアイソレーションが17dB以上であり、2.3節で述べたようにクロストークの問題はないといえる。なお親局は、電力設備の有人監視箇所である制御所の、空調が行われている室内に設置されている。これに対して子局は空調のない一般の変電所に設置している。

本伝送システムの性能の評価のため、光中継器への入力を、1537nmについては-28.8dBm、1.55μm帯については-24dBm/chに固定し、音声、映像の各チャンネルについて受信器入力を変化させてCNRを測定した。この

図 6 フィールド伝送実験のシステム構成

Fig. 6. Schematic setup of the bidirectional PON system for the field trial.

(a) 映像信号の伝送特性
(a) Video channel.

(b) 音声信号の伝送特性
(b) Audio channel.

図 7 伝送特性

Fig. 7. Transmission properties.

とき用いた光ファイバの光損が約 0.4dB/km であったため、受信光強度には前述の回線設計より余裕が出ている。映像チャンネルでは、子局よりテストパターン (CCIR 567 Composite) を伝送し、SNR (映像評価 SN) についても測定した。この測定においては、用いた測定器の確度によりデータが約 1dB ほど変動するため、同一条件で 5 回の測定を行った平均をとっている。

映像信号についての結果を図 7 (a) に、音声信号についての結果を図 7 (b) にそれぞれ示す。またそれぞれの図中の点線は、式 (1)~(3) による計算値である。両図には、受信器への入力光強度が低下するにつれて CNR 及び SNR が劣化する様子が現れており、また測定値と計算値がよく一致していることがわかる。伝送品質として

は、先に述べたように映像信号では CNR 19dB 以上、音声信号では CNR 25dB 以上が必要であるが、映像信号については図より受信光強度 -30dBm でこれを上回ることがわかる。このとき映像信号の SNR は 55dB 以上が得られている。音声信号についても、受信光強度 -30dBm の場合で CNR 30dB が得られ、所要品質を満たすことがわかる。

さらに伝送システムとしては、特性の安定性が重要である。これを確認するため、光レベル及び映像信号の SNR と CNR について連続測定を行った。測定時期は 8 月下旬から 9 月上旬にかけての 2 週間で、子局設置個所で測定した気温は夜間の最低で 28℃ から日中最高 35℃ を記録した。

図8 各点の光パワーの変動

Fig. 8. Fluctuation of the optical signal power.

まずこのときの光レベル変動の測定結果を示す。図8は、子局光出力、増幅器入力(1.55 μm 帯)、増幅器入力(1.53 μm 帯)、増幅器出力(1.55 μm 帯)、増幅器出力(1.53 μm 帯)、親局受信器入力について、モニター用光カプラを介して2分間隔で測定した結果である。伝送路の光損の微妙な変動や光増幅器の温度特性の影響により、微小な変動が見受けられるが、十分小さい範囲に収まっていることがわかる。図9に映像評価SNとCNRの連続測定結果を合わせて示す。SNRは子局1よりテストパターンを送信し1時間間隔で測定したものであり、CNRは子局2からの信号について2時間間隔で測定したものである。CNRおよびSNRのいずれも平均値は安定していることがわかる。CNR値は1dB程度の変動が生じているが、これは図8の受信光強度の変動幅0.5dBを考慮すれば妥当な値である。またSNRについては2dB程度の変動が生じている。しかしこのSNR測定は自動測定で行ったため、図7の場合のように複数回の測定の平均を取ることができず、測定精度が低下している。

別途に伝送系を外して測定系のみでSNRを連続測定したところ、1dB以上の変動が発生することが確認された。すなわち、図9の連続測定時のSNRには測定誤差の影響が含まれており、これを考慮すればSNRの変動もCNRと同様に受信光強度の変動の影響といえる範囲に収まっている。

なお本データは夏期のものであるため、10月下旬から11月にかけて気温20℃前後の条件で同じ測定を実施したが、同様の結果となった。

5. まとめ

多地点情報伝送システムとして、1.53 μm 帯と1.55 μm 帯の波長多重により光ファイバ1心による双方向伝送を行う、光パッシブネットワークを提案した。市販の経済的なWDMカプラで低損失に伝送方向間の信号分離ができ、またEDFAが適用できるという特長をもつ。この

図9 CNR, SNRの変動

Fig. 9. Stability of the CNR and the SNR.

システムで、1台のEDFAとWDMカプラの組み合わせによる双方向増幅器を用いて長距離伝送の検討を行った。双方向増幅器には高利得と波長間の利得平均化が要求されるが、適当な信号波長と入力光強度を選ぶことで利得平坦化が図られることがわかった。この結果をもとに4局のSMF 100km伝送を想定して回線設計を行い、伝送路上で光増幅器を適切な場所に設置することで、伝送路の全光損60dBでCNR 19dBが実現できるという結果を得た。システムの性能確認として、市街地に敷設された光ケーブル100kmを用いて2地点の情報を伝送する系を構成して試験を行った。伝送信号のCNR及びSNRの測定を行った結果、当初想定の特性が得られた。さらに2週間にわたる連続測定により、システムの安定性についても確認を行った。

謝 辞 本実験にあたりご協力いただきました関西通信設備サービス(株)及び関西電力京都支店横大路制御所の皆様と、関西テック猪口勝司氏に感謝いたします。(平成10年12月24日受付, 同11年6月21日再受付)

文 献

- (1) R.Olshansky, et al. "Subcarrier Multiplexed Lightwave Systems", J. Lightwave Technol., 7, 1329-1342, (1989)
- (2) W.I.Way, "Subcarrier Multiplexed Lightwave System Design Considerations for Subcarrier Loop Applications", J. Lightwave Technol., vol.7, pp.1806 (1989)
- (3) 篠田, 後藤, 大村, 松尾, "双方向光パッシブネットワークの検討(その4)", 信学技報, OQE93-62, pp7-12, (1993).
- (4) H.Omura et al., "Development of Multi-coupler Bi-directional Optical Communication System Employing FM-SCM Video Transmission", International Wire & Cable Symposium Proceedings 1995, pp.380-386 1995.
- (5) E.Yoneda, et al. "Erbium-Doped Fiber Amplifier for Video Distribution Networks", IEEE J. Select. Areas Commun., 8, 7, Sept., 1240-1256, (1990)
- (6) M.Mitsuda et al., "AM-SCM Analog Transmission Characteristics in Wavelength Division Bidirectional Amplifier", OEC'94 13C1-5, Chiba, July 1994.
- (7) S.Seikai et al., "A High Gain Optical Amplifier Circuit for Two-Channel WDM Using 1.53um and 1.55um Bands", OEC'94 13B-4, Chiba, July 1994.
- (8) Yamashita et al., "Experimental demonstration of bidirectional 8-channel WDM transmission via multiple repeaters containing a fluoride-based fiber amplifier", OFC'97, TuJ4, Dallas, February, 1997.

- (9) Yamashita et al., "Field trial of long-haul bidirectional passive optical network employing a novel bidirectional EDFA and FM-SCM technique", OECC'98, 15A2-3, Chiba, July 1998.

山下 育男 (正員) 1965 年 10 月 27 日生。88 年 3 月大阪大学工学部通信工学科卒業。90 年同大学修士課程了。同年関西電力株式会社入社，現在に至る。光通信，光増幅の研究に従事。現在，同社総合技術研究所副主任研究員。電子情報通信学会会員。

青海 恵之 (正員) 1945 年 9 月 19 日生。69 年大阪大学工学部通信工学科卒業。74 年同大学博士課程了。同年日本電信電話公社茨城通信研究所入所。以来ミリ波線路，光線路の研究に従事。87 年立命館大学理工学部電気工学科教授。91 年関西電力株式会社入社。電子情報通信学会より 82 年度論文賞，85 年度業績賞を受賞。現在，同社総合技術研究所主席研究員。工博。OSA，電子情報通信学会，応用物理学会，各会員。

鈴木 拓也 (非会員) 富士通株式会社 第 2 ネットワークシステム統括部 第 2 ネットワーク部所属

加藤 智之 (非会員) 1970 年 1 月 8 日生。93 年 3 月日本大学理工学部電子工学科卒業。同年古河電気工業株式会社入社，現在に至る。光 CATV，光通信システムの研究に従事。現在，同社情報・電子研究所研究員。電子情報通信学会会員。

大村 英之 (正員) 1963 年 1 月 27 日生。85 年 3 月東海大学工学部電気工学科卒業。87 年同大学修士課程了。同年古河電気工業株式会社入社。88 年から 92 年まで (株) シーエーティブイ基盤技術研究所において双方向 CATV における通信システムの研究に従事。同年古河電気工業株式会社に復社し現在に至る。現在，同社情報・電子研究所システム機器研究室長。