

分散補償ファイバを用いた集中型ラマン増幅器

Raman Amplifier Using Dispersion Compensating Fiber

長松 信也*
Shinya Nagamatsu

Bera Pálsdóttir*²

平澤 壮史*³
Takeshi Hirasawa

藤崎 晃*
Akira Fujisaki

高岡 隆治*⁴
Ryuji Takaoka

式井 滋*
Shigeru Shikii

概要 光ファイバ通信の実用化から20年以上が経過しているが、常に新しい技術革新が進められている。インターネットの普及に伴い、DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) システムの導入が急速に進められてきている。近年の通信容量の飛躍的な増大に伴い、注目が集まっているのがラマンアンプであり、様々な実システムへの適用検討が進められている。その中の1つの重要な技術として、分散補償ファイバモジュール用のラマン増幅技術が挙げられる。今回、既存の光伝送装置にも増設付加可能な分散補償ファイバモジュールとラマンアンプ(制御回路内蔵)とを統合一体化させた結果について報告する。

1. はじめに

光ファイバ通信の実用化から20年以上が経過しているが、常に新しい技術革新が進められている。インターネットの普及に伴い、DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) システムの導入が急速に進められてきている。近年の通信容量の飛躍的な増大¹⁾に伴い、注目が集まっているのがラマンアンプ^{2,3)}であり、様々な実システムへの適用検討が進められている。ラマン増幅技術は1980年代に通信用の光増幅器の有力候補として盛んに研究開発されたが、実用レベルでは、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)が開発・実用化されたことにより、研究の域をでない状態となっていた。しかし、ビットレートが、2.5 Gb/sから10 Gb/s、更に40 Gb/sへと高速化する段階で、EDFAのみでのシステム設計が困難となり、伝送路自体を増幅媒体とする分布型ラマン増幅のメリットがあらためて認識されるようになってきた。最近では、伝送路の分散特性を最適化しつつ、ラマン増幅することが伝送容量と伝送限界を向上させるために不可欠な技術となっている。つまり、伝送容量を向上させるためには、分散特性の最適化技術(分散マネージメント)が非常に重要な技術となっている。

その中の1つの重要な技術として、分散補償ファイバモジュール用のラマン増幅技術が挙げられる。今回、既存の光伝送装置にも増設付加可能な分散補償ファイバモジュールとラマンアンプ(制御回路内蔵)とを統合一体化させることに成功したので、その結果について報告する。

2. 各種光ファイバの特性

図1に各種光ファイバのラマン利得係数とファイバ長との関係を示す。高非線形ファイバ(HNLF)、分散補償ファイバ(DCF)、逆分散補償ファイバ(RDF)、分散フラットファイバ(DFF)は、いずれもシングルモードファイバ(SMF)に比べて、ラマン利得係数が大きいことが分かる。特に、HNLFとDCFは短いファイバ長で高いラマン利得が得られることが分かる。また、図2は、SMF + DCFで分散補償した場合の1例である。これから分かるように、SMF + DCF線路は、現存のSMFをアップグレードして使用することができること、及びSMFの良い特性(低損失、低PMD、低コスト、低非線形、高局所分散等)を利用できることになり、大変有用な技術であることが分かる。しかしながら、欠点としては、DCFの損失が大きいこと、及びコイルとしてシステム装置の中に収納されるため、場所の容積が必要なことが挙げられる。

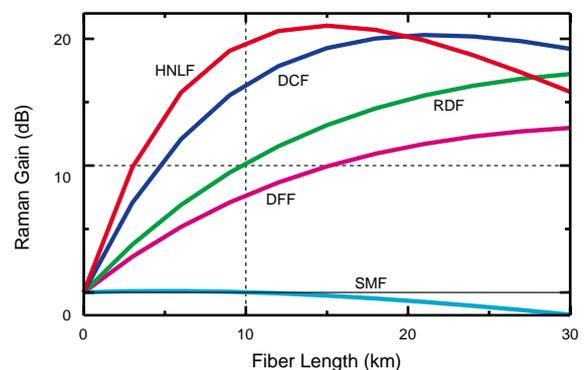


図1 各種ファイバのラマン利得とファイバ長との関係
Fiber length dependence of Raman gain of various fibers

* ファイテル製品事業部 開発部

² OFS Fitel Denmark I/S

³ エレクトロニクスコンポーネント事業部 サーマル製品部

⁴ オプトコム事業部

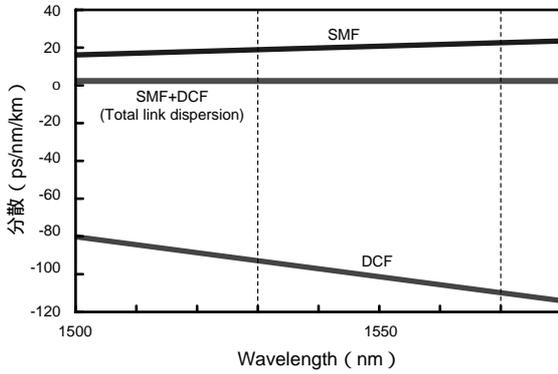


図2 SMF + DCFの波長と分散補償の関係
Wavelength dependence of dispersion compensation using SMF + DCF

表1 DCFの特性 (L-band帯域)
Characteristics of DCF for L-band

Item		value
Effective area: A_{eff} (μm^2)	at λ_c^*	25.8
	at λ_p^*	15.5
Loss coefficient: α (dB/km)	at λ_c	0.4
	at λ_p	0.4
Dispersion (ps/nm/km)	at λ_c	-152
Dispersion slope (ps/nm ² /km)	at λ_c	-0.4
PMD (ps/km ^{1/2})	at λ_s to λ_p	0.1
Reyleigh scattering coefficient (1/m)	at λ_c	0.2×10^{-5}

(* $\lambda_c = 1590 \text{ nm}$, $\lambda_p = 1470 \text{ nm}$)

3. 分散補償ファイバの特性改善

前述したように、欠点として挙げられた2点の問題点の解決が重要であり、それを解決すれば、非常に有用な技術といえる。まず、我々は、DCF自体の特性改善検討を行なった。改善したDCFの特性を表1に示す。これから分かるように、今回改善したDCFは損失を、増幅帯域 (1470 nm)、信号帯域 (1590 nm) 共に、0.4 dB程度に抑えることができています。

また、ラマン増幅を検討した場合には、励起帯域の損失とレイリー散乱係数が重要な因子となる。励起帯域の損失はそのままラマン増幅効率に直結する因子であり、また、レイリー散乱係数はダブルレイリー後方散乱ノイズ (Multi-Path Interference noise: MPI等) が問題となるため、できるだけ低いことが求められている。

このレイリー散乱係数も、 0.2×10^{-5} (1/m) とSMFの値 0.1×10^{-5} (1/m) に近いレベルまで改善できていることがわかる。

4. ラマン光源の設計

以上のようなDCFの改善を背景にして、できるだけ簡易なラマン光源の設計を行なった。

図3に今回用いた光学構成図を示す。

今回用いた励起光源は、各波長1個の2励起レーザーダイオードモジュール (LDM) を使用する2波長の構造とした。ま

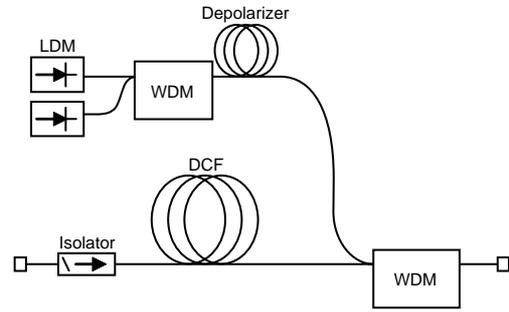


図3 光学構成図
Optical configuration

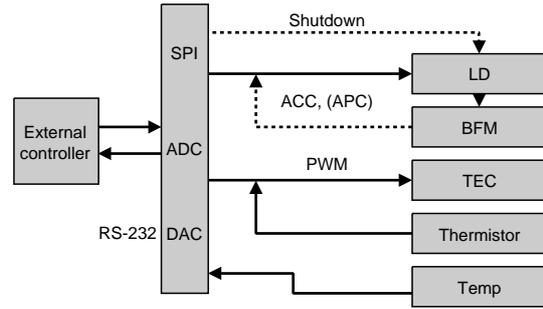


図4 制御ブロック図
Block diagram of control system

た、用いたラマンモジュールは、DCFスプール内部に完全収納する構造とし、ラマンモジュールを付加することで新たな設置場所を必要としない構造とした。

そのため、DCF収納スペースをそのまま利用することを考慮して、ラマンモジュールが自立制御できるように制御機能を付加させた。

ラマンモジュールの制御ブロック図を図4に示す。

これから分かるように、ラマンモジュールは、制御回路を内蔵し、かつ、消費電力を低減するため、PWM (Pulse Width Modulation) 制御を用いアンプの低消費電力化を実現している。

また、通信制御用のインターフェイスは、SPIバス (Serial Peripheral Interface) とRS232の両方を装備している。

これは、簡易にパーソナルコンピュータで制御可能なRS232と実際に既存の伝送装置に組み込まれた場合、伝送装置内部での通信制御に対応できるSPIバスに対応したものである。

ラマン光源単体を図5に、内部の状態を図6に示す。

ラマン光源単体は、円形状をしており、そこから、通信制御用のインターフェイスが出る構造となっている。

制御は、ACC (Auto Current Control), APC (Auto Power Control) の2種類で行なうことができる。

また、異常検出遮断用のシャットダウン機能も有している。

最終的な分散補償ファイバ型ラマンアンプ完成状態を図7に示す。

これから分かるように、完全にラマン光源が分散補償ファイバモジュールの中に埋め込まれている。この結果、従来の伝送装置内の分散補償ファイバモジュールの設置スペースを拡張することなく、ラマン光源を追加することができている。

5. 分散補償ファイバ型ラマンアンプ特性評価

上述のラマンアンプを用いて、特性評価を実施した。

今回の評価では、分散スロープ補償ファイバ (Dispersion and Slope Compensating Fiber) に対して、1430 nm, 1455 nm の2波長の励起光源を用いて特性評価を実施した。

図8に、NZ-DSF (TrueWave®) 及びSMF補償距離125 km, 入力パワー5 dBmとした場合のGainに対する雑音指数 (NF:



図5 ラマン光源単体
Appearance of pumping laser module



図6 ラマン光源単体内部
Internal view of pumping laser module



図7 分散補償ファイバ型ラマンアンプ
Appearance of Raman amplifier module integrating DCF

Noise Figure), MPIの検討結果を示す。NZ-DSF補償の場合、Gainが0 dBのレベルでMPIが-50 dBであり、SMF補償の場合は、Gainが-1dBレベルでMPIが-45dBであった。

特に、NZ-DSF 125 km補償の場合、完全にロスレス (Gain 0 dB以上) をMPI - 50 dBできていることが分かる。

また、図9に相対雑音強度 (RIN: Relative Intensity Noise) の測定結果を示す。

LDM4個に対しての測定結果では、周波数帯域200 kHz以上において - 130 dB/Hz以下の安定した結果が得られた。この結果から、制御回路のノイズ対策に問題が無いことが検証された。

表2に前出の条件であるNZ-DSF 125 km補償, Gain 0 dBでの消費電力測定結果を示す。

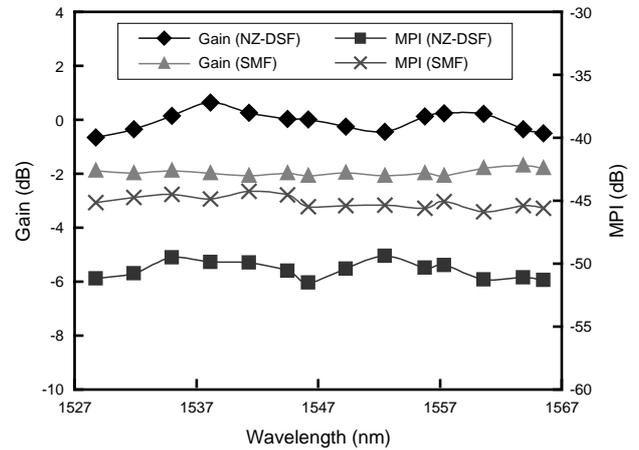


図8 ラマンアンプ特性評価結果
Measured characteristics of Raman amplifier

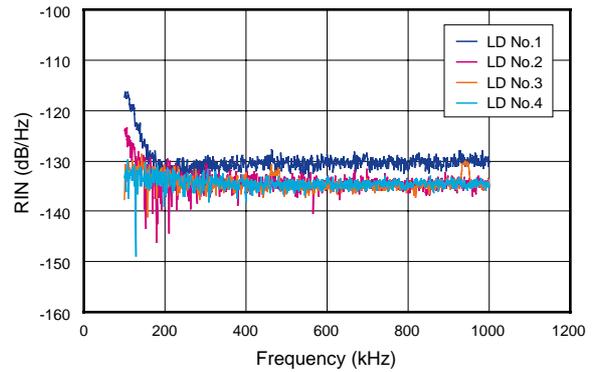


図9 相対雑音強度と周波数との関係
Relationship between RIN and frequency

表2 消費電力量測定結果
Measured power consumption of Raman amplifier

	LDM No.	Operating current	Power consumption
Case1	No.1	416 mA	9.27 (W)
	No.2	404 mA	
Case2	No.3	435 mA	9.93 (W)
	No.4	422 mA	

TrueWave は OFS Fitel 社の商標です

本モジュールは、従来、ラマン光源を取り付けることを想定していない場所に設置されているものであるため、ラマン光源自体の発熱量ができるだけ小さいことが強く求められている。そのため、最も電力量を消費するLDMのペルチェモジュールの駆動をパルス方式（PWM）とした。その結果として表2から分かるように、10 W以内で制御できている。

6. まとめ

分散補償ファイバ単体の損失を大幅に改善（伝送損失0.4 dB/km）した。更に、分散補償ファイバモジュールとラマンアンプ（制御回路内蔵）とを統合一体化させることに成功した。

その結果、125 km補償距離で、NZ-DSF及びSMFいずれの場合も実使用に耐えることを確認した。

特に、NZ-DSF 125 km補償の場合、ロスレス（Gain 0 dB）状態をMPI値 - 50 dB以下で達成することができた。本技術は、既存の伝送装置のアップグレードを容易にすると共に、分散補償ファイバの挿入損失を考慮することなく伝送設計ができるメリットを有していると考える。

今後、更なる特性改善を進め、様々なニーズに対応していく。

参考文献

- 1) Shimojoh et al.: ECOC2001, Th. M. 4. 8
- 2) Emori et al.: OFC'99, PD19
- 3) Namiki: ECOC2001, We.M. 2. 1
- 4) L. Grüner-Nielsen et al.: OFC2002, WU1
- 5) 長松 他：電子情報通信学会通信ソサエティ大会（2002）,B-10-119
- 6) 長松 他：電子情報通信学会総合大会（2003）,B-10-152