双方向励起方式によるラマンアンプの雑音指数スペクトル設計

Design of Noise Figure Spectrum of Raman Amplifiers Using Bi-Directional Pumping

江森芳博* 門 想子* 並木 周* Yoshihiro Emori Soko Kado Shu Namiki

概 要 従来の波長多重励起ラマン増幅器では,後方励起方式が通常用いられる構成であった。こ れは,前方励起と比較すると利得の飽和が起きにくく,励起光の強度雑音が信号光に重畳される現象 も起きにくいという理由からであった。しかしながら,後方励起方式では,広い帯域にわたって利得 の平坦化を図ると,雑音指数の波長依存性が顕著になるという問題があった。本報告では,5つの励 起波長を用いた広帯域ラマン増幅器において,短波長側の3波長のみを双方向励起にする構成を例に とり,双方向励起を用いることによって利得スペクトルと雑音指数スペクトルが独立に設計可能とな ることを示す。

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, 常に新しい技術が開発され続け,伝送容量と伝送距離の限界を 打ち破っている。数年前にはエルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA)を用いた波長多重伝送方式(WDM)が長距離大容量 伝送の主要技術であったが,最近では,伝送路の分散特性を最 適化しつつラマン増幅を利用することが記録更新のために不可 欠な技術となっている1)~4)。ラマン増幅は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されていたが,実用レベ ルのEDFAが出現したことにより、しばらくの間は注目度が低 くなっていた。しかしながら,ビットレートが10 Gb/sから40 Gb/sへと高速化する段階で, EDFAのような集中型光増幅器 のみではシステム設計が困難になり、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 になった。また,励起光源として信頼性の高い半導体レーザー を用いて広帯域かつ十分な利得を得ることができる波長多重励 起方式が提案されたことも,ラマン増幅の利用を広めた理由で あるといえる。

従来の波長多重励起ラマン増幅器では,後方励起方式が通常 用いられる構成であった。これは,前方励起と比較すると利得 の飽和が起きにくく,励起光の強度雑音が信号光に重畳される 現象も起きにくいという理由からであった^{9,6}。しかしながら, 後方励起方式では,広い帯域にわたって利得の平坦化を図ると, 雑音指数の波長依存性が顕著になるという問題があった⁷⁾。本 報告では,5つの励起波長を用いた広帯域ラマン増幅器におい て,短波長側の3波長のみを双方向励起にする構成を例にとり, 双方向励起を用いることによって利得スペクトルと雑音指数ス ペクトルが独立に設計可能となることを示す。

* ファイテルフォトニクス研究所 光サプシステム開発部 光伝送グル ープ

2. ラマン増幅の原理

図1にラマン散乱の模式図を示す。このモデルは仮想的な電 子準位と実在するフォノンのエネルギー準位を組み合わせて表 現されている。入射光がラマン散乱されるときには,分子のフ ォノンが励起され,入射光自身のエネルギーが減少する。その 結果、フォノンのエネルギー分だけ周波数の低い光となって散 乱される。散乱光と同じ周波数の光が同時に入射されていると きには, ラマン散乱が誘導的に起こるため, 光増幅が実現され る。図1において,励起光は電子を仮想準位へ励起しているが, この準位は安定でないので,電子はすぐさま基底準位に戻る。 また,上準位が仮想的なので,信号光に対する吸収はほとんど 起こらない。このため,励起光が減少するとラマン散乱の起こ る確率が減り,利得は小さくなるのだが,励起光が少なくても 吸収媒質として働くことにはならない。したがって、ラマン増 幅では励起光強度に関係なく常に低雑音増幅プロセスが実現で きる。このことは,十分な反転分布状態を作らないと信号光が 吸収されて雑音特性が悪くなるEDFAのそれとは大きく異な



図1 ラマン散乱のモデル Schematic diagram of Raman scattering



図2 1510 nm で励起したラマン利得効率 Raman gain efficiency measured by using a 1510-nm pump



Schematic configuration of Raman amplifiers

る。

図2は通常のシングルモードファイバ(SMF),分散シフト ファイバ(DSF),分散補償用ファイバ(DCF)を1510 nmで 励起した場合のラマン利得効率を示したものである。横軸は励 起光の周波数を基準とした相対周波数,縦軸は無偏光の励起光 を使用した場合のラマン利得効率の値である。定性的には,横 軸がフォノンのエネルギーに対応し,縦軸が散乱確率に対応す る。シリカ系の光ファイバでは,約13 THzの周波数シフトで 利得効率が最大となる。また,ゲルマニウムのドープ量が多い ほど,有効コア断面積が小さいほど効率がよい。効率のピーク 値は励起波長によって変わるが,図2の形状は,励起波長が異 なっていてもほぼ同様に得られる。したがって,ある励起波長 で図2のような特性を測定しておけば,任意の励起波長から生 じる利得の波長特性を予測することができる。

3. 波長多重励起ラマン増幅器

図3にラマン増幅器の構成例を示す。基本的には,一本の増 幅用ファイバに励起光と信号光を入射し,ファイバ中で生じる 誘導ラマン散乱を利用して光増幅を行うように構成する。図3 では,励起光が増幅用ファイバ中を双方向に伝搬する構成を示 しているが,信号光に対して同方向(前方励起)又は逆方向 (後方励起)のみを用いる構成もある。一般に,前方励起は光 SNR(信号対雑音比)を高く維持することができ,後方励起は 飽和出力パワーを大きくできる。ラマン増幅器の場合には,光 増幅のプロセスが非常に高速であるため,前方励起に用いる励 起光の強度雑音が十分小さくないと,励起光の雑音が信号光に 重畳されて伝送エラーが増加するという問題がある。このため,



図4 波長多重励起による利得平坦化の原理 Principle of creating flat Raman gain by multi-wavelength pumping scheme

多くの場合は後方励起のみを用いている。

波長多重励起方式によるラマン利得の平坦化の様子を図4に 示す。この例では5つの励起波長を用いている。各励起波長か ら生じる利得曲線が太線で示されており,そのうちの短波長側 の4つの利得曲線を足し合わせたものが曲線Aで示されてい る。また,5つの太線をすべて足し合わせると曲線Cになる。 曲線Bは一番長い励起波長によって生じるラマン利得曲線であ り,曲線AとBがかみ合うように調整することによって,トー タル利得を曲線Cのように平坦にすることができる。1波励起 のラマン利得スペクトルは利得ピークよりも短波長側にはリッ プルがなく,利得ピークよりも長波長側にはリップルが存在す る。このため短波側の励起光が作り出す利得スペクトル(曲線 Aに相当)にはリップルが生じ易い。このリップルを小さくす るためには,多重数を増やして1波当たりの利得を小さくする, 励起光を等周波数間隔で配置する,各波長による利得を同じく らいの大きさにすることが有効である。

4. 雑音指数の波長依存性

EDFA やラマン増幅器のような,誘導放出や誘導散乱が増幅 原理となっている光増幅器では,信号光の存在の有無に関わら ず自然放出や自然散乱が発生してしまう。これらの光は増幅用 ファイバの中を伝搬しながら信号光と同様に増幅されて, 増幅 器から出力される。これを, 増幅された自然放出光 (ASE) と 呼んでいる。ASEは,信号がない時間スロットではゼロレベル を上昇させ,信号があるスロットでは信号光と干渉して強度ゆ らぎを生じさせる。このように,光増幅器内部で発生したASE が,信号光の検出に対して不確定な要因(雑音)となる現象を 定量的に定義したものが光増幅器の雑音指数(NF)であり, 増幅器入力前の信号対雑音比(SN比)を分子に,増幅器出力 におけるSN比を分母とした値で定義される。増幅器出力では SN比が悪くなる(小さくなる)ので,NFは1よりも大きな値, デシベルでは正の値となる。通常は,増幅器出力におけるSN 比を決める主要因はASEによる雑音であり、増幅器に入力さ れる光の雑音はショット雑音のみであると仮定してNFを算出 する。

5つの励起波長を後方励起方式で用いた場合のラマン利得と 雑音指数の一例を図5に示す。ここでは,分布型増幅器を想定 し,増幅用ファイバとして80 kmのSMFを用いたシミュレー



図5 後方励起方式によるラマン利得と雑音指数 Raman gain and noise figure spectra by counter-pumping



図6 後方励起された増幅用ファイバに沿った信号光パワーの 変化

Signal power excursion along the amplifier fiber with counter-pumping

ション結果を示した。ラマン利得を平坦化するように励起パワ ーを調整することで,0.5 dBの平坦度が得られている。しかし ながら,NFの平坦度は2.3 dBと大きく,特に短波長側のNF が長波長側と比較して著しく悪くなっている。

図5 に示した NFの波長依存性の理由を考察するために,増 幅用ファイバの長手方向で信号光のパワーが変化する様子を図 6 に示す。すべての信号が同じパワーでファイバに入射され, ほぼ同じ大きさで出力されているのだが,距離60 km前後の位 置に存在する信号レベルの最低値が波長によって大きく異なっ ている。この増幅器では,その最低パワーの地点までは損失媒 体となっており,その損失に比例して信号のSN比は悪くなり, そこからファイバ出力までの間で,ASEによるSN比劣化が起 こると解釈できる。したがって,最低レベルに至るまでの損失 とその先の増幅器の雑音特性が持つ波長依存性の組み合わせに より,NFの波長依存性が生じている。ただし,図6における 最低レベルの波長依存性の値が約2 dBであることから,これ が図5におけるNFの波長依存性の支配的な要因と考えられる。

NFの波長依存性の要因として以下の4つが考えられる。

- 1. ファイバロスの波長依存性
- 2. 信号間ラマン効果による吸収と増幅
- 3. 励起光間ラマン効果による励起パワー(利得)分布の差
- 4. 自然散乱光発生効率の温度依存性

2は短い波長の信号光が長い波長の信号光に対してラマン増幅の励起光となることから,短い波長ほどエネルギーを奪われ



図7 短波長側のみを双方向励起にした波長多重励起ラマン増 幅器の模式図 Schematic drawing of a multi-wavelength and bi-

directional pumped Raman amplifier



図8 短波長側のみを双方向励起にした波長多重励起ラマン増 幅器の波長特性 Wavelength characteristics of a multi-wavelength and bidirectional pumped Raman amplifier

て急速に減衰することを指している。3は信号間ラマン効果と 同様に 励起光間のラマン効果によるエネルギーの授受により, 短波長側の励起光の減衰が激しくなるため,短波長側の信号光 に対する増幅がファイバ出力端に近い領域に限定されることを 指している。4は自然散乱光発生効率の波長依存性が温度によ って異なることに起因するもので,常温では励起光に近い波長 の自然散乱が著しく大きくなるという特性によるものである。 最低レベルの波長依存性は上記1から3によるものである。

5. 双方向励起を用いた雑音指数スペクトルの設計

図5に示す波長依存性を改善するために,図7に示すような 双方向励起方式による設計を試みた。原理的には,前方励起を 用いることで増幅器の入射端付近で起こっているSN比劣化を 抑え,増幅器全体としてのNFを改善しようとするものである。 ただし,その改善効果に波長依存性を持たせ,短波長側の信号 に対する改善効果がより大きくなるようにすることを期待し て,短波長側の励起光のみを双方向励起にする構成とした。

短波長側の3波長を双方向励起とした場合のラマン利得と雑 音指数の一例を図8に示す。励起波長と増幅用ファイバは図5 と同じ条件でシミュレーションした。前方励起による利得に波 長依存性を持たせることで,図中に示すような平坦なNFスペ クトルが得られた。このとき,後方励起のパワーはラマン利得 を平坦に保つように減少させて利得とNFの両方を同時に平坦 化した。

NFが平坦化されたときに,増幅用ファイバの長手方向に対 する信号光の変化がどのようになっているかを図9に示す。フ



図9 双方向励起された増幅用ファイバに沿った信号光パワー の変化

Signal power excursion along the amplifier fiber with bidirectional pumping



図10 NFスペクトル制御のシミュレーション結果 Simulation results of NF spectrum control



図11 NFスペクトル制御の実験結果 Experimental results of NF spectrum control

ァイバの入出力端におけるレベルは図6と同じであるが,距離 60 km前後の位置に存在する最低値がどの波長に対してもほぼ 同じくらいになっている。その結果,NFの波長依存性が低減 され,平坦度の良いNFスペクトルが得られたのである。

図10は前方励起のパワーを更に大きくした例である。この 例では、トータルのラマン利得の平坦度を保ちながら、前方励 起による利得を増加させることによって、短波長側のNFが長 波長側のNFよりも小さいNFスペクトルを実現している。こ のように、波長多重かつ双方向の励起方式を用いることで、利 得とNFのスペクトルを任意に独立な形に制御することができ る。ただし、前方励起による利得を大きくすると、図9に示さ

表1 実験に使った励起光のパワー Pump power conditions in the experiments

	Wavelength	Backward	Flat NF		Tilted NF	
			Forward	Backward	Forward	Backward
λ_1	1426.2 nm	149 mW	31 mW	96 mW	78 mW	32 mW
λ_2	1438.5 nm	161 mW	36 mW	108 mW	54 mW	78 mW
λ_3	1451.8 nm	91 mW	22 mW	65 mW	45 mW	26 mW
λ_4	1466.0 nm	83 mW		105 mW		100 mW
λ_5	1495.2 nm	184 mW		206 mW		210 mW
Total power		668 mW	668 mW		623 mW	

れているように,比較的長距離にわたって信号のレベルが高い 状態が続くことになる。これは,非線形効果の影響を大きく受 けることを意味しているので,それによる伝送品質の劣化が問 題にならないように配慮する必要がある[®]。

6. 実験結果

双方向励起方式による利得,NFスペクトル独立制御の実証 実験を行った結果を図11に示す。使用した増幅用ファイバは SMF 76 kmで,約25 kmのスプールを融着接続している。フ ァイバに入射された励起パワーは表1のとおりである。図11 に示されているように,ほぼ同様なラマン利得スペクトルを維 持しながら,様々なNFスペクトルが実現されている。ラマン 利得が維持されているため,励起パワーのトータルはほとんど 変化していない。短波側の3波長については,前方励起のパワ ーを増加させるのに対応して,後方励起のパワーを減少させて いる。一番長い励起波長については,同方向に伝搬する短波長 側の励起パワーが減少することで励起光間ラマン効果も減少す るため,前方励起のパワーを増加させるにつれて,励起パワー を増加させなければならなくなっている。

7. おわりに

ラマン増幅が長距離大容量伝送の主要技術として注目される ようになり,広帯域ラマン増幅器に対して,一段と高いレベル の特性が要求されようとしている。これまで我々は,利得プロ ファイルの制御・平坦化のみに注目した開発を行ってきたが, 雑音特性の広帯域化が次の課題であると考え,双方向励起方式 の検討を行った。本報告では,波長多重かつ双方向の励起方式 を用いることで,利得とNFのスペクトルを任意に独立な形に 制御することができることをシミュレーションと実験により実 証した。

参考文献

- G. Charlet, J.-C. Antona, S. Lanne, P. Tran, W. Idler, M. Gorlier, S. Borne, A. Klekamp, C. Simonneau, L. Pierre, Y. Frignac, M. Molina, F. Beaumont, J.-P. Hamaide, S. Bigo, "6.4 Tb/s (159×42.7Gb/s)capacity over 21×100 km using bandwidthlimited phase-shaped binary transmission," Proc. European Conference on Optical Communication,(2002), PD Paper 4.1.
- 2) B. Zhu, L. Leng, A. H. Gnauck, M. O. Pedersen, D. Peckham, L. E. Nelson, S. Stulz, S. Kado, L. Gruner-Nielsen, R. L. Lingle, Jr., S. Knudsen, J. Leuthold, C. Doerr, S. Chandrasekhar, G. Baynham, P. Gaarde, Y. Emori, and S. Namiki, "Transmission of 3.2 Tb/s

_____ 13 _____

(80×42.7 Gb/s)over 5200 km of UltraWaveTM fiber with 100km dispersion-managed spans using RZ-DPSK format, "Proc. European Conference on Optical Communication,(2002), PD Paper 4.2.

- 3) D. F. Grosz, A. Agarwal, S. Banerjee, A. P. Kung, D. N. Maywar, A. Gurevich, T. H. Wood, C. R. Lima, B. Faer, J. Black, C. Hwu, "5.12Tb/s(128 × 42.7 Gb/s)transmission with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency over 1280 km of standard single-mode fiber using all-Raman amplification and strong signal filtering," Proc. European Conference on Optical Communication,(2002), PD Paper 4.3.
- 4) C. Rasmussen, S. Dey, F. Liu, J. Bennike, B. Mikkelsen, P. Mamyshev, M. Kimmitt, K. Springer, D. Gapontsev, V. Ivshin, "Transmission of 40×42.7 Gbit/s over 5200 km UltraWave[®] fiber with terrestrial 100 km spans using turn-key ETDM transmitter and receiver," Proc. European Conference on Optical Communication,(2002), PD Paper 4.4.
- 5) C. R. S. Fludger, V. Handerek, and R. J. Mears, "Pump to Signal RIN Transfer in Raman Fiber Amplifiers," J. Lightwave Technology, Vol. 19, No. 8,(2001), pp. 1140-1148.
- 6) K. Song, and S. D. Dods, "Cross Modulation of Pump-Signals in Distributed Raman Amplifiers, Theory and Experiment," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 11,(2001), pp. 1173-1175.
- 7) C. R. S. Fludger, V. Handerek, R. J. Mears, "Fundamental noise limits in broadband Raman amplifiers," in Optical Fiber Communication Conference, (2001), Paper MA5.
- 8) R. J. Essiambre, P. Winzer, J. Bromage, and C. H. Kim, "Design of bidirectionally pumped fiber amplifiers generating double Rayleigh backscattering," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 7, (2002) pp. 914-916.