第12回

光増幅器(1)

2014年1月7日(火)



光増幅器技術

6-1 光増幅器の雑音

- 6-2 ASE雑音によるSN比と伝送限界
- 6-3 光ファイバ増幅器の種類

光ファイバの伝送損失と対応する光ファイバ増幅器



光ファイバ増幅器の構成

2013年度



2013年度 光通信システム Cバンド動作EDFSAとEDFFAのASEスペクトル

·A1共添加EDSFA:1.54µm~1.56µmの利得平坦動作、利得平坦度0.5dB以下

·EDFFA: 1.53µm~1.56µmの利得平坦動作、利得平坦度1.5dB程度

半導体光増幅器(SOA)の基本構成 光通信システム

2013年度



2013年度 光通信システム Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

K. Morito, M. Ekawa, T. Watanabe, and Y. Kotaki, IEEE J. Lightwave Technol., vol.21, No.1, pp.176-181 (2003).

・伸長歪みバルク活性層による偏波無依存化 ・光閉じ込め係数低減による飽和光出力増大



光増幅器の雑音

光増幅器の雑音特性(1)

n個の光子数を持つ状態 n>と n+1>, n-1>間の遷移図



a=AFN₂:誘導放出の遷移確率=自然放出確率 b=AFN₁:誘導吸収の遷移確率 ただしA:アインシュタインのA係数 N₁:下準位の密度 N₂:上準位の密度

n個あった光子数がn+1個に増える確率は、a+an n+1個からn個になる確率は、b(n+1) 従って、光子数がn個になる存在確率P_n(t)の時間変化は以下の方程式で表される。

 $\frac{dP_n(t)}{dt} = -[a(n+1)+bn]P_n(t) + [a(n-1)+a]P_{n-1}(t) + [b(n+1)]P_{n+1}(t)$ (6.1)

光増幅器の雑音特性(2)

光子数の平均値<n>,2乗平均値<n²>は $P_n(t)$ を用いて表現される光子数の k次モーメント<n^k>= $\Sigma n_k P_n$ においてk=1,2の場合であるから、式(6.1)より

$$\frac{d < n >}{dt} = (a - b) < n > +a$$
(6.2)
$$\frac{d < n^{2} >}{dt} = 2(a - b) < n^{2} > +(3a + b) < n > +a$$
(6.3)

ーつのモード当たりの入射信号光子数に対応する初期条件 $<n(0)>=<n_0>, <n^2(0)>=<n_0^2>で解くと、$

 $<n>=<n_0>exp[(a-b)t]+n_{sp}{exp[(a-b)t]-1}$ (6.4)

$$- exp[(a-b)t] + n_{sp} \{exp[(a-b)t] - 1\} + 2n_{sp} \{exp[(a-b)t - 1\} < n_{0} > exp[(a-b)t] + n_{sp}^{2} \{exp[(a-b)t] - 1\}^{2} + exp[2(a-b)t](-^{2} -)$$
(6.5)

光増幅器の雑音特性(3)

ただし、
$$n_{sp} = \frac{a}{a-b} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$$
 :反転分布パラメータ or
自然放出光係数
exp[(a-b)t] : 単一通過の利得Gと等価
式(6.4)、(6.5)をすべてのモードに対する和を取る。
入射光に対する和
 $^2 \rightarrow ^2$
 2
 $$ 入射光の全スペクトル領域の和を取る。
ただし入射光は単一モードの条件。

入射光の全スペクトル領域の和を取る。 ただし入射光は単ーモードの条件。 <n_{in}>:全入射光子数の平均値

自然放出光に対する和

・利得媒質の等価的な周波数帯域幅(波長フィルタを $n_{sp} \rightarrow n_{sp} m_t \Delta f$ 使用する場合はその帯域幅)∆f ・導波される横モードの総数m_t(直交偏波を含む)

光増幅器の雑音特性(4)

- ・式(6.5)中の第3項 $n_{sp} < n_0^{>} \rightarrow 自然放出光と信号光の各モードが一致している 前提なので、<math>n_{sp} < n_{in}^{>}$ とする。
- ・式(6.5) 中の第4項 $n_{sp}^2 \rightarrow -$ つのモードの自乗和なので、 $n_{sp}^2 m_t \Delta f$ とする。

以上から、光増幅器出力端での平均光子数 $<n_{out}>$ と分散 $\sigma_{out}^2(<n_{out}^2>-<n_{out}>^2)$ は、

光増幅器による 伝送特性・限界

光前置増幅器による最小受信感度の改善

2013年度

光通信システム



^{2013年度} 光通信システム 光前置増幅器による最小受信感度の改善(解析例)

NRZ, 300K, η_i =0.8, R_L =50 Ω



光前置増幅器によるSNR改善効果(1)

<mark>光増幅器(OAMP)の有無によるSNRの比較</mark>(増幅G+伝送損失L)



熱雑音が支配的のとき



光前置増幅器によるSNR改善効果(2)



SNRを考慮した長距離伝送設計(1)

2013年度

光通信システム



SNRを考慮した長距離伝送設計(2)

① 信号光のショット雑音

 σs , shot²

$$=\{2e \cdot e\eta i(\frac{Ps}{\hbar\omega})(\frac{B}{2})\}G_{0}(\underline{A_{1}G_{1}})(\underline{A_{2}G_{2}})\cdots(\underline{A_{n}G_{n}})$$

1スパンの損失×増幅を各スパンで繰り返す

② ASEのショット雑音

 $\sigma sp, shot^2$

$$=\{2e \cdot e\eta inspm_{i}Bopt(\frac{B}{2})\}[(\underline{G_{0}-1})(A_{1}G_{1})(A_{2}G_{2})\cdots(A_{n}G_{n})+(G_{1}-1)(A_{2}G_{2})(A_{3}G_{3})\cdots(A_{n}G_{n})+\cdots \\ (G_{n-1}-1)(A_{n}G_{n})+(G_{n}+1)] \\ \underbrace{\textbf{Z}(\mathbf{Y} \cup \#1\mathbf{C} \mathbf{\hat{\mathcal{H}}} \mathbf{\underline{f}} \mathbf{\underline{f}}} \mathbf{\underline{f}} \mathbf{\underline{f$$

SNRを考慮した長距離伝送設計(3)

③ 信号光とASEのビート雑音 $\sigma s - sp^2$ $=\{2e\eta_i(\frac{Ps}{\hbar\omega})\}(2e\eta_i n_{sp})(\frac{B}{2})$ $\times [(G_0A_1G_1A_2G_2\cdots A_nG_n)(G_0-1)A_1G_1A_2G_2\cdots A_nG_n]$ + $(G_0\overline{A_1G_1A_2G_2\cdots A_nG_n})(G_1-1)A_2G_2\cdots A_nG_n$ + ... + $(G_0A_1G_1A_2G_2\cdots A_nG_n)(G_{n-1}-1)A_nG_n + (G_0A_1G_1A_2G_2\cdots A_nG_n)(G_n-1)]$ スパン#1~#nまで Goで発生したASEが 以下、各スパン 損失×増幅を繰り返す 次段以降損失×増幅を繰り返す ⌒ごとに計算し、加算 信号光成分 成分

SNRを考慮した長距離伝送設計(4)

- ④ ASE間ビート雑音 $\sigma_{SP} - sp^{2}$ $= \{2e\eta_{i}n_{Sp}\}^{2}m_{t}B_{opt}(\frac{B}{2})$ ×[$\{(G_{0}-1)A_{1}G_{1}A_{2}G_{2}\cdots A_{n}G_{n}\}+\{(G_{1}-1)A_{2}G_{2}\cdots A_{n}G_{n}\}+\dots+\{(G_{n-1}-1)A_{n}G_{n}\}+(G_{n}-1)]^{2}$ G_{0} で発生したASEが 次段以降で損失×増幅を繰り返す成分
 - ⑤ 熱雑音

$$\sigma_{th} = \frac{4kT}{RL}(\frac{B}{2})$$

2013年度 SNRを考慮した長距離伝送設計(5) 光通信システム $\mathbf{t} \mathbf{G}_1 = \mathbf{G}_2 = \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} = \mathbf{G}_n, \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} \mathbf{\cdot} = \mathbf{A}_n,$ $A_1 G_1 = A_2 G_2 = \bullet \bullet \bullet \bullet = A_n G_n = 1$ と仮定すると、 信号光成分 $(e\eta i \frac{P_s}{\hbar\omega})G_0$ 雑音成分 $\sigma tot^2 = \sigma s, shot^2 + \sigma sp, shot^2 + \sigma s - sp^2 + \sigma sp - sp^2 + \sigma_{th}^2$ ① 信号光のショット雑音 $\sigma s, shot^2 = \{2e \cdot e \eta i(\frac{Ps}{h c})(\frac{B}{2})\}G_0$ ②ASEのショット雑音 $\sigma_{sp,shot}^2 = \{2e \cdot e \eta_i n_{sp} B_{opt}(\frac{B}{2})\}[(G_0 - 1) + n_j G_1 - 1)]$ ③信号光とASEのビート雑音 $\sigma_{s-sp}^{2} = \{2e\eta_{i}(\frac{P_{s}}{\hbar\omega})\}(2e\eta_{i}n_{sp})(\frac{B}{2})G_{0}[(G_{0}-1)+n_{sp}](G_{1}-1)]$ $\sigma_{sp-sp}^{2} = \{2e\eta_{i}n_{sp}\}^{2}B_{opt}(\frac{B}{2})[(G_{0}-1)(G_{1}-1)]^{2}$ ④ ASE間ビート 雑音 $\sigma_{th}^{2} = \frac{4kT}{R_{L}}(\frac{B}{2})$ ⑤ 熱雑音

SNRを考慮した長距離伝送設計(6)

信号光ーASE間ビート雑音が支配的のとき、 $\sigma_{tot}^{2} = \sigma_{s,shot}^{2} + \sigma_{sp,shot}^{2} + \sigma_{s-sp}^{2} + \sigma_{sp-sp}^{2} + \sigma_{th}^{2}$ $\cong \sigma_{s-sp}^{2} = \{2e\eta_{i}(\frac{P_{s}}{\hbar\omega})\}(2e\eta_{i}n_{sp})(\frac{B}{2})G_{0}[(G_{0}-1)+n(G_{1}-1)]$ $\therefore SNR = \frac{4 \cdot \{e\eta_i(\frac{Ps}{\hbar\omega})G_0\}^2}{\{2e\eta_i(\frac{Ps}{\hbar\omega})\}\{2e\eta_i n_{sp}\}(\frac{B}{2})G_0[(G_0-1)+n(G_1-1)]}$ $\frac{2P_sG_0}{\hbar\omega n_{sp}B[(G_0-1)+n(G_1-1)]} \cong \frac{2P_sG_0}{\hbar\omega n_{sp}B[G_0+nG_1]}$ (6.8)

BER<10⁻⁹を満たすときSNR>144 (21.6dB)なので、最大中継段数nが 求まる。

ただし実際は他の雑音成分の影響も考慮しないといけない。

雑音指数

雑音指数:Noise Figure (NF)

$$NF = \frac{SNin}{SNout}$$

$$\approx 2\frac{G-1}{G}nsp$$

$$\approx 2nsp$$

$$\sum$$

$$n_{sp} > 1だからNF > 2 (3dB)$$
増幅後のSN比は入力に
対して必ず3dB以上劣化

多段接続時のSNR変化



SNRを考慮した長距離伝送設計(解析例)

計算結果



光増幅器による伝送距離の長距離化

