

位相感応型光増幅技術の研究

1. まえがき

基幹光ファイバ増幅中継伝送系の再生中継間隔の制約要因に、S/N比の劣化、パルス波形劣化による符号間干渉などがある。光パラメトリック増幅(OPA)を利用する位相感応型光増幅器(PSA)は、信号光のS/N比劣化の抑圧効果、光パルスの波形整形効果が期待できるため、中継増幅器として適用することにより再生中継間隔を延伸できる可能性がある[1]。PSAでは、OPAの励起光と信号光の平均光位相を同期する必要があるが、励起光源の光位相雑音等のために、光位相誤差が生じる。この光位相誤差は、各中継PSAに生じるため、中継区間毎に雑音の形で累積してしまう。この励起光-信号光位相誤差による雑音累積特性はほとんど検討されていない。本報告では、PSA多中継伝送系において、各PSAの励起光-信号光位相誤差の累積による符号誤り率劣化について数値計算により検討した結果を示す。

2. シミュレーション方法

n 段目の PSA の出力光信号の複素振幅 $\phi_n(t)$ を、基準位相成分 $I_n(t)$ とその直交位相成分 $Q_n(t)$ に分ける。これらは、 $n-1$ 段目の出力光の各成分を用いて次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} I_n(t) \\ Q_n(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^2 \varphi_n - \frac{1}{G} \cos^2 \varphi_n & \sin \varphi_n \cos \varphi_n \left(1 + \frac{1}{G}\right) \\ \sin \varphi_n \cos \varphi_n \left(1 + \frac{1}{G}\right) & \sin^2 \varphi_n - \frac{1}{G} \cos^2 \varphi_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{n-1}(t) \\ Q_{n-1}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

φ_n は n 段目の PSA への入力信号光の平均光位相と励起光位相の位相差、 G は各 PSA の信号光のうち平均光位相成分に対する電力利得で、増幅中継区間の信号光減衰を L とすると $GL=1$ である。平均光位相に直交する成分に対する利得は $1/G$ とした。ここで、変数 φ_n の位相雑音をガウス近似し、平均 $\overline{\varphi_n(t)}=0$ 、その分散を $\sigma_{\varphi_n}^2$ とする。全ての PSA において位相雑音が等しい ($\sigma_{\varphi_n}^2 = \sigma_{\varphi}^2$) とし、 φ_n にランダムな揺らぎを与えて、 $n=1$ から N まで(1)式の計算を繰り返した。

3. シミュレーション結果

N 段目の信号光複素振幅 ϕ_N のコンスタレーションマップを図 1 に示す。基準位相成分 I_N の雑音が増加している。

N 段目の信号光の位相 $\theta(t)$ と、ホモダイン検波出力 $I_N(t)$ の分布をガウス近似し、それぞれの分散 σ_{θ}^2 、 $\sigma_{I_N}^2$ を求める。符号誤り率は次式によって求めた。

$$P_e = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\theta}} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma_{\theta}^2}} Q(\sqrt{SNR} \cos \theta) d\theta \quad (2)$$

$$Q(z) = \int_z^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy, \quad SNR = \frac{P_S}{\sigma_H^2 + \sigma_{I_N}^2}, \quad SNR_H = \frac{P_S}{\sigma_H^2} \quad (3-5)$$

P_S は信号パワー、 σ_H^2 は位相誤差以外の雑音による分散である。図 2 に、 SNR_H -BER 特性を示す。また図 3 に、各 σ_{φ} による PSA 中継回数とパワーペナルティ ($BER=10^{-10}$ における SNR 劣化量)を示す。区間損失を 24dB ($G=24$ dB)、送信光電力を $P_S=1$ [mW]とした。

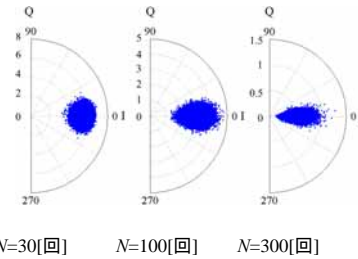


図 1 複素振幅 ϕ_N のコンスタレーション ($\sigma_{\varphi}=0.096$ [rad])

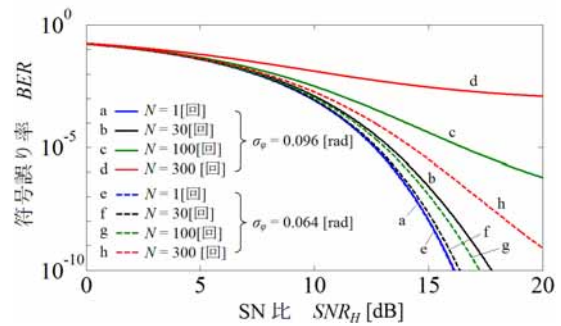


図 2 SNR-BER 特性の PSA 中継回数依存性

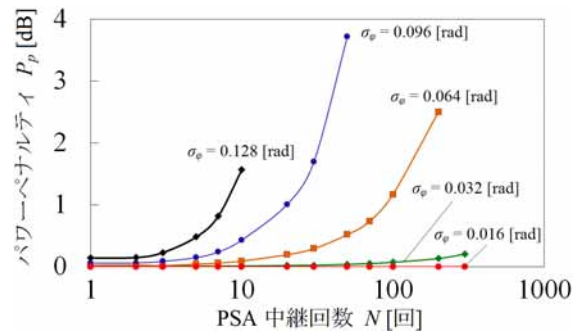


図 3 PSA 中継回数-BER 特性の分散依存性

図 2 より、PSA 中継回数の増加と共に、符号誤り率 BER が増加していることが分かる。

図 3 より、PSA 中継回数の増加と共に、パワーペナルティは増加し、 σ_{φ} が大きいほどパワーペナルティが大きくなることが分かる。

4. まとめ

$\sigma_{\varphi}=0.032$ [rad]以内の信号光-励起光間位相誤差の場合に、パワーペナルティ 0.3[dB]以下で、PSA 中継回数を 300 回と出来る可能性を示した。