

## 超高感度光リンクへの応用を目指した位相感応型光増幅器

Towards ultrasensitive optical links enabled by low-noise phase-sensitive amplifiers

Z. Tong<sup>(A)</sup>, C. Lundström<sup>(A)</sup>, P. A. Andrekson<sup>(A)</sup>, C. J. McKinstrie<sup>(B)</sup>, M. Karlsson<sup>(A)</sup>, D. J. Blessing<sup>(C)</sup>,  
E. Tipsuwannakul<sup>(A)</sup>, B. J. Puttnam<sup>(D)</sup>, 戸田裕之<sup>(E)</sup>, and L. Grüner-Nielsen<sup>(F)</sup>

<sup>(A)</sup>チャルマーズ工科大学, <sup>(B)</sup>アルカテル・ルーセント, <sup>(C)</sup>カリフォルニア大学,  
<sup>(D)</sup>情報通信研究機構, <sup>(E)</sup>同志社大学, <sup>(F)</sup>OFS デンマーク

### 1. はじめに

エルビウム添加光ファイバ増幅 (EDFA) のような非位相感応型光増幅 (PIA) に対して, 位相感応型光増幅 (PSA) は, 原理的に雑音付加のない光増幅が可能である. しかしながらこれまでの報告では, 雑音特性の改善が十分でないこと, 利得帯域の狭さ, QPSK のような高度な変調フォーマットに非対応, 等の問題点があった. 本稿では文献 1) で報告した, 超高感度光リンクへの応用を目指した PSA について紹介する.

### 2. 原理

図 1 に動作原理を示す. まず, 非位相感応型パラメトリック光増幅によって, 信号光と励起光からアイドラー光を発生させる (Copier). リンク損失の後, 信号光とアイドラー光を等振幅とし, 適切な静的位相差を与えて PSA を行う. PSA 用の励起光はリンク損失によって減衰した励起光から再生する (PR/PLL). このような Copier-PSA リンクでは, PIA のみのリンクと比較して信号光利得が 6 dB 改善される. 無相関な雑音に対しては利得は同等であることから, 図 1 の PSA では雑音指数 (NF) の最小値は -3 dB となる. 入力光パワーを信号光とアイドラー光の合成パワーとして NF を定義すると, 最小値は 0 dB である. さらに, 信号光の位相に依存しな

い PSA 動作が可能となり, 高度な変調フォーマットへも対応できる. また, 非縮退 PSA は, 原理的には PIA と同等の利得帯域を有している.

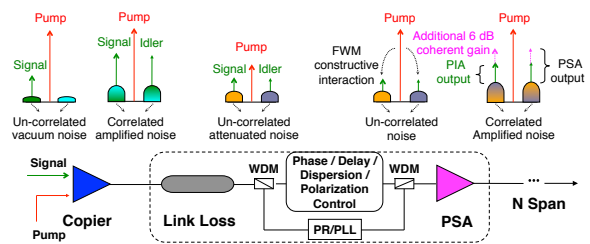


図 1 Copier-PSA リンクの基本構成 (FWM: 四光波混合, PR/PLL: ポンプリカバリー/PLL)

### 3. 実験

図 2 に実験系を示す. 誘導ブリルアン散乱の影響を低減するために, CW 励起光を RF 正弦波で位相変調した. Copier と PSA には高非線形ファイバ (HNLF) を用いた. 光プロセッサによって信号光とアイドラー光の振幅と静的位相差を制御し, リンク損失に対応する損失を与えた. 励起光は WDM カップラで取り出し, 光プロセッサとは別の経路を通して再び合波する. 励起光の位相ドリフトは, ピエゾ素子 (PZT) を用いて安定化制御した. 光プロセッサによって,

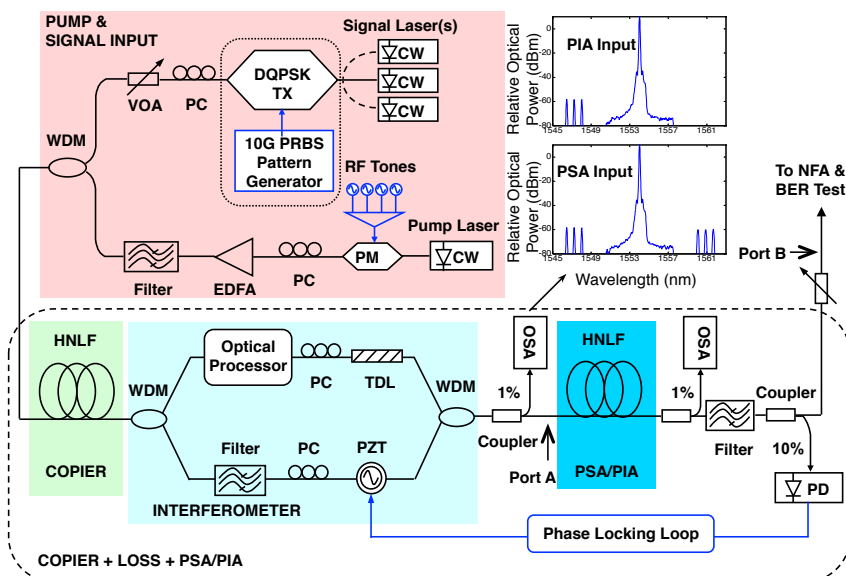


図 2 実験系 (PM: phase modulator, TDL: tunable delay line, NFA: noise figure analyzer)

アイドラー光を on/off することにより, PSA モードと PIA モードを切り換えることができる.

図 3 に PSA の利得と雑音特性を示す. PSA の特定測定には, Copier に 2.7m 長 HNLF を用いた. これによって Copier でのパラメトリック利得が十分小さく ( $< 0.1\text{dB}$ ), ここでの雑音付加を無視できる. PSA モードでは, 信号光とアイドラー光の NF を, PIA モードでは, 信号光の NF を測定した. 図 3 (a) から, PIA より 5.5 dB 低い負の NF が PSA で得られていることがわかる. 合成パワーでの NF は  $1.1 \pm 0.4\text{ dB}$  であった (信号光入力  $-42\text{ dBm}$ , 利得  $26.5\text{ dB}$ ). また, 図 3 (b) から, 利得と NF に約 6 dB の改善が PSA で得られていることがわかる.

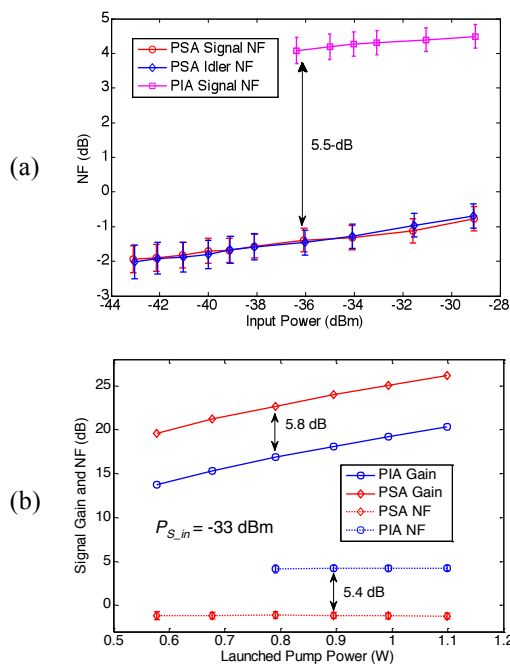


図 3 Copier-PSA リンクでの PSA 測定結果

6 dB の NF 改善は, リンク損失が十分大きい時に得られる. リンク損失が大きくない時には, Copier での雑音付加が無視できなくなる. しかしながら, マルチスパンのリンクにおいて, 各スパンの損失がそれほど大きくない場合でも, スパン数が多くなれば, 6 dB の改善が得られる. リンク特性を模擬する実験として, Copier に 150m 長 HNLF を用い (利得:  $15\text{ dB}$ ), 光プロセッサで信号光とアイドラー光に  $36\text{ dB}$  の損失を与えた. 図 4 に, Copier+損失+PIA と Copier+損失+PSA での出力光スペクトルを示す. PSA を用いることによって, 信号光の光 SN 比に  $5.2\text{ dB}$  の改善がみられた.

次に,  $100\text{ GHz}$  間隔の 3 チャンネル WDM  $\times$   $10\text{ Gbaud}$  DQPSK 光信号の符号誤り率 (BER) 特性を測定した. Copier 利得, リンク損失, PSA 利得は, それぞれ  $11\text{ dB}$ ,  $32\text{ dB}$ ,  $18\text{ dB}$  とした.

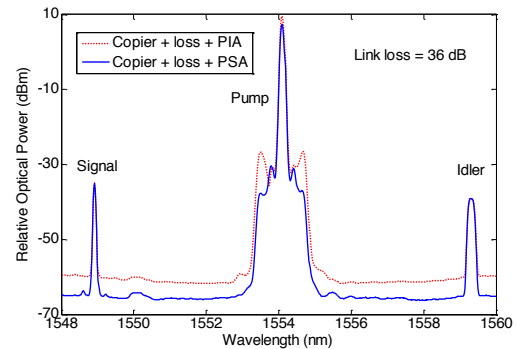


図 4 出力光スペクトル

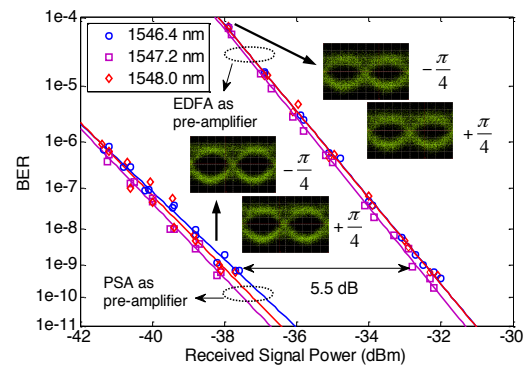


図 5 3 波 WDM  $\times$   $10\text{ Gbaud}$  DQPSK 光信号の BER 特性

信号光とアイドラー光の静的位相差を調整することで, 全チャンネル同時に PSA の最大利得が得られた. 図 5 の測定結果から, PSA を受信プリアンプとみた場合, EDFA をプリアンプとして用いた場合と比べて  $5.5\text{ dB}$  の受信感度の改善がみられた.

#### 4. 課題とまとめ

Copier+PSA 配置で, これまでの最高となる  $1.1\text{ dB}$  の NF が得られた. ただし, 今回の実験では, 励起光はリンク損失を受けていない. 実システムでは, 図 1 に示したように, リンクによる励起光の減衰を補償するために, 低雑音の励起光再生が必要である. また, 励起光, 信号光, アイドラー光の相対時間位置を調整するために, 分散/遅延時間の制御も必要である. これらの課題を解決する技術開発が求められる. 信号光とアイドラー光は同じリンクを伝送するため, その位相差は, 比較的安定である. なお, 本研究は光ファイバ通信への応用を目指して行ったものであるが, 超低雑音特性が要求される他分野への適用も有力であると考えている.

#### 参考文献

- 1) Z. Tong et al., Nature Photonics, 5, p.430 (2011).
- 2) Z. Tong et al., JSTQE, 18, p.1016 (2012).