

ポストセレクション法を用いた 1550nm 帯光子数スクイズド光発生

Generation of 1550 nm photon number squeezing with a post-selection scheme

潮英岳(M2),近藤昇平 (B4)

H.Ushio and S. Kondo

Abstract

SV (Squeezed Vacuum) pulse generation in a fiber reduction of excess noise is very important. We use a post-selection scheme for reduction of excess noise of EDFA light sources. We measure photon number and phase noises of the EDFA and try to reduce these noises with post-selection scheme.

1 はじめに

量子テレポーテーションなどに代表される量子情報通信技術にはスクイズド状態と呼ばれる量子の状態から生成される量子もつれあいの状態が必要である。このもつれあい状態は非常に雑音敏感な状態である。我々はスクイズド状態の生成において光ファイバを使用しているが、これにはいくつかの特徴がある。自由空間に比べ光の閉じ込め効果などの利点により光パルスが高いピークのまま伝播することができるソリトン伝播などの良い部分があり、なにより既存の光通信技術との融和性がよいことが応用という面では非常に有用である。しかし EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) などのファイバ増幅器や、光源として使用されるレーザーダイオードは自然放出光を起源とする過剰雑音の特性が無視のできない程度に大きい。先に述べたようにもつれあい状態やスクイズド状態はノイズに非常に敏感なためこれらの過剰ノイズを取り除くことは量子通信の応用には必要な命題である。

光ファイバ中には様々なノイズが存在するため、そのノイズ除去技術にはいくつかの方法があるが、我々はポストセレクションという方法を用いて光源の過剰ノイズの除去を試みた。ポストセレクションの概要を簡単に説明すると、まず信号に使用するのは光パルスであるのだが、このパルスはそれぞれノイズの大きいものからノイズのあまり乗っていないものなど色々ある。勿論ノイズの大きく乗ってしまっているパルスは

信号に使用するのに適さないため、ある閾値をもたせて使用するパルスを制限すればいい。ここで信号に光パルスを使用する前にスプリッタなどで光を分ける (Tap) ことで観測を行いパルスのセレクションを行い、使用に適するノイズの少ないパルスのみをスクイズド後に残して量子情報通信などに使用する。ここで重要なのは、信号に使用するノイズの小さなパルスのみを Tap により残すことができるかどうかであり、信号 (Signal) と Tap のパルスの対応が高い精度をもっていることが重要である。この測定には時間域測定によるパルス毎の評価が必要になる。

2 実験

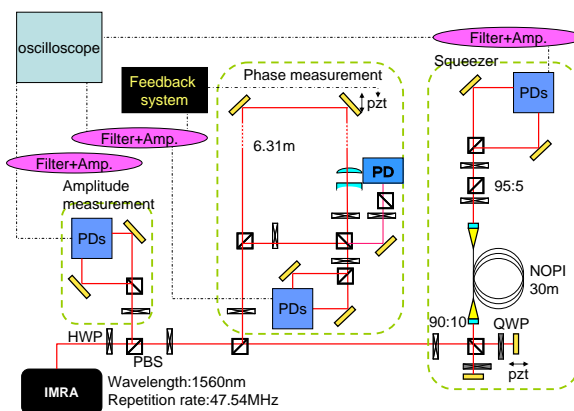


Fig.1 Experimental setup of post-selection. HWP: Half wave plate. QWP: Quasi wave plate. PBS: Polarized beam splitter. PDs: Photo diodes.

この実験には、大きく分けて3つの実験装置が存在する。1つはスクイズド状態を起すための NOPI (Nonlinear Polarization Interferometer) ファイバ干渉系であり、信号つまり Signal として使用される部分である。あとの2つは光源ノイズを測定するための実験装置であり Tap して光子数、位相それぞれのノイズを測

定する装置である。これら3つをあわせた実験セットアップが、Fig.1 のようになる。

Tap パルスの光子数ノイズ測定系は単純なホモダイナミク測定用のセットアップであるが、もうひとつの Tap である位相ノイズ測定系は少々複雑な系となる。位相ノイズ測定は Glöckl ら[1]の測定法に従い、パルス一つ分遅らせたものを LO パルスとして干渉させて測定するという方法を用いた。今回使用した IMRA 社製 Femtolite の繰り返し周波数 47.54MHz においては、1パルス分つまり 6.31m 分の距離を稼ぐ必要がある。さらに1パルス分の遅延干渉の安定化のためタートル工業製 PID ボード T-PID01Z を使用し、アナログフィードバック制御をかけた。この際制御パラメータは測定毎に調整しており、制御信号は干渉系内のピエゾ素子 AE0505D08F に直接送っている。

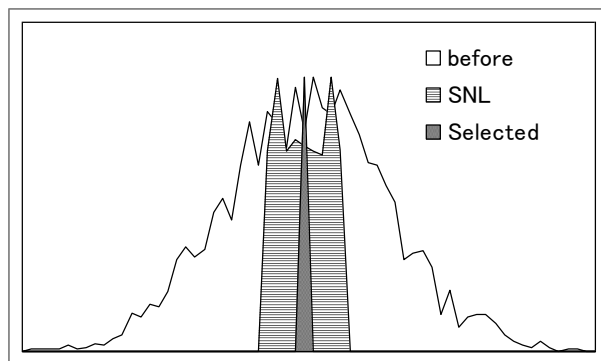
Signal の測定系である NOPI ファイバ干渉系は、ソーラボ社製ポータブル PM ファイバ 30m を用いている。この干渉系はファイバ内の違う偏光同士が干渉するため入射前にマイケルソン干渉系を置き、あらかじめ光路をずらしておくことでファイバを出る際に干渉が起こるよう調整してある。ここで今回は、光源の光子数及び位相ノイズが光子数スキージングに与える影響を調査するために、マイケルソン干渉系の PBS による分岐比を 90:10 に、またファイバ後の PBS による分岐比を 95:5 に調整している。

どの測定系においても、2つのフォトダイオード出力同士の引き算であるホモダイナミク測定回路のあとは繰り返し成分カットのための LPF と信号増幅のための NF 社製のアンプを接続しており、それぞれがオシロスコープをスペクトラムアナライザに向かっている。LPF については、位相ノイズ測定系には繰り返し周波数半分である 23MHz 付近の周波数を消さないよう 32MHz の LPF を、光子数ノイズ測定系には 15MHz の LPF、そしてスキージング測定系には 22MHz の LPF をそれぞれ使用している。

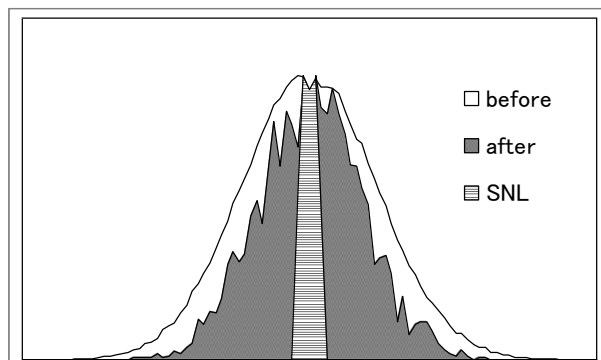
3 実験結果

測定したパルスは、それぞれノイズの評価を受ける。この際一つ一つのパルスの大きさのばらつきを見ても、レーザーの平均エネルギーが時々刻々と変化していることから評価できない。ここで我々はランダム分散というノイズ評価を使用している。これは前のパルスとの差をそのパルスのノイズ量として評価する手

法である。これらをヒストグラム化し、Tap の方からみてノイズの大きいパルスから徐々に除いてゆき、Signal のノイズ分散にどのような影響が出るかを見た。Fig.2(a)は光子数 Tap のヒストグラム変化であり、その際の Signal 側のヒストグラム変化を Fig.2(b)に示した。



(a)



(b)

Fig.2 Histograms of photon number noise. (a)Photon number Tap. (b)Signal

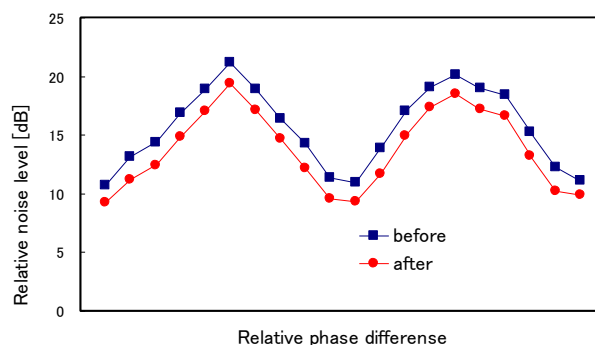
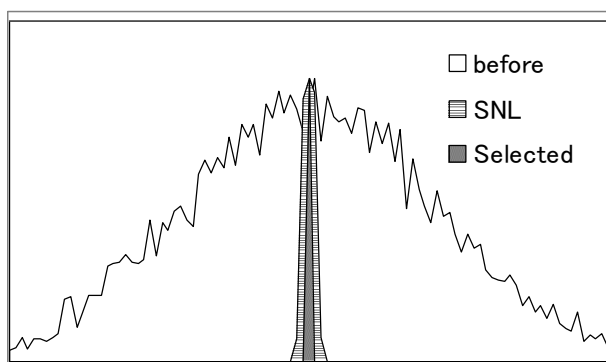


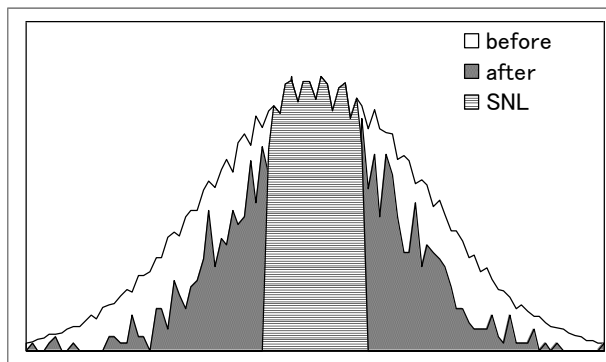
Fig.3 Reduction of photon number noise selected about photon number tap. Square plots are before selection. Round plots are after selection.

このようなヒストグラム変化を SV と LO の干渉の各位相で行った結果が Fig.3 のようになる。このことから、最大 2.2dB の低減となっている。Fig.2 から判るように、ノイズ低減が出来ている状態ではヒストグラムが変化し、少し急峻になっていることからノイズ低減が起こっていることが解る。

同様に位相 Tap でポストセレクションを行うと、ヒストグラム変化は Fig.4 のようになり、各位相のノイズ低減は Fig.5 のようになる。こちらでは最大 2.6dB ほどの低減が起こっており、ヒストグラムの有意な変化も見取れる。しかし、ノイズ低減できていない位



(a)



(b)

Fig.4 Histograms of phase noise. (a)Phase Tap. (b)Signal.

相についてはヒストグラム変化は見られなかった。ここで、光子数及び位相 Tap 両方からのポストセレクションを行った場合の Signal 各位相のノイズ低減についてのグラフを Fig.6 に示す。

こちらもノイズ低減は最大 2.6dB であり、位相 Tap のセレクションの際と同量の最大低減となっている。しかし、光子数 Tap も行っているため位相 Tap のみの

セレクションで低減できなかった位相もノイズ低減が起きていることが解る。

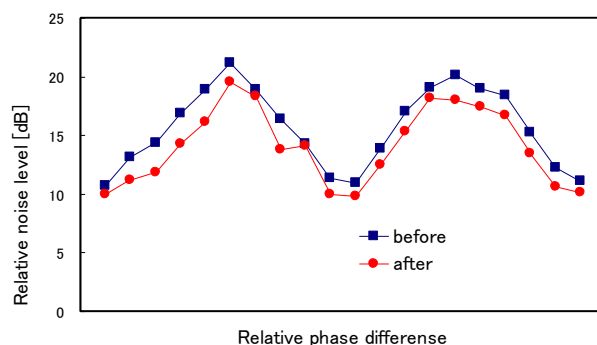


Fig.5 Reduction of photon number noise selected about phase tap. Square plots are before selected. Round plots are after selected.

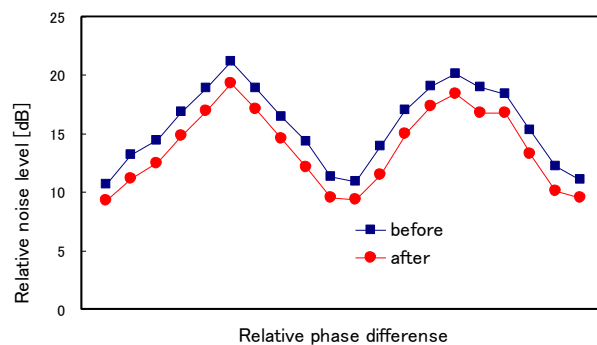


Fig.6 Reduction of photon number noise selected about photon number and phase tap. Square plots are before selection. Round plots are after selection.

4 考察

光子数および位相 Tap のみのポストセレクションの結果から、測定したすべての位相でノイズ低減が起きているが、光子数スキージングの発生には至らなかった。また、両方の Tap でのポストセレクションでも光子数スキージングは起きていないため、光源光子数ノイズと位相ノイズには何らかの相関があるように思われるが、Fig.7 のようにパルスごとに対応しているようすは見取れない。

いずれにしろ光子数スキージングが起らない原因としてパルスのノイズの大きいものを的確に除去できていないことが挙げられる。つまり光源でノイズの小

さなもので、ファイバ後にノイズの大きなパルスになってしまうことがあるということである。この対応の問題は測定がどこまで精度よくできるかということと同時に、ポストセレクションの手法そのものにも限界があるという疑問を残したことになる。

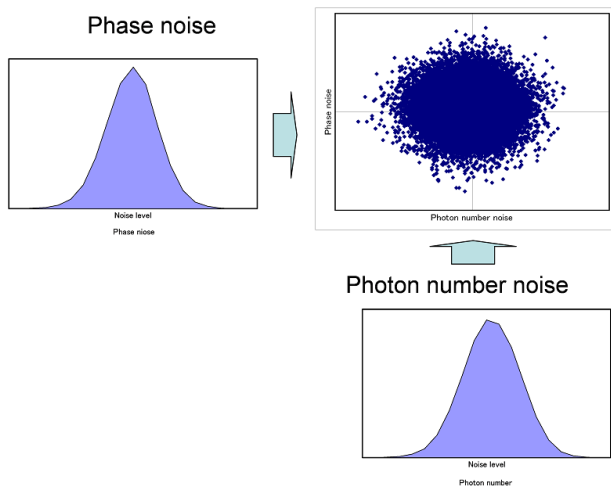


Fig.7 Distribution of phase and photon number noise.

5 結論

光子数及び位相 Tap のポストセレクションにおいて、有意なノイズ低減を得ることが出来た。しかし計測精度及び原理の不確実性から、光子数スクイーミングには至っていない。

References

- [1] O. Glöckl, U. L. Andersen, S. Lorenz, Ch. Silberhorn, N. Korolkova, and G. Leuchs *Opt. Lett.* **29**, 1936.