

時間域平衡ホモダイン計測と量子トモグラフィ表示

Balanced homodyne detection in the time domain and representation with quantum tomography

潮英岳(B4), 百瀬嘉則(M2), 廣澤賢一(D2)

H. Ushio, Y. Momose and K. Hirose

Abstract

In order to process the statistics in the fluctuation of quadrature phase amplitude of ultrashort laser pulses at $\lambda=1.5 \mu\text{m}$, a time-domain balanced homodyne detection is constructed. Using a fast photo-diode and a low-pass filter to eliminate rf signal component at the laser rep. rate of 80 MHz, we can measure the SNL up to the LO power of $\sim 6 \text{ mW}$. We demonstrate quantum tomography representation using this time-domain homodyne measurement.

1 はじめに

量子コンピュータや量子暗号などの量子情報通信技術を実現するためには2つのもつれあった状態の光子の生成が必要である。これらのもつれあった状態はエンタングルメント状態とも呼ばれる。連続変数を用いたもつれあい状態の生成に使用されるのが SV (Squeezed Vacuum) と呼ばれる一種の量子的な状態である。SV とは2つの最小不確定状態 (たとえば位置と運動量) のうちの1つを最小不確定以下に圧搾した光強度 $\neq 0$ 状態であり、位相平面上の擬似確率分布の Wigner 関数 $W(q, p)$ で表示できる。この Wigner 関数は量子トモグラフィ [1] という方法で実験的に以下の式で求めることができる。

$$W(q, p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty pr(x, \theta) K(q \cos \theta + p \sin \theta - x) dx d\theta \quad (1)$$

q, p はそれぞれ位置と運動量, x は正規化した電界の振幅, θ は位相を表す。 K は補関関数で一般的にカーネル関数を用いる。 $pr(x, \theta)$ は直交位相のヒストグラムで時間域のホモダイン測定によって求められる。

繰り返し周波数の高いパルスレーザーに対して、ホモダイン計測から Wigner 関数を再構築する際、いくつかの課題がある。繰り返し周波数を含んだ全帯域においてショットノイズを電気ノイズより十分高くするこ

と、ショットノイズが LO 光強度に対して線形に変化することを確認することである。そのためには広い帯域において利得の高いアンプが必要になるが、利得を上げすぎると繰り返し周波数成分の信号電圧が飽和してしまい、正しい測定が行えなくなる。これを回避する方法として、パルスピッカーなどを使用して繰り返し周波数を落とすことなどがあげられるが、繰り返しを落とすことなく測定する研究もなされている。 [2][3]

本研究では、レーザーの繰り返し周波数を落とさずに、広帯域において高精度な測定のできる回路を広帯域ローノイズアンプ、LPF を用いて作成し、繰り返し周波数 79.2MHz のレーザーパルスの真空場の量子状態を時間域ホモダイン測定し、その Wigner 関数を量子トモグラフィ表示することを目的に実験を行った。

2 実験

Fig.1 に実験セットアップを示す。光源は IMRA 社製の Femtolite で中心波長 1560nm, 波長幅 80nm, 繰り返し周波数 47.5MHz である。光源からでた光は Mach-Zender 干渉計を通り、ホモダイン系で測定される。

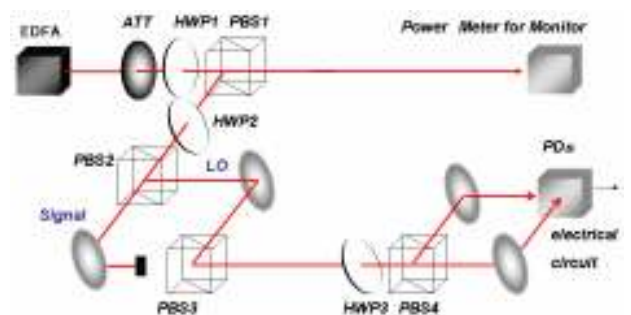


Fig.1: Optics setup for measuring quantum noise in time domain at rep. rate of 47.5MHz. ATT: attenuator, HWP: half wave plate, PBS: polarizing beam splitter, PD: photo diode.

測定する真空の量子揺らぎはコヒーレント状態 (SNL : Shot Noise Level) である, PBS2 後の PBS4 において真空場が進入してくるので, ここで 50:50 に分けた LO 光を 2 つのフォトダイオードで各光電流の差信号をとることにより直交位相振幅の量子揺らぎを測定する。電気回路系は Fig.2 に示す。この信号を利用 42dB, NF1.2dB の電圧アンプ NHL-4301 (Nogawa 通信製作所) で増幅した, さらに電圧アンプの飽和を避けるために, 67MHz で信号を 3dB 削減する BLP70 (Mini-circuit 社製) を LPF として使用し, 2 次高調波以降の差信号をカットした。さらにアンプの飽和を防ぐため, 繰り返し周波数 47.5MHz 付近の成分を減衰するような自作 BEF (Band Elimination Filter) 回路を作成した。

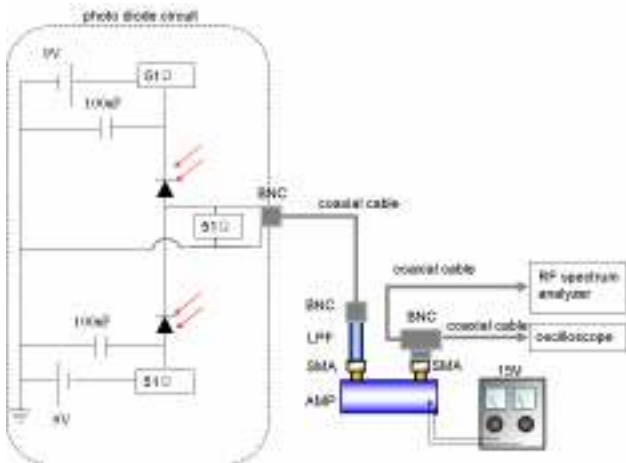


Fig.2: Electrical circuit and experimental setup for measuring quantum noise in time domain. AMP: Amplifier, LPF: Low Pass Filter.

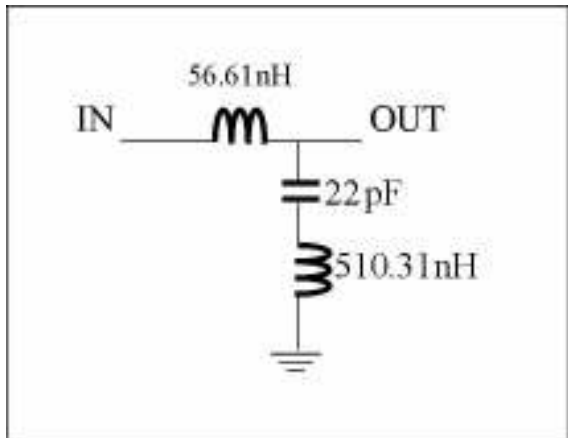


Fig.3: Calculated property of the band elimination filter.

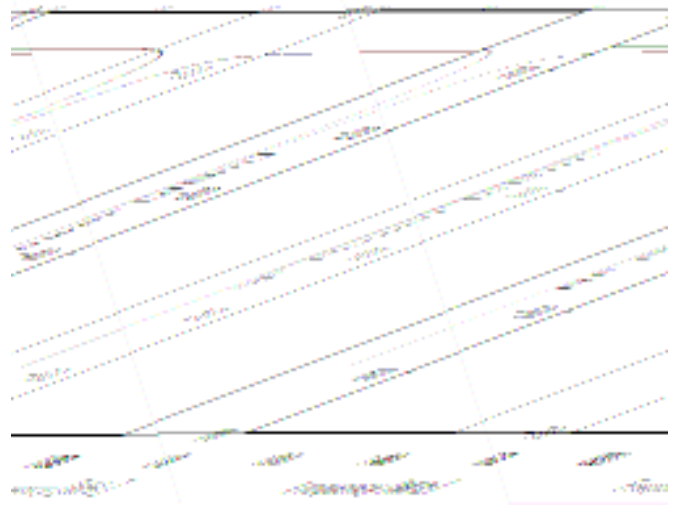


Fig.4: Calculated property of the band elimination filter.

このフィルタの回路図を Fig.3 に, 理論特性を Fig.4 に示す。これを LPF の後に接続し, 真空場の量子揺らぎの時間域パルスホモダイン測定を行った。

3 ショットノイズの周波数・時間域特性

時間域でショットノイズを測定するためには, 周波数域で測定したときに電気ノイズよりショットノイズが上回っていないなければならない。また, ショットノイズはホワイトなノイズであるため, 広帯域でショットノイズが電気ノイズを上回っていることが必要である。

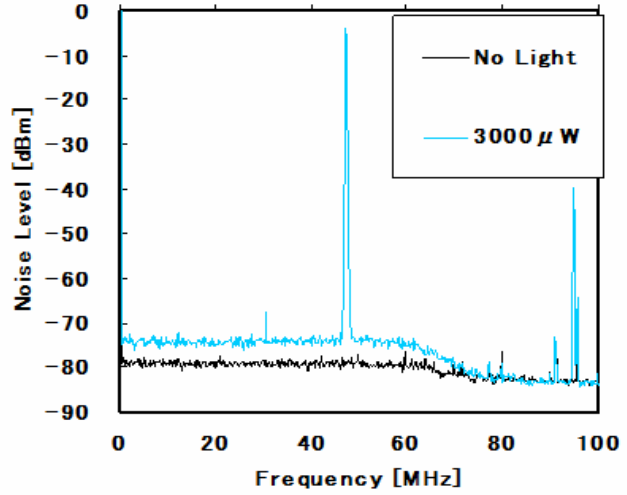


Fig.5: Variance of vacuum state measured in frequency domain.

このフィルタの回路図を Fig.3 に, 理論特性を Fig.4 に

示す。これを LPF の後に接続し、真空場の量子揺らぎの時間域パルスホモダイン測定を行った。このフィルタの回路図を Fig.3 に、理論特性を Fig.4 に示す。これを LPF の後に接続し、真空場の量子揺らぎの時間域パルスホモダイン測定を行った。

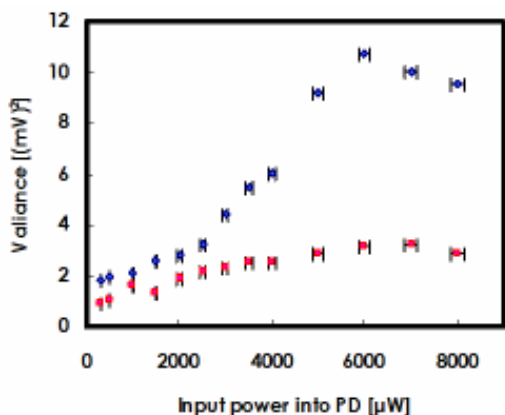


Fig.6: Variance of vacuum state measured at various input power on the PD. Diamond plots denote directly measured vacuum variance in the time domain. Square plots denote integral of power spectrum between 0-60 MHz without repetition rate.

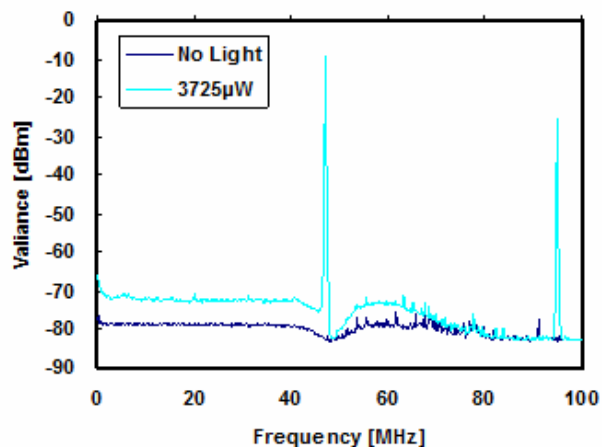


Fig.7: Variance of vacuum state measured in frequency domain. An BEF was added in the detection circuit.

Fig.5 から、広帯域においてショットノイズが電気ノイズを上回っていることが分かる。Fig.6 では周波数域の 0-60MHz 領域を積分した値と時間域での分散の測定結果が、入力光強度 2mW までは近い値を示し、かつ時間域の分散もほぼ線形にตอบสนองしている。しかし、

それ以上の強度になると時間域の値が大きく上回ってしまい、線形性がとれなくなってしまっている。この BEF を挿入しない回路では入力高強度 2mW 程度までは時間域ホモダイン測定が可能である。

さらに自作 BEF を加えた際の周波数域のショットノイズと電気ノイズを Fig.7 に示し、Fig.8 には時間域での測定結果を示す。

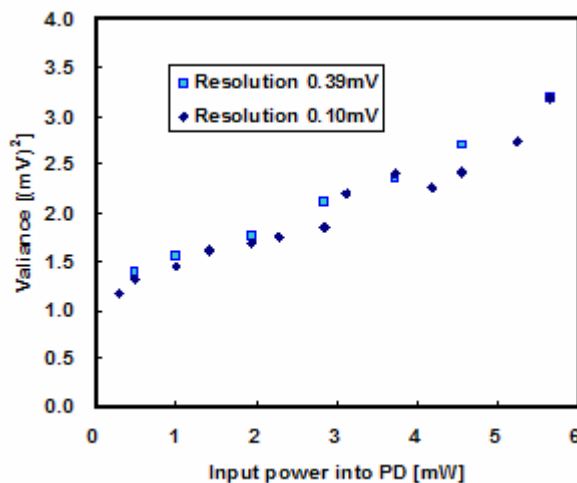


Fig.8: Variance of vacuum state measured in time domain at various input power on the PD. Diamond plots denote variance measured at 0.10 mV resolution. Square plots denote variance measured at 0.39 mV resolution.

Fig.7 において、BEF を入れなかったときよりも繰り返し周波数付近の成分が減衰しているのが分かる、さらに広帯域においてショットノイズが電気ノイズを上回っているのがわかる。また、Fig.8 において分解能を変化させても 6mW まで入力光強度に対する分散の測定値が線形にตอบสนองしていることがわかる。これらのことから、Fig.2 に自作 BEF を加えた回路において、6mW まで時間域ホモダイン測定が可能なのことがわかる。

4 真空場の量子トモグラフィ表示

以上の時間域の平衡ホモダイン計測において式 (1) を用いて Wigner 関数を再構築しトモグラフィ表示することができる。Fig.9 に再構築した真空場の量子トモグラフィ表示を示す。Fig.9(i) は 3 次元に見たヒストグラムであり、(ii) は Wigner 関数を上から 2 次元にみた図、(iii) は Wigner 関数を横から見た図で、 0° から見ても 90° から見ても Gauss 分布が観測できていることがわかる。

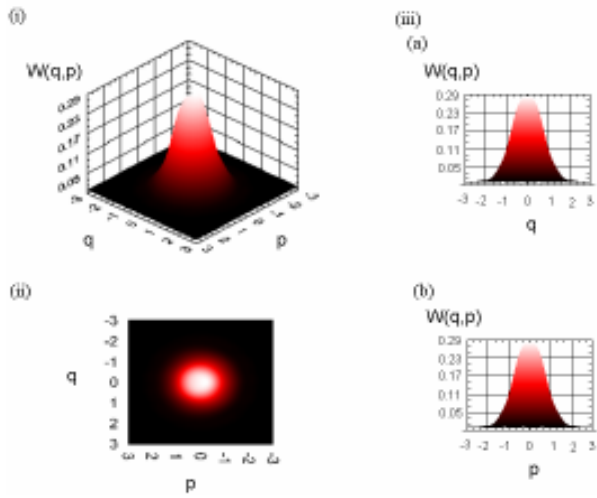


Fig.9: (i)Wigner function of vacuum state.(ii)Wigner function showed in two dimension.(iii)Wigner function, (a)at phase 0 degree.(b)at phase 90 degree.

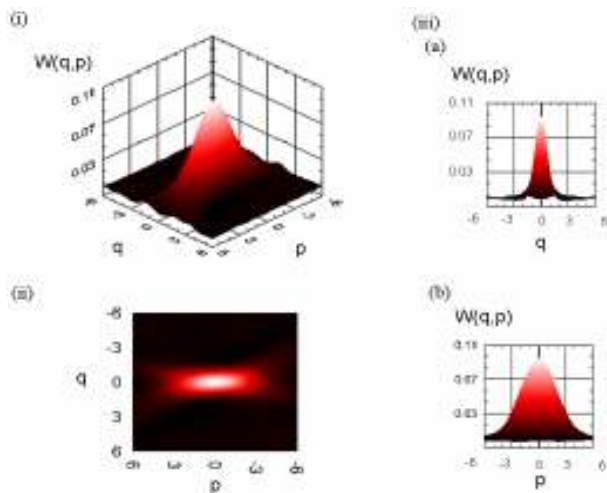


Fig.10: (i)Wigner function of squeezed state. (ii)Wigner function showed in two dimension. (iii)Wigner function, (a)at phase 0 degree. (b) at phase 90 degree.

5 まとめ

我々はパルスレーザの真空場の量子状態が時間域ホモダイン測定により正確に測定できているかどうかを、ショットノイズが広帯域にわたって電気ノイズを上回っていることと、入力光強度に対する時間域での測定値が線形に応答することの2点において評価し、Fig.2の回路を構築することによって時間域平衡ホモダイン測定ができることを確認した、また、自作 BEF の作成

で、より高強度の時間域平衡ホモダイン測定が可能にすることができた。さらにその時間域平衡ホモダインの実験データから Wigner 関数を再構築し、量子トモグラフィ表示することに成功した。

これらの結果は昨年度の結果[4]を大幅に更新したといえる。今後は別記したポストセレクションなどに応用し、スクイーズド状態や量子もつれ状態の量子トモグラフィ表示の実現などを目標とするところである。

References

- [1] Ulf Leonhardt: Measuring the Quantum State of Light, Cambridge Studies in Modern Optics: Cambridge University Press (1997).
- [2] Alessandro Zavatta , Marco Bellini , Pier Luigi Ramazza , Fancesco Marin and Fortunato Tito Arecchi : J. Opt. Soc. Am. B 19, 5 (2007).
- [3]H.Hansen, T.Aichele, C.Hettich, P.Londahl, A.I.Lvovsky, J.Mlynek, and S.Schiller : OPTICS LETTERS 26, 21, p.1714-1716 (2001).
- [4] 百瀬嘉則, 藤原悠二, 神成研究室 Annual Report 2006-2007