

時間域平衡ホモダイン計測と真空場の量子トモグラフィ表示

Time-domain balanced homodyne detection and quantum tomography of vacuum state

百瀬嘉則(M1), 藤原悠二(B4)

Y. Momose Y. Fujiwara

Abstract

We measured the time-domain quantum statistics of a vacuum field by balanced homodyne detection, and then we reconstructed the Wigner function by using quantum tomography. The measuring apparatus discriminates the time scales on which intrinsic quantum fluctuations prevail from those scales for which technical noise is overwhelming.

1 はじめに

インターネットの爆発的普及は、行政・医療・放送・金融などあらゆる分野の社会経済活動に大きな変革をもたらした。情報端末機器の高度化と相まって、ユビキタス情報社会の扉を開こうとしている。しかし、このような利便性の追求は、より柔軟で大容量なネットワークを要求し、それに伴う電力消費量の急増をもたらした。さらには盗聴や改ざん、不正アクセスなどのリスクを高める。そこで上記の3つの課題を解決する夢の技術として、光の属性を量子力学の世界まで究極的に追求し通信技術と融合させた「量子情報通信」の研究が近年注目されている[1]。

量子情報通信において伝送する情報は「量子状態」であり、これを記述する数学的モデルとして、位相平面上の擬似確率分布のWigner関数 $W(q, p)$ が用いられている。これは量子トモグラフィ[2]という方法で実験的に次式

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

から求められる。 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 は補間関数でカーネル関数を用いるのが一般的である。 $pr(x, \theta)$ は直交位相のヒストグラムで時間域ホモダイン測定により求められる。

高繰り返し動作パルスレーザーのWigner関数を再構

築する際の課題は、繰り返し周波数を含む全帯域においてショットノイズを電気ノイズより高くし、ショットノイズの分散値をLO光強度に対して線形に 응답させることである。それには広帯域に対応した利得の高い電圧アンプが必要であるが、利得を上げると電圧が飽和してしまう。そこで、これを回避するためにパルスピッカーで繰り返し周波数を落として測定するなどの工夫がなされてきたが、近年では、繰り返しを落とさずにコヒーレント状態を直接測定する研究もなされている[3][4]。

そこで本研究では、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サブトラクションができる回路、広帯域ローノイズアンプ、LPFを用いて、繰り返し周波数47.5MHz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

本実験で用いた実験セットアップをFig. 1に示す。実験系は光源、Mach-Zender干渉計、ホモダイン検出系から構成される。今回用いた光源は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。Mach-Zender干渉計では、透過光をSignal光、反射側をLO光となるようにPBS前の $\lambda/2$ 板を調整した。Signalとしてvacuum状態を測定するので入射する光がPBS1で完全に反射するように $\lambda/2$ 板を調整している。ホモダイン検出系では2つのPDからの光電流の差信号(直交位相ノイズ、ショットノイズ)を利得42dB、NF1.2dBの野川通信機社製の電圧アンプで増幅した。なお電圧アンプの飽和をさけるため、DC-60MHzのローパスフィルタ(Minicircuit社製)を用いて二次高調波以降の差信号をカットした。

量子トモグラフィ表示を行うにはLO光の位相を0-180°動かし、各位相のヒストグラム $pr(x, \theta)$ を測定しなければならない。しかしvacuumにおいては、全

での LO 光の位相において同じヒストグラムが得られるので、計測では1つの位相のみのヒストグラムを計測しトモグラフィ表示を行った。サンプルは差電圧のデータからパルスのピークだけをとってきており、100万プロットの差電圧データから9600個のサンプルを計測しヒストグラムを作成した。一回の測定にかかる通信速度 (GPIB) は約 40 秒である。

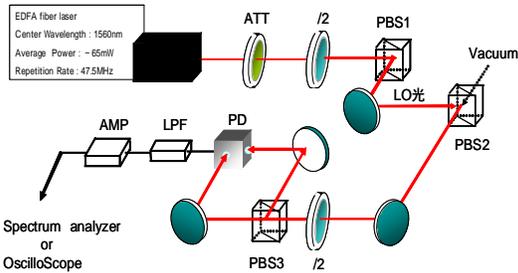


Fig.1: Experimental setup for time-domain homodyne detection .

3 ショットノイズの周波数域・時間域特性

時間域でショットノイズを観測するためには、周波数域で計測したときに電気ノイズよりショットノイズが高くなってはならない。さらに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より高くなっていることが望まれる。LO 光強度が $510\mu\text{W}$ の時のショットノイズの周波数特性を Fig. 2 に示す。DC 60MHz 付近までショットノイズが背景ノイズより上回っている。繰り返し周波数の 47.5MHz 以上でもショットノイズが観測できているので、時間域の平衡ホモダイン測定に必要な帯域が確保できていることがわかる。

次にショットノイズの時間域の平衡ホモダイン測定を行った。LO 光強度に対するショットノイズの分散値特性を Fig. 3 に示す。このときオシロースコープの分解能を 5mV ~ 50mV まで変化させて測定を行った。分解能が 5mV ~ 20mV においてショットノイズは LO 光強度に対して線形に反応していることがわかる。分解能が 50mV では分解能があまりに分散値が正確に測定できていない。またショットノイズの分散値の理論値は次式で表され、

$$\begin{aligned} \tilde{i}^2 &= 2qI\Delta f \\ &= 2q \frac{P_{LO}}{h\nu} \Delta f \end{aligned} \quad (2)$$

と実験値がかなりの精度で一致していることがわかる (q は電子の電荷, P_{LO} は LO 光強度, h はプランク定数, ν は周波数, Δf は測定バンド幅)。このことから我々の電気回路系は正しく量子状態を測定することができるといえる。

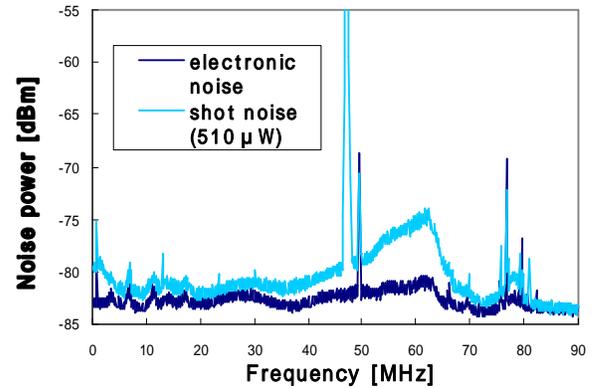


Fig. 2: Frequency-resolved noise at LO power of $510\mu\text{W}$

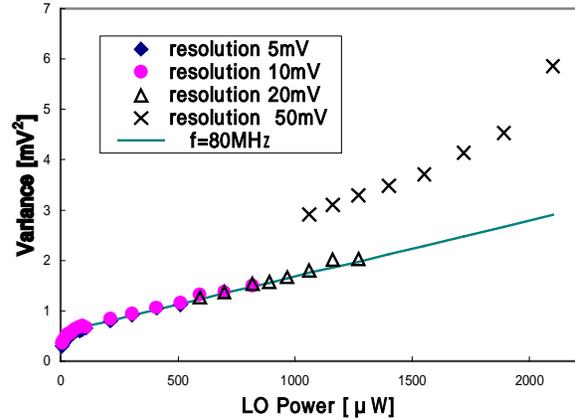


Fig. 3: Variance of noise (resolution 5 ~ 50mV)

4 真空場の量子トモグラフィ表示

時間域の平衡ホモダイン測定の結果から式(1)を用いて Wigner 関数の再構築しトモグラフィ表示が出来る。Fig. 4 に真空場の量子状態のヒストグラム, Fig.5 にそれから再構築した真空場の量子トモグラフィ画像を示す。共に Gauss 分布が観測できていることがわかる。

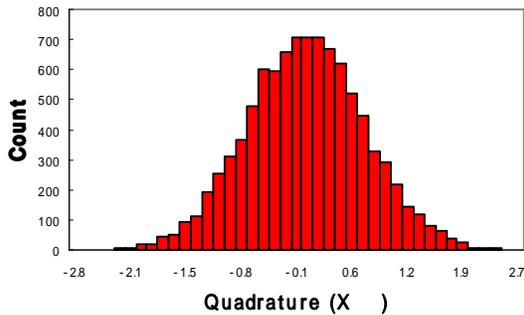


Fig. 4: Histogram of vacuum state (LO power of 510 μ W)

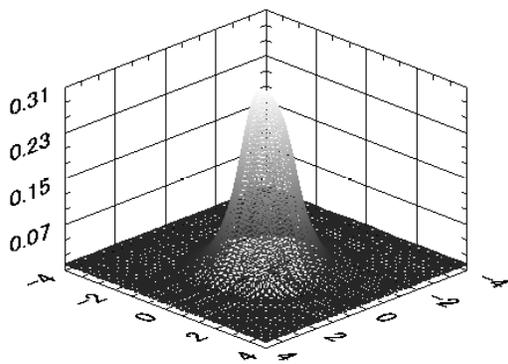


Fig. 5: Wigner function of vacuum state .

5 Signal 光の量子トモグラフィ表示

5-1 実験セットアップ

次に Signal 光として EDFA レーザを用いて量子トモグラフィ表示の実験を行った。実験セットアップを Fig. 6 に示す。PBS1 の透過光と反射光の強度比を 1:1000 に分け、透過光を Signal 光、反射光を LO 光として PBS2 に入射させ、平衡ホモダイン測定を行った。このとき LO 光強度は 1.02 μ W, Signal 光強度は 1.02nW である。LO 光側のミラーにピエゾ素子を設置し、LO 光と Signal 光の位相差をつけた。今回の実験で重要になることは実験系の安定である。空気の流れ、または振動などが原因となり Signal と LO 光の位相差が揺らいでしまう。Mach-Zender 干渉計に風防を設置したが、5 分で 10° の位相のゆれが観測された。そこで我々は、20° 刻みで位相差をつけ、量子トモグラフィ表示を行った。

各位相におけるサンプル数は真空場の平衡ホモ

ダイン実験と同じ 9600 サンプルであり、1 位相に約 1 分程度測定時間がかかるため、全体で 10 分程度の測定時間になった。

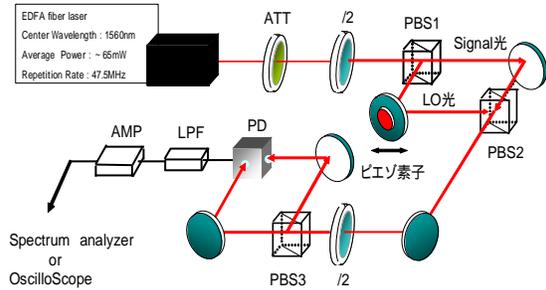


Fig. 6: Experimental setup for time-domain homodyne measurement

5-2 実験結果

実験結果から得られた Signal の Wigner 関数再構築画像を Fig. 7 に示す。また位相が 0° と 60° のときのヒストグラムの結果を Fig. 8 に示す(縦軸は面積で規格化している)。位相が 0° の場合のヒストグラムは vacuum のヒストグラムとほぼ重なっているが、60° の場合は vacuum に比べて大きく広がっていることがわかる。Fig. 9 は各位相における Signal の分散値の大きさをしめしたグラフである (0dB を SNL としてある)。位相が 20° 以降から SNL に比べ分散値が大きく上回っていることがわかる。この時間域ホモダイン測定が正しく Signal 光を測定しているかどうか判断するため、我々はレーザの繰り返し周波数のサイドバンド 3MHz において周波数域の平衡ホモダイン測定を行った。実験結果を Fig. 10 に示す。このとき、スペクトルアナライザは 0span モードに設定し、sweptime は 10 秒である。この 10 秒の間に Signal と LO 光の位相差を約 2 つけた。Signal の分散値は SNL と一致しており、コヒーレント光が測定できた(EDFA は過剰量子ノイズをふくんでいるが 1.02nW という小さな強度ではコヒーレントとみなせる[4])。この結果から時間域の平衡ホモダイン測定は正しく Signal を測定できていないことがわかる。

時間域の平衡ホモダイン測定において正しく Signal が測定できなかった理由として位相の揺れまたはピエゾのドリフトが考えられる。位相が固定されていないと、差電圧が上下に揺れてしまうため、パルスのピーク値も上下に揺れてしまう。これによって各位相の分散値が、SNL よりが大きくなってしまう。現在各位相

の測定に1分弱の測定時間がかかっているため、位相のゆらぎまたはピエゾのドリフトは無視できない。解決方法としてはオシロスコプのメモリを増やし、通信にかかる時間を減らすことが考えられる。

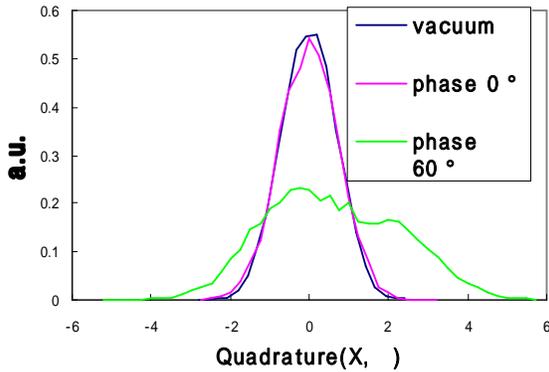


Fig. 7: Histogram of signal ($\theta=0^\circ, 60^\circ$)

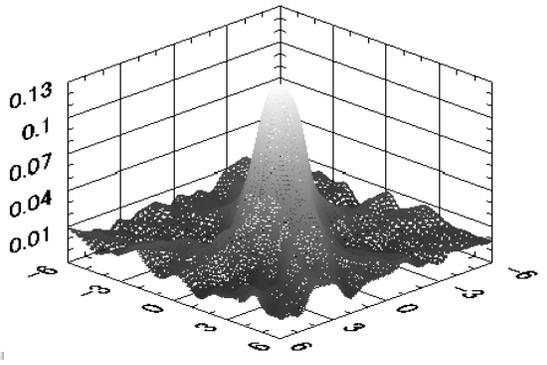


Fig. 8: Wigner function of signal

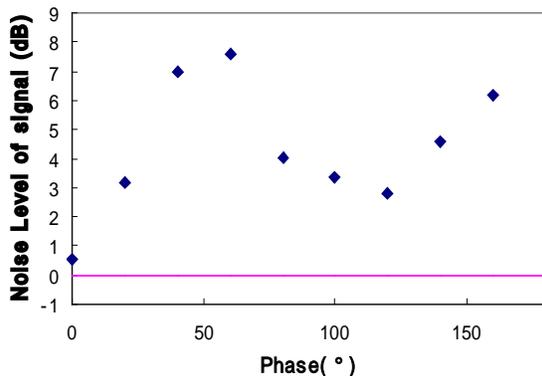


Fig. 9: Noise level of signal

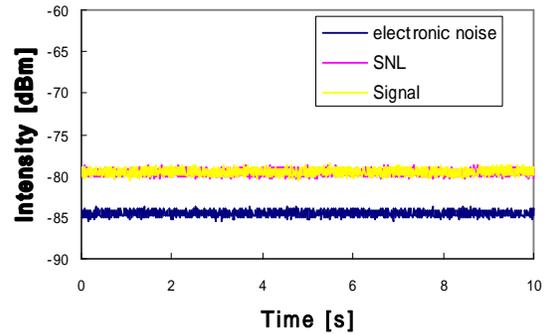


Fig. 10: Noise level of signal measured by Frequency domain homodyne measurement at 3MHz

6 まとめ

我々は、パルスレーザー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、繰り返し周波数を含む全帯域においてショットノイズが電気ノイズを上回り、ショットノイズの分散値がLO光強度に対して線形に応答したことにより確認した。この2つを満たすLO光強度510 μ Wにおいて、真空場の量子トモグラフィ表示によりWigner関数を再構築した。

今後の方針としては、さらに安定な実験系や低ノイズまたは高速な電気回路系を組むことにより、コヒーレント状態、スクイーズド状態、さらにはもつれあい状態の量子トモグラフィ表示を実現することを目標とする。

7 謝辞

本研究遂行にあたり、独立行政法人 情報通信研究機構 量子情報技術グループの佐々木雅英グループリーダー、ならびに武岡正裕博士、和久井健太郎博士に数々の提案ならびにご指導を頂きました。この場をかりて深く感謝致します。

References

- [1] R. Takahashi : 応用物理 75,1306 (2006).
- [2] Ulf Leonhardt : Measuring the Quantum State of Light, Cambridge Studies in Modern Optics : Cambridge University Press (1997).
- [3] Alessandro Zavatta , Marco Bellini , Pier Luigi Ramazza , Fancesco Marin and Fortunato Tito Arecchi: J.

Opt. Soc. Am. B 19, 5 (2002).

[4] H.Hansen, T.Aichele, C.Hettich, P.Londahl,
A.I.Lvovsky, J.Mlynek, and S.Schiller : OPTICS
LETTERS 26, 21, p.1714-1716 (2001).

[5] 百瀬嘉則 ,田口修平 ,廣澤賢一 ,神成研究室 Annual
Report 2005-2006.