

量子レーダー研究のためのスクイズド光源及び ホモダイン測定系の開発

政田元太¹⁾, 村上 弾¹⁾, 岩越丈尚¹⁾, 相馬正宜²⁾

Development of Squeezed Light Source for Quantum Radar Research

Genta Masada¹⁾, Dan Murakami¹⁾, Takehisa Iwakoshi¹⁾ and Masaki Sohma²⁾

¹⁾ Quantum ICT research Institute, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo, Japan 194-8610

²⁾ Department of Intelligent Mechanical Systems, College of Engineering, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo, Japan 194-8610
Tamagawa University Research Institute, Machida-shi, Tokyo, 194-8610 Japan.
Tamagawa University Research Review, 22, 57-61 (2016)

Abstract

We started to research quantum radar based on a quantum illumination method by utilizing continuous-wave two-mode squeezed light as a quantum entanglement resource. Two-mode squeezed light is a macroscopic quantum entangled state of electro-magnetic fields and shows a property of non-classical correlation between quadrature phase amplitudes of each optical field. One of the most effective methods to generate two-mode squeezed light is combining two independent single-mode squeezed light beams by using a beam splitter. As a first step of our work we introduce current development of a single-mode squeezed light source and construction of a balanced homodyne detection part. We utilized a sub-threshold optical parametric oscillator to generate squeezed light and observed the noise level of squeezed quadrature at -3.08 ± 0.13 dB and anti-squeezed quadrature at 9.29 ± 0.13 dB by balanced homodyne measurement.

キーワード：量子レーダー, スクイズド光, 量子エンタングルメント

Keywords : quantum radar, squeezed light, quantum entanglement

1. はじめに

本研究の目的は従来のレーダー技術が持つ検出能力を向上させるため、量子エンタングルメントと呼ばれる現象を利用した量子レーダー技術を実験的かつ理論的に研究開発することである。具体的課題として近年自動車産業会で注目されている自動運転化技術を実現する上で必要不可欠な、全天候型の車載用レーダーとしての実現化

を目指している。従来の車載用レーダーではまず測定したい目標物体に向けて電波や光といった電磁波が照射される。その反射波をレーダー受信機で検出することによって、目標物体の有無を判定したり、あるいは目標物体までの距離や速度といった情報を検出する。しかしながら従来の車載用レーダーでは、雨や霧などの光波のエネルギーを減衰させる要因や、自動車のライトや街灯といった光雑音の影響下ではその性能が劣化するという問

1) 玉川大学量子情報科学研究所超高速量子通信研究センター

2) 玉川大学工学部機械情報システム学科

題がある。量子レーダーはそのような問題を改善できると考えられている¹⁻³⁾。そしてそこで重要となるのが量子エンタングルメントと呼ばれる現象である。量子レーダーで量子エンタングルした2つの光波を同時に使うという特徴がある。量子エンタングルした2つの光波の間には強い相関の力が働いている。一方の光波は目標物体に照射され、その後レーダー受信機で検出される。もう一方の光波は安全な通信路を通じてレーダー受信機に直接送信される。レーダー受信機では2つの光波の間に作用しているエンタングルメントの力をうまく利用することにより、目標物体からの信号光だけを効果的に検出することが可能となる。その結果、雨や霧などが発生しているような悪天候の状況でも、高感度で目標物体を検出することが可能となる。

本研究では量子レーダーを実現する上で必要不可欠な量子エンタングルメント発生源として、2モードスクイーズド光とよばれる非古典的な状態の光を利用する⁴⁾。玉川大学では過去30年以上に渡ってスクイーズド光の理論的な研究を行ってきた経緯がある⁵⁾。その経緯を踏まえ、本研究ではスクイーズド光を現実の世界で使用するレーダーに応用し、世の中の役に立つレーダー技術を開発していく。平成27年度の共同研究では2モードスクイーズド光源の開発の準備として、まずシングルモードスクイーズド光の生成実験を行った。将来的に2モードスクイーズド光を生成するためには、2つのシングルモードスクイーズド光を別々に生成し、それらを合波する必要がある。また本共同研究ではスクイーズド光の検出に必要なバランス型ホモダイン測定部の構築も行った。

2. スクイーズド光について

スクイーズド光は量子揺らぎが制御された非古典的な状態の光である。光波の直交する位相振幅成分のうち、一方の量子揺らぎは真空揺らぎよりも圧縮(スクイーズ)されており、同時にもう一方の量子揺らぎは増幅(アンチスクイーズ)されている。その結果、光波の位相に依存して量子揺らぎが変化するという特徴を持つ。量子揺らぎが制御されたスクイーズド光は光通信へ応用することが期待され、1960-1970年代に量子光学の重要な課題としてその理論的な研究が開始した。1976年にYuenによってスクイーズド光の厳密な数学的な基礎が確立され、当初は2光子コヒーレント状態と命名された⁶⁾。

1986年にはYuenとChanによって古典的なショットノイズ限界以下に圧縮された量子揺らぎを実験的に検証する方法として、バランス型ホモダイン測定が提案された⁷⁾。その頃、本学においてもスクイーズド光の理論的な研究を開始している。スクイーズド光が光学損失に対して脆弱であるという性質が、現実の光通信技術に応用する際の制限要因となることが指摘されている⁵⁾。1980年代には様々な手法によってスクイーズド光の実験的な研究が行われた。1984年にSlusherによって⁸⁾、1985年にはShelbyによって⁹⁾、3次の非線形光学効果を用いたスクイーズド光の生成実験が行われた。しかしながら3次の非線形光学効果は非常に弱い相互作用であるため、当時は明瞭なスクイージングを観測することが困難であった。その後、1986年にWu等は強い2次の非線形光学効果である光パラメトリック過程を用いることにより、顕著なスクイージングを観測することに成功した¹⁰⁾。現在では光パラメトリック過程を用いたスクイーズド光の生成方法が一般的な手法となっている。

3. スクイーズド光の応用

スクイーズド光は光損失や光雑音によって壊れやすい性質があり、現実の環境で使用することは極めて困難であると考えられてきた。従って現状では量子コンピュータ^{11,12)}や重力波干渉計¹³⁻¹⁵⁾といった学術的な研究用途で、管理された実験室環境において使用されている。しかし、近年マサチューセッツ工科大学によって量子エンタグルメントの性質を持つ光源を目標物の有無を判定するレーダーに応用するための量子イルミネーション理論が開発された¹⁻³⁾。本方式によると従来のレーダーが機能を発揮することが困難な光損失や光雑音などの影響が大きい環境においても、エンタングルメントの効果により目標物体を検出する際の誤り確率が改善することが報告されている。更に2モードスクイーズド光源を使った場合には、従来のレーダーに比べて更に誤り確率を改善できるとの試算結果が報告されている²⁾。本研究で取り組んでいる量子レーダーは量子イルミネーション理論を基礎としている。

4. スクイーズド光生成の光学実験装置

図1にスクイーズド光生成を行うための光学実験装置の全体像を示す。主光源として連続発振Nd:YAGレー

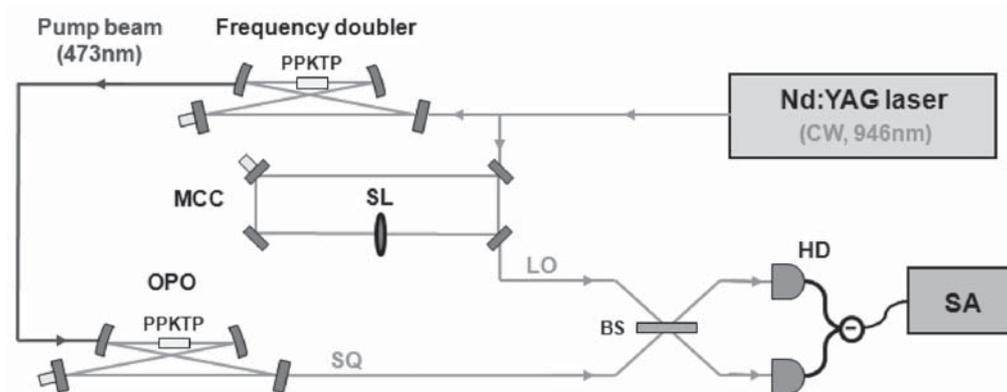


図1 スクイズド光生成実験の光学装置

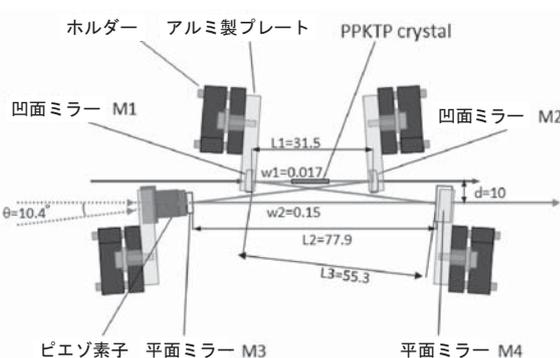


図2 光パラメトリック発振器の構造

ザー (Innolight Mephist QTL: 出力 0.5W, 波長 946nm) を使用した。光源からのレーザー光を分割し、一部を励起光生成部 (Frequency doubler) に入力した。励起光 (Pump beam, 波長 473nm) はスクイズド光の生成に必要であり、第2高調波発生の原理により生成される。スクイズド光生成部である光パラメトリック発振器 (Optical parametric oscillator: OPO) に、発振閾値以下の強度の励起光を入力すると、シングルモードのスクイズド光 (Squeezed light: SQ, 波長 946nm) が生成される。スクイズド光 SQ は主光源から生成された局部発振光 (Local oscillator: LO) とビームスプリッター (Beam splitter: BS, 反射率 50%) で合波され、バランス型ホモダイン測定により検出される。

図2を使ってスクイズド光生成部である光パラメトリック発振器について説明する。励起光生成部も図2と同じ光学系の構造を持つ¹⁶⁾。本研究で作成した光パラメトリック発振器はボウタイ型の光共振器と非線形光学結晶により構成されている。レーザー光を光共振器に閉じ込めることにより、非線形光学結晶との相互作用を高め、スクイズド光の生成を高効率化している。光共振器は

2枚の凹面ミラー M1, M2 (曲率半径 25mm) と2枚の平面ミラー M3, M4 で構成されている。平面ミラー M4 は波長 946nm に対して透過率 0.1 を持ち、スクイズド光の出力ミラーとして用いられる。他の3枚のミラー M1, M2, M3 は波長 946nm に対して高反射率を持つ。また波長 473nm に対しては全てのミラーが高透過率を持つ。平面ミラー M3 は piezo 素子に装着されている。この piezo 素子を用いて光共振器長が共振条件を満たすようにフィードバック制御を行っている。各ミラーはアルミプレートを通じてホルダー (Newport U50-P) に装着されている。各ホルダーはステンレス製のロッドに装着され、光学除振台に固定されている。光軸高さは光学除振台の上面から 50.8mm (2inch) となるように調整されている。非線形光学結晶として周期分極反転構造を有する KTiOPO_4 (Periodically-poled KTiOPO_4 : PPKTP) 結晶を用いた (Raicol crystals)。結晶サイズは長さ 1mm, 断面積 $1 \times 1\text{mm}^2$ である。PPKTP 結晶は二枚の凹面ミラーの中心に設置されている。また PPKTP 結晶は piezo 素子によって温度が 60°C となるように制御されている。これはスクイズド光生成を高効率で行うために、非線形光学結晶の位相整合条件を保持するためである。また共振器長さが 220mm となるようにミラーが配置されており、その結果、PPKTP 結晶中心部でのビームウェストサイズは $17\mu\text{m}$ になると計算される。図3に光パラメトリック発振器の写真を示す。実際にスクイズド光を生成する際には、発振器全体にアクリル製の箱をかぶせることにより空気の対流や空中の埃の影響を軽減させた。

次にスクイズド光を検出するためのバランス型ホモダイン測定について説明する。ホモダイン測定を行うためにはスクイズド光と同じ波長、空間モードを持った

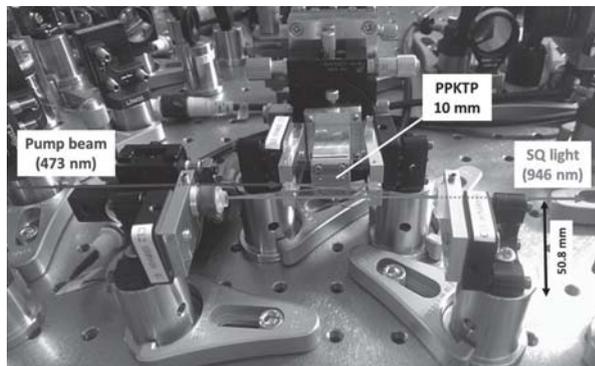


図3 光パラメトリック発振器の写真

局部発振光が必要となる。そのため本研究では主光源から分割されたレーザー光の一部を局部発振光として用いた。スクイズド光 SQ と局部発振光 LO をビームスプリッター BS で合波させた後、ホモダイン検出器 (Homodyne detector : HD) によりスクイズド光の雑音パワーを測定した。局部発振光は予めモード整形共振器 (Mode cleaning cavity : MCC) に通過させることにより、その空間モードが整形されている。モード整形共振器は四角形状をしており、2枚の全反射ミラー、2枚の透過率 0.01 の部分反射ミラー、焦点距離が 750mm の球面レンズにより構成されている。共振器長は 1500mm となるように調整した。モード整形共振器を通過してきた局部発振光は、スクイズド光と空間モードが高効率で合致している。またモード整形共振器は局部発振光の低周波領域における古典的雑音を除去する働きもある。その結果、高い効率でのホモダイン測定が可能となる。バランス型ホモダイン検出器 HD は自作のものであり、2個の高効率なシリコンフォトダイオード (HAMAMATSU、波長 946nm における防反射コート付き) と、これらのフォトダイオードからの光電流の差分を増幅するための電気回路で構成されている。ホモダイン検出器 HD で得られた電気信号をスペクトラムアナライザー (Spectrum analyzer : SA) (GW Instek GSP-9300) でモニターした。

5. 実験結果

図 4 にシングルモードスクイズド光の測定結果の一例を示す。励起光パワーは 100mW である。横軸の時間はスクイズド光 SQ と局部発振光 LO との光位相差に対応する。測定周波数は 2MHz、スペクトラムアナライザーの分解能幅は 30kHz、ビデオ幅は 300H である。縦

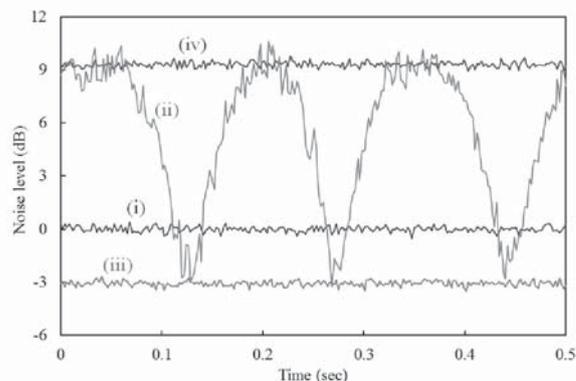


図4 シングルモードスクイズド光の測定結果。(i) ショットノイズレベル、(ii) ローカルオシレーターの光位相をスキャン、(iii) ローカルオシレーターの光位相を最もスクイズされた位相振幅にロック、(iv) ローカルオシレーターの光位相を最もアンチスクイズされた位相振幅にロック。(i)、(iii)、(iv) のは測定結果を 10 回平均取ったものである。

軸は光のショット雑音 (i) で規格化された雑音パワーを表す。(ii) はスクイズド光 SQ と局部発振光 LO との光位相差を連続的に変化させたときの雑音パワーである。位相によって雑音パワーが変化する性質はスクイズド光の特徴の一つである。特定の位相方向ではショット雑音レベルを明らかに下回っていることが確認できた。(iii)、(iv) は局部発振光 LO の位相をスクイズド光 SQ の雑音パワーが最も圧縮 (スクイズ) された位相振幅及び増幅 (アンチスクイズ) された位相振幅にロックしたときの測定結果である。それぞれの位相振幅において $-3.08 \pm 0.13\text{dB}$ 、 $9.29 \pm 0.13\text{dB}$ の雑音パワーを計測した。

励起光パワーを変化させながらこのような測定を何度か行った。その結果を図 5 に示す。横軸は励起光パワー、縦軸は雑音パワーのレベルを示す。(i) はスクイーディングレベル、(ii) はアンチスクイーディングレベルをそれぞれ表す。丸は測定結果、実線は各種実験パラメーターを使って解析した理論値を表す。理論的な解析手法は参考文献⁴⁾ に詳細が説明されている。(ii) のアンチスクイーディングレベルでは測定結果と理論曲線がよく一致しているが、(i) のスクイーディングレベルでは若干の差が見られる。これは実験の不完全性によるものと思われる。光共振器の制御の不完全性や機械的安定性の欠如が問題ではないかと推測している。今後の研究で原因を解明していく。

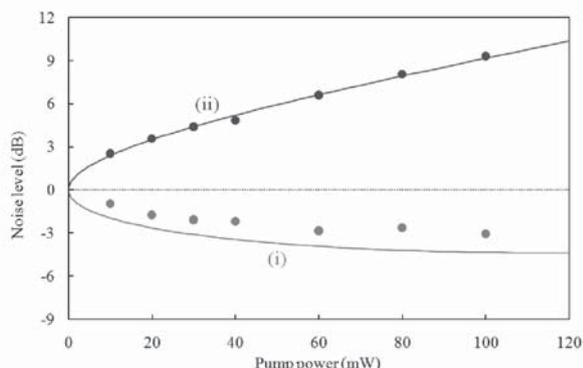


図5 スクイズド光のノイズレベルのポンプ光強度依存性の測定結果。(i)スクイズ、(ii)アンチスクイズされた直交位相振幅成分のノイズレベル。

6. 今後の研究課題

今後の研究過程ではスクイズド光生成部である光パラメトリック発振器 (OPO) を増設し、独立なシングルモードスクイズド光を2本生成する。次に二つのシングルモードのスクイズド光をビームスプリッターで合波させ、エンタングルした2モードスクイズド光を生成する。その後、2モードスクイズド光源の量子エンタングルメントの検証実験を行う予定である。実際の量子レーダーではエンタングルした光の一方だけが目標物体に向けて照射され、損失や雑音の影響を受ける。もう一方の光は直接受信機へ送られる。このような損失の影響下では2モードスクイズド光の量子エンタングルメントが劣化することが危惧される。本研究ではそのような状況下で量子エンタングルメントを検証する方法に関しても理論的な解析に着手している。その研究成果の一部は量子情報科学研究所紀要に採録されている¹⁷⁾。今後は量子光学の理論に基づきながら実験的に得られた測定データにおける光学損失や雑音の影響をさらに定量的に解析し、量子レーダーの性能を見極めていく。

注・参考文献

- 1) S. Lloyd, "Enhanced Sensitivity of Photodetection via Quantum Illumination," *Science* 321, 1463–1465 (2008).
- 2) S. H. Tan, B. I. Erkmen, V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, S. Pirandola, and J. H. Shapiro, "Quantum Illumination with Gaussian States," *Phys. Rev. Lett.* 101, 253601 (2008).
- 3) J. H. Shapiro, and S. Lloyd, "Quantum illumination versus coherent-state target detection," *New J. of Phys.* 11, 063045 (2009).
- 4) G. Masada, "Two-mode squeezed light source for quantum illumination and quantum imaging," *Proc. SPIE* 9615, Quantum Communications and Quantum Imaging XIII, 961503, (2015).
- 5) O. Hirota, ed. [Squeezed light], Elsevier, (1992).
- 6) H. P. Yuen, "Two-photon coherent states of the radiation field," *Phys. Rev. A* 13, 2226–2243 (1976).
- 7) H. P. Yuen and V. W. S. Chan, "Noise in homodyne and heterodyne detection," *Opt. Lett.* 8, 177–179 (1983).
- 8) R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke, J. C. Mertz, and J. F. Valley, "Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity," *Phys. Rev. Lett.* 55, 2409–2412 (1985).
- 9) R. M. Shelby, M. D. Levenson, S. H. Perlmutter, R. G. DeVoe, and D. F. Wallst, "Broad-Band Parametric Deamplification of Quantum Noise in an Optical Fiber," *Phys. Rev. Lett.* 57, 691–694 (1986).
- 10) L. A. Wu, H. J. Kimble, J. L. Hall, and H. Wu, "Generation of Squeezed States by Parametric Down Conversion," *Phys. Rev. Lett.* 57, 2520–2523 (1986).
- 11) S. L. Braunstein and P. van Loock, "Quantum information with continuous variables," *Rev. Mod. Phys.* 77, 513–577 (2005).
- 12) A. Furusawa, J. L. Sørensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble, and E. S. Polzik, "Unconditional Quantum Teleportation," *Science* 282, 706–709 (1998).
- 13) J. N. Hollenhorst, "Quantum limits on resonant-mass gravitational-radiation detectors," *Phys. Rev. D* 19, 1669–1679 (1979).
- 14) C. M. Caves, "Quantum-mechanical noise in an interferometer," *Phys. Rev. D* 23, 1693 (1981).
- 15) K. Goda, O. Miyakawa, E. E. Mikhailov, S. Saraf, R. Adhikari, K. McKenzie, R. Ward, S. Vass, A. J. Weinstein, and N. Mavalvala, "A quantum-enhanced prototype gravitational-wave detector," *Nature Phys.* 4, 472–476 (2008).
- 16) G. Masada, "Efficient Generation of Second Harmonic Wave with Periodically Poled KTiOPO₄ crystal at 473 nm," *Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin*, 4, 19–22 (2014).
- 17) G. Masada, "Evaluation method for inseparability of two-mode squeezed vacuum states in a lossy optical medium," *Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin*, 5, 19–23 (2015).