

«مقاله پژوهشی»

آنتروپی و اثرات واهمدوسی در رادار چلانده دو مدی کوانتومی

میلاذ نوروزی¹، سید محمد حسینی²، جمیله سیدیزدی^{3*}، فاطمه ایران نژاد⁴

1. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

2. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

3. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

4. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

تاریخ دریافت: 1401/08/20 تاریخ پذیرش: 1401/09/25

Formation Entropy and Decoherence Effects in Quantum Two-Mode Squeezed Radar

M. Norouzi¹, S.M. Hosseiny², J. Seyedyazdi^{3*}, F. Irannezhad⁴

1. Ph.D. Student, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

2. Ph.D. Student, Department of Physics, Urmia University, Urmia, Iran

3. Associate Professor, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

4. Ph.D. Student, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Received: 2022/11/11

Accepted: 2022/12/16

Abstract

In this study, for the first time, the calculation and investigation of the qualitative behaviors of entropy and decoherence effects in quantum two-mode squeezed (QTMS) radar when the target is present and the generated signal is transmitted to the target is discussed. In general, incoherence is associated with a decrease in the purity of the state of the system, that is, the transition from a pure state to a mixed state. Additionally, by examining the entropy, we examine the entanglement of the system for the effective number of photons at the detector input. In addition, various conditions affecting the performance improvement of a quantum detector in QTMS radar are evaluated. The quantum state of the system changes from the coherent state to the incoherent state with the increase of temperature and squeezing parameter (at high temperatures). The decoherence effects are inversely proportional to the squeezing parameter and signal power. The ratio of received photons in the receiver is directly proportional to the squeezing parameter and signal power. Increasing the ratio of received photons in the receiver increases the entropy of the system and reduces the decoherence effects of the system, which is a very important result. Moreover, the qualitative behaviors of entropy and purity are quite similar.

Keywords

Quantum Radar, Quantum Illumination, Purity, Quantum Two-Mode Squeezed Radar, Formation Entropy

چکیده

در این مقاله برای اولین بار به محاسبه و بررسی رفتار کیفی آنتروپی و اثرات واهمدوسی در رادار چلانده دومی کوانتومی زمانی که هدف حضور دارد و سیگنال تولید شده به سمت هدف ارسال می شود، پرداخته می شود. به طور کلی، واهمدوسی با کاهش خلوص حالت سامانه، یعنی انتقال از حالت خالص به حالت آمیخته همراه است. علاوه بر این با بررسی آنتروپی، درهم تنیدگی سامانه را برای تعداد مؤثر فوتون ها در ورودی آشکارساز بررسی می کنیم. افزون بر این، شرایط مختلف مؤثر بر بهبود عملکرد یک آشکارساز کوانتومی در رادار چلانده دو مدی کوانتومی مورد ارزیابی قرار می گیرد. حالت کوانتومی سامانه از حالت همدوس با افزایش دما و پارامتر چلانده (در دماهای بالا) به حالت ناهمدوس تبدیل می شود. اثرات واهمدوسی با پارامتر چلانده و توان سیگنال نسبت عکس دارد. نسبت فوتون های دریافتی در گیرنده با پارامتر چلانده و توان سیگنال نسبت مستقیم دارد. افزایش نسبت فوتون های دریافتی در گیرنده، هم آنتروپی سامانه را افزایش می دهد و هم اثرات واهمدوسی سامانه را کاهش می دهد که نتیجه بسیار مهمی است. علاوه بر این، رفتارهای کیفی آنتروپی و خلوص کاملاً مشابه هستند.

واژه های کلیدی

رادار کوانتومی، برتابش کوانتومی، خلوص، رادار چلانده دومی کوانتومی، آنتروپی

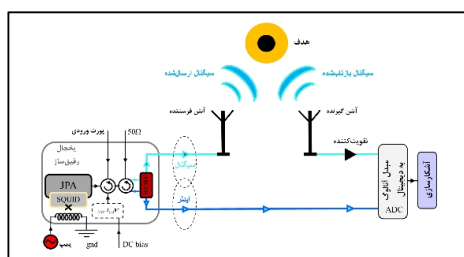
مقدمه

خالص¹⁵ به حالت آمیخته¹⁶ همراه است [50]. به منظور بررسی اثرات واهمدوسی از ابزاری به نام خلوص و برای بررسی رفتار درهم‌تنیدگی از آنتروپی تشکیل¹⁷ استفاده می‌کنیم که در بخش‌های بعد به آن پرداخته می‌شود.

در این کار برای اولین بار، به محاسبه و بررسی رفتارهای کیفی آنتروپی و اثرات واهمدوسی (خلوص) در رادارهای QTMS، زمانی که هدف وجود دارد و سیگنال تولید شده به سمت هدف ارسال می‌شود، پرداخته شده است. می‌دانیم که زمانی که هدف حضور دارد به این معنی است که محیط¹⁸ دارای نویز زیادی¹⁹ است. از این جهت بررسی این رفتارها در چنین محیطی زمینه ساخت رادارهای کوانتومی پیشرفته و بهبود یافته را فراهم می‌آورد.

مدل و اصول کار رادار QTMS

مدل ارائه شده در این کار، نمونه اولیه رادار QTMS [23]، 25، 27، 28 است که عملکرد آن را می‌توان در 4 بخش خلاصه کرد [23-42]: تولید جریانی از جفت فوتون‌های درهم‌تنیده (سیگنال/ایدلر) توسط JPA، سیگنال را تقویت کرده و به هدف ارسال کنید و ایدلر را رکورد کنید. پس از دریافت سیگنال بازتاب‌شده از هدف، دوباره سیگنال و ایدلر را تقویت کرده و مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) را اعمال کنید. و در نهایت وجود یک هدف را می‌توان با یک آشکارساز²⁰ مناسب استنباط کرد [23، 25، 27، 28]. طرح‌واره بلوکی یک رادار کوانتومی دو مدی چلانده در حالت کلی در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1. طرح‌واره بلوکی یک رادار QTMS

حالت‌های گاوسی¹ نقش مهمی در سامانه‌های کوانتومی، از جمله برتابش کوانتومی² [2-22]، رادار کوانتومی³ [23-41]، مدهای میدان نور⁴ [43 42]، لیدار کوانتومی⁵ [44-46]، اتم‌های سرد⁶ [47] و اکسیتون‌ها در کاواک‌های فوتونیک⁷ [48] ایفا می‌کنند. حالت‌های گاوسی را می‌توان به راحتی توسط منابع موجود تولید و به صورت تجربی کنترل کرد [49]. یکی از کاندیداها برای تولید حالت‌های گاوسی، رادار چلانده دو مدی کوانتومی⁸ (QTMS) است. سیگنال‌های درهم‌تنیده‌ای که می‌توانند در نمونه اولیه رادار QTMS استفاده شوند، خلاء چلانده دو مدی⁹ (TMSV) نامیده می‌شوند [23] که از دو پرتوی درهم‌تنیده با بسامدهای متفاوت تشکیل شده‌اند. در طول تولید جریان پالس‌های TMSV، نتایج اندازه‌گیری ولتاژهای مربعی از توزیع گاوسی چند متغیره پیروی می‌کند که با میانگین و ماتریس کوواریانس آن مشخص می‌شود. به دلیل این رفتار، سیگنال‌های TMSV در بین به اصطلاح «حالت‌های گاوسی» در اپتیک کوانتومی¹⁰ طبقه‌بندی می‌شوند [23]. دستگاهی که می‌تواند برای تولید سیگنال‌های درهم‌تنیده TMSV در رادار QTMS استفاده شود، تقویت کننده پارامتریک جوزفسون¹¹ (JPA) نامیده می‌شود که اساساً یک مشدّد مایکروویو با بسامد تشدید متغیر است [23-28، 30]. در رادارهای QTMS، سرکوب اثرات واهمدوسی¹² و تقویت درهم‌تنیدگی¹³ از جمله راه‌کارهای مهم برای بهبود عملکرد رادار کوانتومی است. به طور کلی، واهمدوسی با کاهش خلوص¹⁴ حالت سامانه، یعنی انتقال از حالت

1. Gaussian States
2. Quantum Illumination
3. Quantum Radar
4. Light Field Modes
5. Quantum Lidar
6. Cold Atoms
7. Excitons in Photonic Cavities
8. Quantum Two-Mode Squeezed Radar (QTMS)
9. Two-Mode Squeezed Vacuum
10. Quantum Optics
11. Josephson Parametric Amplifier (JPA)
12. Decoherence Effects
13. Entanglement
14. Purity

15. Pure State
16. Mixed State
17. Entropy of Formation
18. Environment
19. High Noise
20. Detector

فرض کنید هدف در یک حمام گرمایی است (با مقدار زیادی نویز گرمایی)، بدون اتلاف اجزاء رادار، بدون نویز در آیدلر رکورد شده و بدون جابه‌جایی فاز بین سیگنال ارسالی و آیدلر رکورد شده است [33, 3]. از این رو، عناصر ماتریس کوواریانس برای رادار QTMS به دست می‌آید [33]:

$$C_{11} = C_{22} = \frac{k (\cosh(2r) - 1) + 2n_i + 1}{4} \quad (2)$$

$$C_{33} = C_{44} = \frac{\cosh(2r)}{4} \quad (3)$$

$$C_{13} = -C_{24} = \frac{\sqrt{k} \sinh(2r)}{4} \quad (4)$$

حالت گاوسی را حالت خلاء چلاننده دومدی⁷ می‌نامند. اگر $n_i = 0$ باشد [54]، ضریب k نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده⁸ است که از رادار QTMS گسیل شده‌اند. همچنین در معادلات (2-4) n_i تعداد میانگین فوتون در حمام گرمایی⁹ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$n_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega_i}{k_B T}\right) - 1} \quad (5)$$

که در آن $\hbar = h/2\pi$ ، h ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن، T دما، $\bar{\omega}_i = 2p\omega_i$ و ω_i بسامد سیگنال ($i=1,2$) هستند.

بحث و نتایج

آنتروپی تشکیل

آنتروپی تشکیل، تعداد مؤثر فوتون‌ها در ورودی آشکارساز¹⁰ در یک رادار QTMS است. البته آنتروپی تشکیل را می‌توان به عنوان ابزاری برای بررسی درهم‌تنیدگی یک سامانهٔ دوبخشی نیز استفاده کرد. به منظور تعریف آنتروپی

با وجود اینکه ریشهٔ اصلی عملکرد یک رادار QTMS در برتابش کوانتومی است، اما تفاوت‌هایی وجود دارد که آنها را از یکدیگر متمایز می‌کند. مهم‌ترین تفاوت آنها این است که در رادار QTMS، تأخیر زمانی¹ در اندازه‌گیری سیگنال و آیدلر استفاده می‌شود (یعنی از خطوط تأخیر² و اندازه‌گیری مشترک³ استفاده نمی‌شود) اما در برتابش کوانتومی این چنین نیست (یعنی از خطوط تأخیر و اندازه‌گیری مشترک در آنها استفاده می‌شود) [23, 25, 27, 28].

به منظور درک بهتر مباحث مطرح شده، توصیف مختصری ارائه می‌گردد. نمونه خاصی از همبستگی‌های بالای بین پارامترهای یک سامانه به‌صورت درهم‌تنیدگی کوانتومی خود را نشان می‌دهد که مشابه کلاسیک ندارد. همبستگی توسط ماتریس کوواریانس فرمول‌بندی می‌شود. می‌توان بیان کرد که درهم‌تنیدگی کوانتومی ریشه در اصل برهم‌نهی کوانتومی⁴ دارد. یک سامانهٔ دوبخشی⁵ در نظر بگیرید. اگر اندازه‌گیری روی یک بخش، نتیجهٔ اندازه‌گیری بخش دیگر را تحت تأثیر قرار دهد، بیان می‌شود که سامانهٔ دوبخشی درهم‌تنیده است، در غیر این صورت، سامانه تفکیک‌پذیر است [51 و 52]. این دو بخش می‌توانند کیوبیت⁶، فوتون یا هر چیز دیگری که بتوان اصول مکانیک کوانتوم را برای آن پیاده‌سازی کرد، باشند.

در اینجا همبستگی بین کوادراتورهای سامانه برقرار است. شکل کلی ماتریس کوواریانس که نشان‌دهنده همبستگی بین کوادراتورهای سامانه است، در رادار QTMS برای کوادراتورهای خروجی JPA در حضور هدف به‌صورت زیر بیان می‌شود [25-27, 30, 31, 34, 53-56]:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & 0 & C_{13} & 0 \\ 0 & C_{11} & 0 & -C_{13} \\ C_{13} & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & -C_{13} & 0 & C_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

1. Time delay
2. Delay Lines
3. Joint Measurement
4. Superposition Principle
5. Bipartite
6. Qubit

7. Two-Mode Squeezed Vacuum State

8. Receiver

9. Thermal Bath

10. Detector

که در آن ρ حالت کوانتومی سامانه است. حداکثر مقدار خلوص برابر واحد است. مقدار خلوص هرچه به یک نزدیکتر باشد، اثرات واهمدوسی در سامانه ضعیف تر است [50].

در این کار، به دلیل کاربردهای فراوان رادارهای QTMS و لیدارهای کوانتومی در توان‌های پایین به‌ویژه در پزشکی جهت شناسایی سلول‌های سرطانی، سعی شده است که این رادارها در توان‌های پایین (پارامتر چلانگی پایین) بررسی شوند. البته اساساً رادارهای QTMS در توان‌های پایین نسبت به هم‌تای کلاسیک خود برتری دارند. علاوه بر این، به دلیل اینکه سیگنال در بدو تولید ابتدا درون یخچال‌های 7 میلی‌کلوین قرار دارد و بعد از تقویت در دمای 4 کلوین در دمای اتاق انتقال می‌یابد [23، 3 و 27]، لذا در این کار هم در دماهای بسیار پایین (یعنی زیر 3 کلوین) و هم در دمای اتاق، 300 کلوین، رفتارهای مربوط به آنتروپی تشکیل و خلوص بررسی شده‌اند.

با توجه به معادلات (8-1)، رفتار کیفی آنتروپی تشکیل بر حسب دما در رادار QTMS برای پارامترهای چلانگی مختلف در شکل 2 ترسیم شده است. در شکل 2 آ، بیان می‌شود که با افزایش پارامتر چلانگی، در دماهای پائین (کمتر از 200 میلی‌کلوین)، آنتروپی سامانه افزایشی خواهد بود اما برای دماهای بالای 200 میلی‌کلوین می‌بینیم که با افزایش پارامتر چلانگی، آنتروپی سرکوب می‌شود. البته این سرکوب برای دماهای نزدیک به دمای اتاق (300 کلوین) نیز برقرار است (شکل 2 ب). همان طور که بیان شد، می‌توان آنتروپی را به عنوان ابزاری برای بررسی درهم‌تنیدگی به کار گرفت. از طرفی آنتروپی، تعداد مؤثر فوتون‌ها در ورودی آشکارساز است [54]. لذا مشاهده می‌شود که درهم‌تنیدگی برای تعداد مؤثر فوتون‌ها در ورودی آشکارساز حفظ می‌شود حتی اگر آشکارساز در دمای اتاق باشد. نکته قابل توجه دیگر این است که پارامتر چلانگی کم نشان‌دهنده توان پایین سیگنال است [59]. لذا مشاهده می‌شود رادار QTMS در توان پایین، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد. این توان پایین سیگنال، کاربردهای فراوانی از جمله در پزشکی دارد.

تشکیل، ابتدا منفیت لگاریتمیک¹ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [3 و 53-56]:

$$E_N = \max[0, -\log(2h^-)] \quad (6)$$

که در آن h^- کوچک‌ترین ویژه مقدار بسیط ترانهاده جزئی ماتریس کوواریانس C است و به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [3 و 53-56]:

$$h^- = 2^{-1/2} \frac{\alpha C_{11}^2 + C_{33}^2 + 2C_{13}^2 - \sqrt{(C_{11}^2 - C_{33}^2)^2 + 4C_{13}^2(C_{11} + C_{33})^2}}{\alpha} \quad (7)$$

با توجه به معادله 6، آنتروپی تشکیل به شرح زیر به دست می‌آید [53]:

$$E_f = s_+ \log_2 s_+ - s_- \log_2 s_- \quad (8)$$

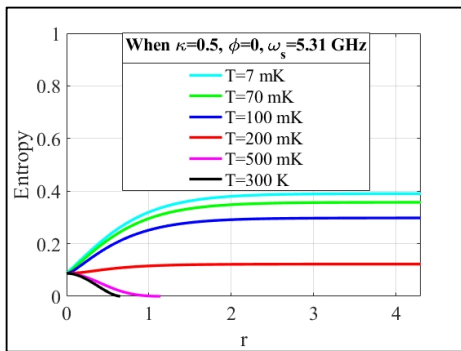
که در آن $s_{\pm} = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 4q}}{2\alpha}$ با $q = 2^{-E_N}$ است. آنتروپی تشکیل رابطه (8) همانند درهم‌تنیدگی بدون واحد در نظر گرفته شده است.

خلوص سامانه

اثرات واهمدوسی به دلایل مختلفی وارد سامانه می‌شود و بررسی این اثرات برای یک رادار QTMS بسیار مهم است. به طور کلی، واهمدوسی با کاهش خلوص حالت سامانه، یعنی انتقال از حالت خالص به حالت آمیخته همراه است [50]. به عبارت دیگر یعنی هرچه خلوص سامانه کمتر باشد، واهمدوسی سامانه بیشتر است. لذا خلوص در یک رادار QTMS به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [57-58]:

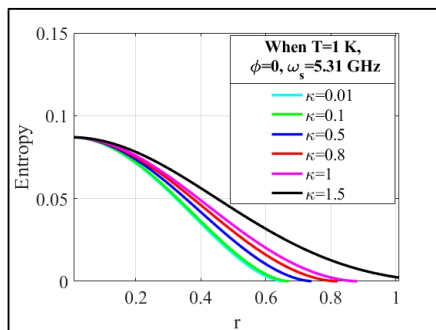
$$P = \text{Tr}[\rho^2] = 1 / \sqrt{(C_{11}C_{33} - C_{13}^2)(C_{11}C_{33} - C_{24}^2)} \quad (9)$$

در شکل 4، رفتار کیفی آنتروپی تشکیل بر حسب پارامتر چلانده در رادار QTMS برای دماهای مختلف، ترسیم شده است. در این شکل به وضوح دیده می‌شود که در پارامتر چلانده پایین (توان پایین) آنتروپی حتی در دمای اتاق (300 کلون) نیز حفظ می‌شود. بنابراین درهم‌تنیدگی نیز حفظ خواهد شد. این بدان جهت است که تعداد مؤثر فوتون در ورودی آشکارساز به قدری است که در دمای اتاق نیز درهم‌تنیدگی داشته باشیم.

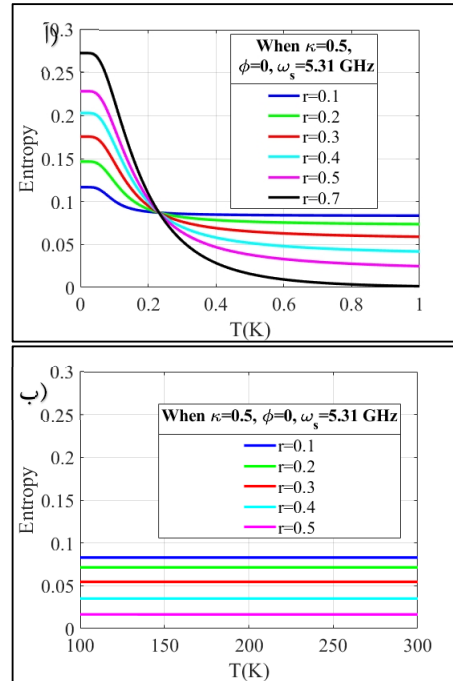


شکل 4. رفتار کیفی آنتروپی در رادار QTMS بر حسب پارامتر چلانده r برای دماهای مختلف

در شکل 5، رفتار کیفی آنتروپی تشکیل بر حسب پارامتر چلانده در رادار QTMS برای نسبت فوتون‌های دریافتی گیرنده مختلف ترسیم شده است. در اصل، نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده با پارامتر چلانده و توان سیگنال نسبت مستقیم دارد. با افزایش فوتون‌های دریافتی همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، توان سیگنال و پارامتر چلانده نیز افزایش یافته است.

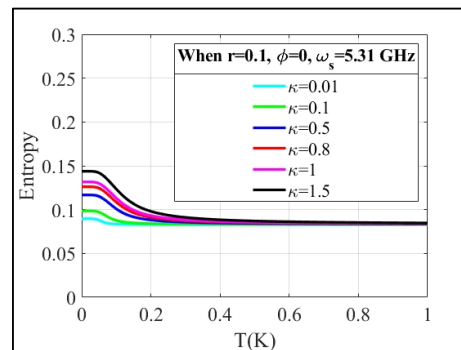


شکل 5. رفتار کیفی چلانده رادار QTMS بر حسب دما برای نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده K مختلف

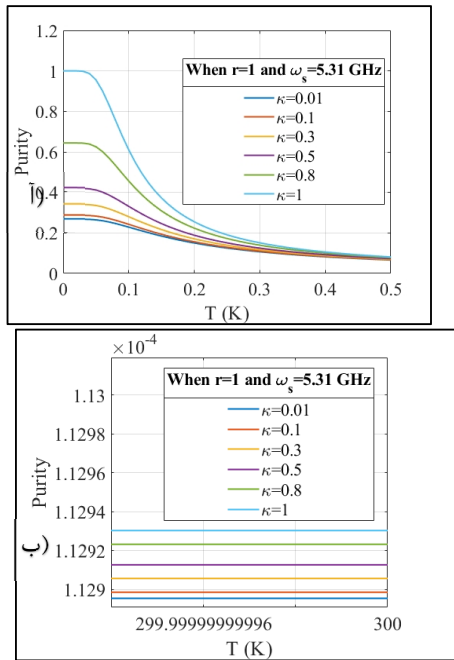


شکل 2. رفتار کیفی آنتروپی در رادار QTMS بر حسب دما T برای پارامتر چلانده مختلف

در شکل 3، رفتار کیفی آنتروپی تشکیل بر حسب دما در رادار QTMS برای نسبت فوتون دریافتی در گیرنده مختلف، ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که در دمای کمتر از 500 میلی کلون با افزایش نسبت فوتون دریافتی در گیرنده، آنتروپی افزایش می‌یابد اما برای دماهای بالاتر از 500 میلی کلون افزایش نسبت فوتون دریافتی، تغییر محسوسی را در آنتروپی سامانه اعمال نخواهد کرد.



شکل 3. رفتار کیفی آنتروپی در رادار QTMS بر حسب دما T برای نسبت فوتون دریافتی در گیرنده K مختلف

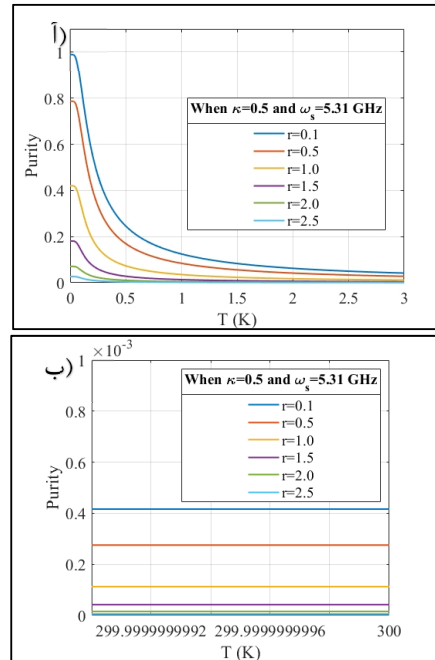


شکل 7. رفتار کیفی خلوص در رادار QTMS برحسب دما T برای نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده K مختلف

در شکل 7، رفتار کیفی خلوص برحسب دما نسبت فوتون‌های دریافتی گیرنده مختلف توصیف شده است. می‌بینیم که با افزایش نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده، خلوص سامانه افزایش می‌یابد (شکل 7 آ و ب) یعنی اثرات واهمدوسی سامانه کاهش می‌یابند. البته در دماهای بالا (شکل 7 ب) این افزایش بسیار نامحسوس است. بنابراین افزایش نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده، هم آنتروپی سامانه را افزایش می‌دهد و هم اثرات واهمدوسی سامانه را کاهش می‌دهد.

رفتار کیفی خلوص برحسب پارامتر چلانگی برای دماهای مختلف در شکل 8، ترسیم شده است. در این شکل نیز اهمیت توان‌های سیگنال پایین در رادار QTMS نشان داده می‌شود. می‌بینیم که اولاً با افزایش دما و پارامتر چلانگی (توان سیگنال)، اثرات واهمدوسی افزایش می‌یابد. ثانیاً در توان‌های سیگنال پایین (کمتر از 3)، همدوسی کوانتومی در بیشینه مقدار و اثرات واهمدوسی در کمینه مقدار خود است.

در شکل‌های 5-2، با استفاده از آنتروپی، رفتار درهم‌تنیدگی نیز گزارش شده است. در ادامه، با استفاده از خلوص، اثرات واهمدوسی گزارش داده خواهد شد.



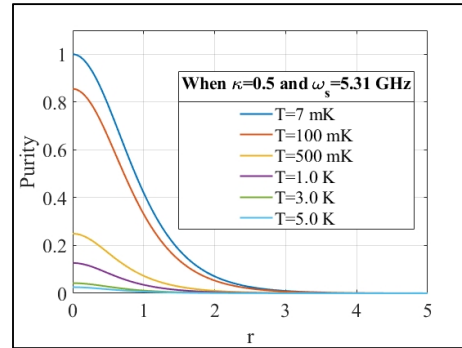
شکل 6. رفتار کیفی خلوص در رادار QTMS برحسب دما برای پارامترهای چلانگی مختلف

در شکل 6، رفتار کیفی خلوص برحسب دما برای پارامترهای چلانگی مختلف ترسیم شده است. ناهمدوسی با کاهش خلوص (بیوریتی) حالت سامانه، یعنی انتقال از حالت خالص به حالت آمیخته همراه است [50]. در شکل 6 حالت خالص سامانه برابر یک است. با افزایش دما اثرات واهمدوسی که مهم‌ترین دلیل آن وجود نویز در محیط است، وارد سامانه می‌شوند و حالت، از حالت همدوس با افزایش دما و پارامتر چلانگی به حالت ناهمدوس تبدیل می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که اثرات واهمدوسی با پارامتر چلانگی نسبت عکس دارد. زمانی که پارامتر چلانگی کوچک است یعنی توان سیگنال پایین است، همدوسی کوانتومی برای دماهای بالا حفظ می‌شود، اما بسیار کم است، که این امر به دلیل وجود اثرات ناهمدوسی در دماهای بالا است (شکل 6 ب).

در شکل 10، رفتارهای کیفی آنتروپی و خلوص در رادار QTMS برحسب پارامتر چلانده ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که در دماهای پایین (شکل 10 آ) رفتارهای آنتروپی و خلوص سامانه، کاملاً مشابه است.

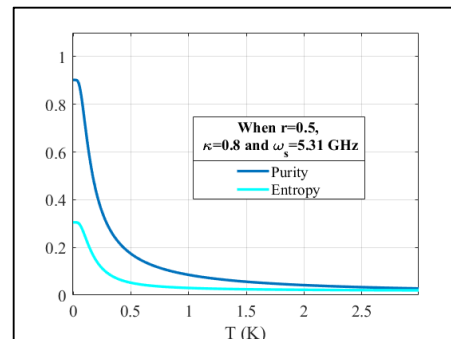
نتیجه‌گیری

در این کار، برای اولین بار به محاسبه و بررسی رفتار کیفی آنتروپی و خلوص (اثرات واهمدوسی) در رادار چلانده دومی کوانتومی زمانی که هدف حضور دارد و سیگنال تولید شده به سمت هدف ارسال می‌شود، پرداخته شد. به طور کلی، واهمدوسی با کاهش خلوص حالت سامانه، یعنی انتقال از حالت خلوص به حالت آمیخته همراه است. علاوه بر این با بررسی آنتروپی، درهم‌تنیدگی سامانه را برای تعداد مؤثر فوتون‌ها در ورودی آشکارساز بررسی کردیم. افزون بر این، شرایط مختلف مؤثر بر بهبود عملکرد یک آشکارساز کوانتومی در رادار چلانده دو مدی کوانتومی مورد ارزیابی قرار گرفت. رادار QTMS در توان پایین، رفتار بهتری از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، در پارامتر چلانده پایین (توان پایین) آنتروپی حتی در دمای اتاق (300 کلوین) نیز حفظ می‌شود، اما مقدار کمی دارد. نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده با پارامتر چلانده و توان سیگنال نسبت مستقیم دارد. با افزایش نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده، توان سیگنال و پارامتر چلانده نیز افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دما می‌بینیم که اثرات واهمدوسی که مهم‌ترین دلیل آن وجود نویز در محیط است، وارد سامانه می‌شود و حالت آن، از حالت همدوس با افزایش دما و پارامتر چلانده (در دماهای بالا) به حالت واهمدوس تبدیل می‌شود. از این‌رو، اثرات واهمدوسی در دماهای بالا با پارامتر چلانده و توان سیگنال نسبت عکس دارد. زمانی که پارامتر چلانده کوچک است یعنی توان سیگنال پایین است، واهمدوسی کوانتومی برای دماهای بالا حفظ می‌شود اما بسیار کم است و این امر به دلیل وجود اثرات واهمدوسی در دماهای بالا است. بنابراین افزایش نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده، هم آنتروپی سامانه را افزایش می‌دهد و هم اثرات واهمدوسی سامانه را کاهش می‌دهد که نتیجه بسیار مهمی است. رفتارهای کیفی آنتروپی و خلوص کاملاً مشابه هستند. افزون بر این، مشاهده شد که نقاط بیشینه و کمینه آنتروپی و خلوص هم‌بروزی دارند. لذا می‌توان با بررسی یکی از این رفتارها، به نتایج مربوط به رفتار دیگری، در رادار QTMS دست یافت.

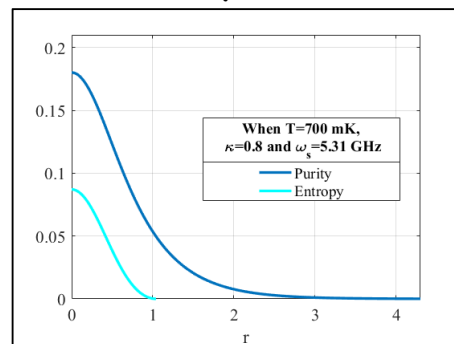


شکل 8. رفتار کیفی خلوص در رادار QTMS برحسب پارامتر چلانده r برای دماهای T مختلف

حال رفتارهای آنتروپی و خلوص را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. در شکل 9، رفتارهای کیفی خلوص و آنتروپی در رادار QTMS برحسب دما ترسیم شده است. در این شکل رفتار کاملاً مشابهی را می‌بینیم که از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، مشاهده می‌کنیم که نقاط بیشینه و کمینه آنتروپی و خلوص هم‌بروزی دارند. لذا می‌توان با بررسی یکی از رفتارها به نتایج رفتار دیگر دست یافت.



شکل 9. مقایسه رفتارهای کیفی خلوص و آنتروپی در رادار QTMS برحسب دما T



شکل 10. مقایسه رفتارهای کیفی خلوص و آنتروپی در رادار QTMS برحسب پارامتر چلانده r

پیوست

اصطلاحات مقاله در جدول 1 بیان شده است:

جدول 1. اصطلاحات مقاله

عبارت لاتین	معادل فارسی
Gaussian states	حالات گاوسی
Quantum illumination	برتابش کوانتومی
Quantum radar	رادار کوانتومی
Field modes	مدهای میدان
Quantum Lidar	لیدار کوانتومی
Cold atoms	اتم‌های سرد
Excitons	اکسیتون‌ها
Photonic cavities	کاواک‌های فوتونیک
Quantum two-mode squeezed radar (QTMS)	رادار چلانده دو مدی کوانتومی
Two-mode squeezed vacuum	خلاء چلانده دو مدی
Optics	اپتیک
Josephson parametric amplifier (JPA)	تقویت‌کننده پارامتریک جوزفسون
Decoherence effects	اثرات واهمدوسی
Entanglement	درهم‌تنیدگی
Purity	خلوص، پیوریتی
Pure state	حالت خالص
Mixed state	حالت آمیخته
Entropy of formation	آنترپی تشکیل
Environment	محیط
Noise	نویز، نوفه
Detector	اشکارساز
Analogue-to-Digital converter (ADC)	مبدل آنالوگ به دیجیتال
Signal	سیگنال
Idler	آیدلر
Time delay	تأخیر زمانی
Delay line	خط تأخیر
Joint measurement	اندازه‌گیری مشترک
Superposition principle	اصل برهم‌نهی
Bipartite	دو بخشی
Qubit	کیوبیت

Receiver	گیرنده
Thermal bath	حمام گرمایی
Logarithmic negativity	منفیت لگاریتمیک
Covariance matrix	ماتریس کوواریانس (هم‌وردایی)
Smallest partially-transposed symplectic eigenvalue	کوچک‌ترین ویژه‌مقدار بسیط
System	ترانهاده جزئی
Squeezing parameter	سامانه
Loss	پارامتر چلانده
Correlation	اتلاف
Target	همبستگی
Frequency	هدف
Coincidence	بسامد
Microwave resonator	هم‌پروزی
Kelvin	مشدد مایکروویو
Temperature	کلون (واحد دما)
Pump power	دما
Coherence state	توان پمپ
Reflected signal	حالت همدوس
Amplification	سیگنال بازتاب‌شده
Amplifier	تقویت
Correlation	تقویت‌کننده
Seprable	همبستگی
Output quadrator	تفکیک‌پذیر
Recorded idler	کوادراتور خروجی
Phase shift	آیدلر رکورد شده
	جابه‌جایی فاز

منابع

- [1] حسینی، سیدمحمد، نوروزی، میلاد، سیدزیدی، جمیله، ایران نژاد، فاطمه (1401). بررسی رفتار کیفی چلانده‌گی و درهم‌تنیدگی در رادار چلانده دو مدی کوانتومی. *دوفصلنامه اپتوالکترونیک*, 4(2), 17-26. doi: 10.30473/jphys. 2022.65651.1122
- [2] E. Jung and D. Park, Quantum illumination with three-mode Gaussian state, *Quantum Information Processing* 21, no. 2 (2022): 1-10.
- [3] S. H. Tan, B. I. Erkmén, V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, S. Pirandola, J. H. Shapiro, Quantum illumination with Gaussian states, *Phys. Rev. Lett.* 101, 253601 (2008).
- [4] J. H. Shapiro, The quantum illumination story, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. Magazine.* 35, 8-20 (2020).
- [5] S. Barzanjeh, S. Pirandola, D. Vitali, J. M. Fink, Microwave quantum illumination using a digital receiver, *Sci. Adv.* 6, eabb0451 (2020).
- [6] S. Barzanjeh, S. Guha, C. Weedbrook, D. Vitali, J. H. Shapiro, and S. Pirandola, Microwave quantum illumination, *Phys. Rev. Lett.* 114, 080503 (2015).
- [7] Q. Cai, J. Liao, B. Shen, G. Guo, and Q. Zhou, Microwave quantum illumination via cavity magnonics, *Phys. Rev. A* 103, 052419 (2021).
- [8] C. Weedbrook, S. Pirandola, J. Thompson, V. Vedral, and M. Gu, How discord underlies the noise resilience of quantum illumination. *New J. Phys.* 18, 043027 (2016).
- [9] C. Noh, C. Lee and S. Y. Lee, Quantum illumination with definite photon-number entangled states. *J. Opt. Soc. Am. B* 39, no. 5 (2022): 1316-1322.

- [10] J. Wang and K. M. Wong, Optical parametric amplifier detection for quantum illumination. In ICC 2022-IEEE International Conference on Communications, pp. 660-665. IEEE, 2022.
- [11] S. Zhang, Stealth in quantum illumination with a probabilistic mixed strategy, *J. Opt. Soc. Am. B* 39, no. 7 (2022): 1799-1806.
- [12] Q. Zhuang and J. H. Shapiro, Ultimate accuracy limit of quantum pulse-compression ranging, *Physical review letters* 128, no. 1 (2022): 010501.
- [13] P. Livreri, E. Enrico, L. Fasolo, A. Greco, A. Rettaroli, D. Vitali, A. Farina, C. F. Marchetti and A. Sq D. Giacomini, Microwave quantum radar using a josephson traveling wave parametric amplifier, In 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22), pp. 1-5. IEEE, 2022.
- [14] A. Karsa, J. Carolan, S. Pirandola, Quantum channel-position finding using single photons, *Phys. Rev. A* 105, no. 2 (2022): 023705.
- [15] G. Spedalieri and S. Pirandola, Performance of coherent-state quantum target detection in the context of asymmetric hypothesis testing, *IET Quantum Communication* (2022).
- [16] B. H. Wu, Z. Zhang, Q. Zhuang, Continuous-variable quantum repeaters based on bosonic error-correction and teleportation: architecture and applications, *Quantum Science and Technology* 7, no. 2 (2022): 025018.
- [17] Wang, Tiancheng, Souichi Takahira, and Tsuyoshi Sasaki Usuda, Error probabilities of quantum illumination with attenuation using maximum and non-maximum quasi-Bell states, *IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems* 142, no. 2 (2022): 151-161.
- [18] S. Eshete, Quantum information transfer between optical and microwave output modes via cavity magnonics, *J. Magn. Mater* 549 (2022): 168987.
- [19] I. B. Djordjevic, Entanglement assisted radars with transmitter side optical phase conjugation and classical coherent detection, *IEEE Access*, 10 (2022) 49095-49100.
- [20] S. Y. Lee, Y. Jo, T. Jeong, J. Kim, D. H. Kim, D. Kim, D. Y. Kim, Y. S. Ihn, Z. Kim, Observable bound for Gaussian illumination, *Phys. Rev. A* 105, no. 4 (2022): 042412.
- [21] L. Wang, P. Cai, Z. Liu, Z. Xie, Y. Fang, Role of carbon quantum dots on Nickel titanate to promote water oxidation reaction under visible light illumination, *J. Colloid Interface Sci.* 607 (2022): 203-209.
- [22] A. O. C. Davis, G. Sorelli, V. Thiel, B. J. Smith, Quantum-enhanced interferometry by entanglement-assisted rejection of environmental noise, *Phys. Rev. A* 105, no. 2 (2022): 022601.
- [23] D. Luong, C. W. S. Chang, A. M. Vadiraj, A. Damini, C. M. Wilson, B. Balaji, Receiver operating characteristics for a prototype quantum two-mode squeezing radar, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 56, 2041-2060 (2019).
- [24] N. Messaoudi, C. W. Chang, A. M. Vadiraj, J. Bourassa, B. Balaji, and C. M. Wilson, Quantum-enhanced noise radar, *Bulletin of the American Physical Society* 65 (2019).
- [25] D. Luong, B. Balaji, C.W. S. Chang, V. M. A. Rao, and C. Wilson, Microwave quantum radar: An experimental validation, In 2018 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), (IEEE, 2018), pp. 1-5.
- [26] D. Luong, S. Rajan, and B. Balaji, Quantum Monopulse Radar, In 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES), (IEEE, 2020), pp. 1-2.
- [27] D. Luong, S. Rajan, and B. Balaji, Entanglement-based quantum radar: From myth to reality, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. Magazine* 35, 22-35 (2020).
- [28] D. Luong, S. Rajan, and B. Balaji, Are quantum radar arrays possible? In 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST), (IEEE, 2019), pp. 1-4.
- [29] D. Luong, B. Balaji, Quantum radar, quantum networks, not-so-quantum hackers, In Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVIII, vol. 11018. International Society for Optics and Photonics, (2019), p. 110181E.
- [30] M. Frasca, A. Farina, Multiple Input-Multiple Output Quantum Radar, In 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), (IEEE, 2020) pp. 1-4.
- [31] L. Maccone and C. Ren, Quantum radar, *Phys. Rev. Lett.* 124, 200503 (2020).
- [32] M. Lanzagorta, Quantum radar, *Synthesis Lectures on Quantum Computing* 3, 1-139 (2011).
- [33] D. Luong, B. Balaji, Quantum two-mode squeezing radar and noise radar: covariance matrices for signal processing, *IET Radar, Sonar & Navigation* 14, 97-104 (2020).
- [34] D. Luong, S. Rajan, and B. Balaji, Quantum two-mode squeezing radar and noise radar: Correlation coefficients for target detection, *IEEE Sens. J.* 20, 5221-5228 (2020).
- [35] D. Luong, B. Balaji, S. Rajan, Performance prediction for coherent noise radars using the correlation coefficient, *IEEE Access* 10, 8627-8633 (2022).
- [36] M. Norouzi, S. M. Hosseiny, J. Seyed-Yazdi, M. H. Ghamat, Design and simulation of engineered Josephson parametric amplifier

- in quantum two-mode squeezed radar, (2022).
- [37] K. Durak, Z. Seskir, B. Rami, Quantum Radar, In Quantum Computing Environments, pp. 125-165. Springer, Cham, 2022.
- [38] P. Livreri, E. Enrico, L. Fasolo, A. Greco, A. Rettaroli, D. Vitali, A. Farina, C. F. Marchetti, A. Sq D. Giacomini, Microwave quantum radar using a Josephson traveling wave parametric amplifier, In 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22), pp. 1-5. IEEE, 2022.
- [39] Z. Tian, D. Wu, Y. Xu, X. Zhou, Y. Zhang, T. Hu, Closed-form model and analysis for the enhancement effect of a rectangular plate in the scattering characteristics of multiphoton quantum radar, Optics Express 30, no. 12 (2022): 20203-20212.
- [40] D. Luong, B. Balaji, S. Rajan, A likelihood ratio detector for QTMS radar and noise radar, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 58, no. 4 (2022) 3011-3020.
- [41] D. Luong, B. Balaji, S. Rajan, Performance prediction for coherent noise radars using the correlation coefficient, IEEE Access 10 (2022) 8627-8633.
- [42] N. Korolkova, G. Leuchs, R. Loudon, T. C. Ralph, C. Silberhorn, Polarization squeezing and continuous-variable polarization entanglement, Phys. Rev. A 65, no. 5 (2002): 052306.
- [43] O. Glöckl, S. Lorenz, C. Marquardt, J. Heersink, M. Brownnutt, C. Silberhorn, Q. Pan, P. Van Loock, N. Korolkova, G. Leuchs, Experiment towards continuous-variable entanglement swapping: Highly correlated four-partite quantum state, Phys. Rev. A 68, no. 1 (2003): 012319.
- [44] H. Liu, A. Helmy, B. Balaji, Inspiring radar from quantum-enhanced LiDAR, In 2020 IEEE International Radar Conference (RADAR), pp. 964-968. IEEE, 2020.
- [45] H. Liu, B. Balaji, A. S. Helmy, Target detection aided by quantum temporal correlations: Theoretical analysis and experimental validation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 56, no. 5 (2020): 3529-3544.
- [46] P. S. Blakey, H. Liu, G. Papangelakis, M. L. Iu, Y. Zhang, Z. M. Léger, A. S. Helmy, Quantum Enhanced LIDAR using Nonlocal Dispersion, In CLEO: Science and Innovations, pp. STu5O-4. Optica Publishing Group, 2022.
- [47] V. Josse, A. Dantan, A. Bramati, M. Pinard, E. Giacobino, Continuous variable entanglement using cold atoms, Phys. Rev. Lett. 92, no. 12 (2004): 123601.
- [48] G. Li, Ya-ping Yang, K. Allaart, and D. Lenstra, Entanglement for excitons in two quantum dots in a cavity injected with squeezed vacuum, Phys. Rev. A 69, no. 1 (2004): 014301.
- [49] R. W. Rendell, A. K. Rajagopal, Entanglement of pure two-mode Gaussian states, Phys. Rev. A 72, no. 1 (2005): 012330.
- [50] J. Martin, A. Micheli, V. Vennin, Discord and decoherence, J. Cosmol. Astropart. Phys. 2022, no. 04 (2022): 051.
- [51] Scully, M., & Zubairy, M. Quantum Optics. Cambridge: Cambridge University Press (1997). doi:10.1017/CBO9780511813993.
- [52] Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. Quantum information and quantum computation. 10th Anniversary Edition. Cambridge: Cambridge University Press. 2010.
- [53] S. Barzanjeh, M. Abdi, G. J. Milburn, P. Tombesi, D. Vitali, Reversible optical-to-microwave quantum interface, Phys. Rev. Lett. 109, no. 13 (2012): 130503.
- [54] S. Barzanjeh, E. S. Redchenko, M. Peruzzo, M. Wulf, D. P. Lewis, G. Arnold, J. M. Fink, Stationary entangled radiation from micromechanical motion, Nature 570, no. 7762 (2019): 480-483.
- [55] G. Adesso, A. Serafini, F. Illuminati, Entanglement, purity, and information entropies in continuous variable systems, Open Syst. Inf. Dyn. 12, no. 2 (2005): 189-205.
- [56] J. S. Prazdner-Bechcicki, Two-mode squeezed vacuum state coupled to the common thermal reservoir, J. Phys. A Math. Gen. 37, no. 15 (2004): L173.
- [57] A. Serafini, F. Illuminati, M. G. A. Paris, S. De Siena, Entanglement and purity of two-mode Gaussian states in noisy channels, Phys. Rev. A 69, no. 2 (2004): 022318.
- [58] M. J. Woolley and A. A. Clerk, Two-mode squeezed states in cavity optomechanics via engineering of a single reservoir, Phys. Rev. A 89, no. 6 (2014) 063805.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY 4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)