

«مقاله پژوهشی»

بررسی رفتار کیفی چلانیدگی و درهم‌تنیدگی در رادار چلانیده دو مدی کوانتومی

سید محمد حسینی¹، میلاد نوروزی²، جمیله سیدیزدی^{3*}، فاطمه ایران‌نژاد²

1. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

2. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

3. دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

2. دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان

تاریخ دریافت: 1400/12/03 تاریخ پذیرش: 1401/01/19

Study of the Qualitative Behavior of Squeezing and Entanglement in Quantum Two-Mode Squeezed Radar

S. M. Hosseiny¹, M. Norouzi², J. Seyedyazdi^{3*}, F. Irannezhad⁴

1. PhD Student, Department of Physics, Urmia University, Urmia, Iran

2. PhD Student, Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

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

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

Received: 2022/02/22

Accepted: 2022/04/08

Abstract

In this work, for the first time, the qualitative behaviors of squeezing and entanglement in quantum two-mode squeezed radars (QTMS) when the target is present and the signal is transmitted to the target are calculated and their qualitative behaviors are evaluated. The squeezing parameter is a tool in theory similar to the laboratory's signal power. Therefore, the correlation between signal-idler increases or decreases with signal power changes. This increase or decrease of correlation (especially entanglement) leads to improvement or weakening of the performance of quantum radars. In this work, it can be seen that with the increase of the squeezing parameter even at room temperature (300 K), the behavioral quality of the squeezing increases, and hence, the correlation between the signal and the idler also increases. We also examine the entanglement, where we see that there is a maximum limit to increase in signal power that cannot be exceeded, however, this limit can be violated by choosing a suitable receiver, hence at high powers maintained entanglement. Therefore, by controlling the squeezing parameter and choosing a suitable receiver, which leads to the improvement of squeezing and entanglement behaviors, the performance of a QTMS radar can be optimized at room temperature.

Keywords

Quantum Radar, Quantum Illumination, Squeezing, Quantum Two-Mode Squeezed Radar, Quantum Correlation And Entanglement.

چکیده

در این مقاله برای اولین بار رفتارهای کیفی چلانیدگی و درهم‌تنیدگی در رادارهای چلانیده دومی کوانتومی زمانی که هدف حضور دارد و سیگنال به سمت هدف ارسال می‌شود، محاسبه می‌گردد و رفتار کیفی آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در اصل، پارامتر چلانیدگی یک ابزار در مطالعات تئوری است که مشابه توان سیگنال در آزمایشگاه است. بنابراین با تغییرات توان سیگنال، همبستگی بین سیگنال-آیدلر افزایش یا کاهش می‌یابد. این افزایش یا کاهش همبستگی (به‌ویژه درهم‌تنیدگی) منجر به بهبود یا تضعیف عملکرد رادارهای کوانتومی می‌شود. در این کار، دیده می‌شود که با افزایش پارامتر چلانیدگی حتی در دمای اتاق (300 کلوین)، کیفیت رفتاری چلانیدگی افزایش می‌یابد و از این رو، همبستگی بین سیگنال و آیدلر نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی درهم‌تنیدگی نیز مشاهده شد که در توان سیگنال یک حد بیشینه برای افزایش وجود دارد که نمی‌توان از آن عبور کرد اما با این حال می‌توان با انتخاب صحیح یک گیرنده مناسب، این حد را نقض کرد و در توان‌های بالا نیز درهم‌تنیدگی را حفظ کرد. لذا با کنترل پارامتر چلانیدگی و انتخاب صحیح یک گیرنده مناسب که منجر به بهبود رفتارهای چلانیدگی و درهم‌تنیدگی می‌شود، می‌توان عملکرد یک رادار چلانیده دومی کوانتومی را در دمای اتاق بهینه کرد.

واژه‌های کلیدی

رادار کوانتومی، برتابش کوانتومی، چلانیدگی، رادار چلانیده دومی کوانتومی، همبستگی و درهم‌تنیدگی کوانتومی

مقدمه

بردستی و آشکارسازی اهداف توسط جریانی از فوتون‌های درهم‌تنیده توسط منابع کوانتومی را می‌توان به عنوان یک رادار کوانتومی در نظر گرفت [1-3]. در این نوع رادارها از مفاهیم پایه نظریه کوانتومی همچون اصل عدم قطعیت، درهم‌تنیدگی کوانتومی، همبستگی کوانتومی، افت و خیزهای خلاء، همدوسی، چلانیدگی و ... استفاده می‌شود [1-19]. چندین تیم تحقیقاتی در چند سال اخیر، به طور مثال، بالاجی و همکاران [1-3]، برزنجه و همکاران [15] و... نمونه‌های اولیه عملیاتی از یک رادار کوانتومی را پیاده‌سازی کرده‌اند و در مجموع نتایج حاصل از این تحقیقات، پیشرفت قابل توجهی در عملکرد رادار کوانتومی نسبت به همتای کلاسیک خود نشان می‌دهد [2-9، 15 و 19]. کاهش 6 دسی بل در توان انتقال، افزایش 4 تا 6 دسی بل نسبت سیگنال به نویز¹ (SNR) و بهبود 6 دسی بل عملکرد منحنی مشخصه عملکرد سیستم² (ROC) را می‌توان به عنوان نتایج حاصل از این مطالعات دانست [2-9، 15، 19، 20]. همچنین محدوده برتابش کوانتومی (QI)³ دقت میانگین مربعی تأخیر برد⁴ را ارائه می‌کند که می‌تواند ده‌ها دسی بل بهتر از رادار چلانیده پالس کلاسیک با همان پهنای باند پالس و انرژی ارسال شده باشد [20]. در رادار کوانتومی نمونه‌های اندازه‌گیری نسبت به رادار کلاسیک بسیار کمتر است و سیگنال در رادار کوانتومی همبستگی بیشتری را نسبت به همتای کلاسیک خود نشان می‌دهد [2-9، 15 و 19]. از سوی دیگر، می‌توان با رمزنگاری کوانتومی روی فوتون‌های ارسالی (کیوبیت‌ها)، یک کانال امن ایجاد کرد و رادارهای کوانتومی را در مقابل هک، نفوذ ناپذیر کرد تا از شنود در امان باشند [9]. همچنین در رادار کوانتومی نسبت به رادار کلاسیک، به دلیل اثرات کوانتومی روی سطح مقطع رادار، هدف‌های مخفی بیشتر قابل مشاهده است [21].

ایده اصلی تمامی رادارهای کوانتومی از برتابش کوانتومی گرفته شده است؛ تنها یک تفاوت وجود دارد و آن این است که معمولاً در برتابش کوانتومی سیگنال و آیدلر به صورت مشترک اندازه‌گیری⁵ می‌شوند [6 و 3-1]. تفاوت بین

برتابش و رادار کوانتومی در بخش 2 آمده است. رادارهای کوانتومی با توجه به منبع درهم‌تنیدگی آنها به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند [21 و 16]: اولین مورد رادارهای کوانتومی با منبع درهم‌تنیدگی تولید سیگنال در محدوده اپتیکی مانند منابع تبدیل پایین پارامتریک خودبه‌خودی⁶ (SPDC) که از بلورهای غیرخطی⁷ (همانند بتا باریم بورات⁸ BBO) برای تولید دو باریکه نور سیگنال-آیدلر در رادارهای همدوس کوانتومی [19] استفاده می‌کنند [16 و 21]. همچنین می‌توان از منابعی مانند نقاط کوانتومی⁹ [22]، کاواک‌های مگنونی¹⁰ [23]، الکترواپتومکانیکی¹¹ (EOM) [14]، اپتومکانیکی و... نام برد. این منابع سیگنال و آیدلر را به صورت اپتیکی تولید می‌کنند و آشکارسازی آنها نیز به صورت اپتیکی خواهد بود. البته بعضی از آنها همچون EOM، سیگنال را به صورت میکروویو تولید و به سمت هدف ارسال می‌کنند اما در نهایت بعد از دریافت سیگنال از هدف دوباره سیگنال منعکس شده از هدف را به محدوده اپتیکی تبدیل می‌کنند تا با آیدلر که از قبل به صورت اپتیکی رکورد شده بود، آشکارسازی شوند [14]. دومین مورد رادارهای کوانتومی با منابع درهم‌تنیدگی تولید سیگنال در محدوده میکروویو است [21 و 16]. از انواع این رادارهای کوانتومی می‌توان به رادار چلانیده دومدی کوانتومی¹² (QTMS) اشاره کرد که از QI برگرفته شده و بسیار شبیه به رادارهای نویزی متعارف کلاسیکی است [1-3]. به طور معمول در این رادارها از تقویت‌کننده پارامتریک جوزفسون¹³ (JPA) استفاده می‌شود که می‌تواند سیگنال و آیدلر را مستقیماً در محدوده فرکانسی امواج میکروویو تولید کند [24 و 16، 15، 12، 11، 8، 6، 3-1].

در این پژوهش، رفتار کیفی چلانیدگی و همبستگی در رادارهای چلانیده دومدی کوانتومی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت روش‌هایی برای بهبود عملکرد این رادارها با استفاده از نتایج حاصل از این کار بیان می‌شود.

6. Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)
7. Nonlinear Crystals
8. β -Barium-Borate (BBO)
9. Quantum Dots
10. Magnonic Cavity
11. Electro-Opto-Mechanical (EOM) Cavity
12. Quantum Two-Mode Squeezed (QTMS) Radar
13. Josephson Parametric Amplifier (JPA)

1. Signal-to-Noise Ratio (SNR)
2. Receiver Operating Characteristic (ROC)
3. Quantum Illumination (QI)
4. Mean-Squared Range-Delay Accuracy
5. Joint Measurement

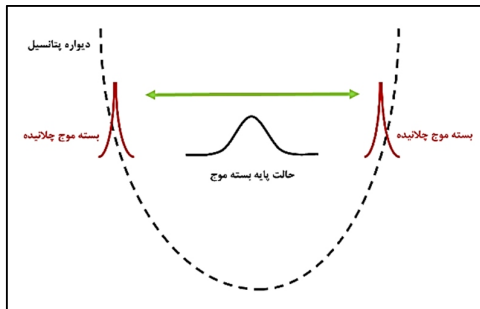
اصول کار رادار QTMS

ایده اصلی رادار QTMS در اصل از QI گرفته شده است. در برتابش کوانتومی، از خطوط تأخیر¹ سیگنال و اندازه‌گیری مشترک² بین سیگنال بازتاب شده از هدف و آیدرل رکورد شده استفاده می‌شود اما در رادار QTMS استنباط شده از QI ، سیگنال و آیدرل با تأخیر زمانی³ (به دلیل طول مسیر فضای آزاد سیگنال ارسالی) در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شوند (نیازی به اندازه‌گیری مشترک و خطوط تأخیر ندارد) [6 و 3-1]. اساس کار یک رادار کوانتومی دو مدی چلانیده را می‌توان به اختصار به صورت زیر بیان کرد [1-19]:

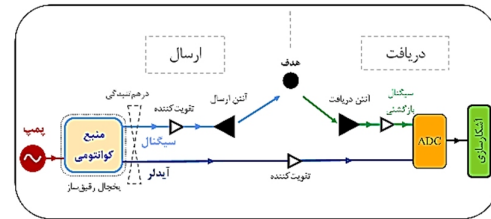
1. جریانی از جفت فوتون‌های درهم‌تنیده (سیگنال / آیدرل) تولید می‌شود.
 2. سیگنال تقویت و به سمت هدف ارسال می‌شود و برای استنباط حضور هدف، آیدرل رکورد می‌شود.
 3. موج فیلتر بین سیگنال دریافتی از سمت هدف و آیدرل که از قبل رکورد شده، اعمال می‌شود.
 4. با استفاده از آشکارساز، حضور یا عدم حضور هدف قابل استنباط است.
- طرح‌واره بلوکی یک رادار کوانتومی دو مدی چلانیده در حالت کلی در شکل 1 نشان داده شده است.

چلانیدگی دومی

از آنجا که فوتون‌های سیگنال و آیدرل از پمپ یکسانی سرچشمه می‌گیرند، یک همبستگی کوانتومی⁴ قوی بین سیگنال و آیدرل وجود دارد، که منجر به چلانیدگی سیگنال‌های مزدوج I و Q می‌شود (سیگنال و آیدرل) [15 و 8 و 6 و 5 و 3-1]. چلانیدگی در اینجا به حالتی از میدان الکترومغناطیسی اشاره دارد که با کاهش عدم قطعیت در یکی از مؤلفه‌های میدان نسبت به حالت همدوس (حالت همدوس به حالتی از میدان گفته می‌شود که عدم قطعیت در دامنه و فاز میدان الکتریکی به یک میزان باشد)، عدم قطعیت در مؤلفه دیگر میدان افزایش می‌یابد [25]. در نظر بگیرید یک حالت همدوس داریم زمانی که یک ولتاژ dc به بسته موج اعمال شود، یک چاه پتانسیل دور بسته موج را احاطه می‌کند و در نهایت با توجه به نوسان بسته موج و برخورد آن به دیواره پتانسیل، شکل بسته موج چلانیده شده و به شکل نوک تیز درمی‌آید (شکل 2) [25]. در ادبیات رادارهای کوانتومی به صورت کلی چلانیدگی چنین تعریف می‌شود که: نويز کوانتومی در ترکیبات خطی برخی از کوادراتورها کاهش می‌یابد و در سایر ترکیبات افزایش می‌یابد [8 و 6 و 5 و 3-1].



شکل 2. طرح‌واره بسته موج چلانیده درون یک چاه پتانسیل اعمالی توسط ولتاژ dc .



شکل 1. طرح‌واره بلوکی یک رادار QTMS.

درهم‌تنیدگی کوانتومی

درهم‌تنیدگی ریشه در اصل برهم‌نهی کوانتومی دارد. یک سیستم دوفوتونی در نظر بگیرید، اگر اندازه‌گیری روی فوتون اول وابسته به نتیجه اندازه‌گیری فوتون دوم باشد، بیان می‌شود که سیستم درهم‌تنیده است، در غیر اینصورت سیستم مجزا است [25-28].

مدل

دستگاهی که برای تولید خلاء چلانیده دو مدی⁵ (TMSV) استفاده می‌شود (که سیگنال‌های درهم‌تنیده ما هستند) تقویت‌کننده پارامتریک جوزفسون (JPA) نامیده می‌شود [8 و 6 و 5 و 3-1]. برای انجام این فرآیند، JPA

4. Quantum Correlation
5. Two-Mode Squeezed Vacuum (TMSV)

1. Delay Line
2. Joint Measurement
3. Delay Time

که در آن، $x = \text{rexp}(if)$ یک عدد مختلط دلخواه است. r و f به ترتیب دامنه (پارامتر چلانیدگی) و فاز (زاویه چلانیدگی) هستند. لازم به ذکر است که فاز پارامتر چلانیدگی در نظر گرفته نمی شود.

بحث و نتایج

در رادارهای کوانتومی همبستگی سیستم را می توان با ابزار ریاضی ماتریس کوواریانس بیان کرد [30 و 1]. شکل کلی ماتریس کوواریانس برای کوادراتورهای خروجی JPA در حضور هدف عبارتست از [1، 2، 18، 35-30]:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & 0 & C_{13} & 0 \\ 0 & C_{11} & 0 & -C_{13} \\ C_{13} & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & -C_{13} & 0 & C_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

در نظر بگیرید که هدف در یک حمام گرمایی است (با مقدار زیادی نویز گرمایی)، بدون اتلاف اجزاء رادار، بدون نویز در آیدلر رکورد شده و بدون شیفت فاز بین سیگنال ارسالی و آیدلر رکورد شده [30، 18]. زمانی که $f = 0$ ، (بدون نویز در آیدلر، بدون تلفات اجزاء رادار و بدون شیفت فاز)، عناصر ماتریس کوواریانس برای رادار QTMS به دست می آید [30]:

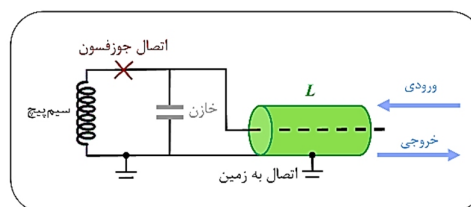
$$C_{11} = C_{22} = \frac{k(\cosh(2r) - 1) + 2n_1 + 1}{4} \quad (4)$$

$$C_{33} = C_{44} = \frac{\cosh(2r)}{4} \quad (5)$$

$$C_{13} = -C_{24} = \frac{\sqrt{k} \sinh(2r)}{4} \quad (6)$$

زمانی که $n_1 = 0$ است حالت گاوسی را حالت خلاء چلانیده دومی می نامند [30]. ضریب k نسبت فوتون های دریافتی است که از رادار QTMS گسیل شده اند. در اینجا پارامتر چلانیدگی r هم توان سیگنال های تولید شده و هم همبستگی بین دو سیگنال را کنترل می کند (شکل 1-1 ضمیمه) [30]. با افزایش پارامتر چلانیدگی r ، توان سیگنال نیز افزایش می یابد. علاوه بر این، با افزایش پارامتر چلانیدگی در رادارهای QTMS، همبستگی بین سیگنال و

باید در دمای 7 میلی کلوین توسط یخچال رقیق ساز¹ خنک شود. این دما به دلیل وجود دستگاه تداخل سنج کوانتومی ابررسانا² (SQUID) در JPA مورد نیاز است تا درهم تنیدگی بین سیگنال و آیدلر بلافاصله توسط نویز حرارتی از بین نرود. JPA استفاده شده در این مقاله یک JPA متعارف [6، 1-3] است و سیگنال و آیدلر آن دارای فرکانس یکسان هستند و برابر 5/31 مگاهرتز با توجه به مرجع [24] در نظر گرفته شده است.



شکل 3. مدار یک JPA متعارف

در این کار با توجه به مدل فوق و منبع کوانتومی نمایش داده شده در شکل 3، رفتار کیفی چلانیدگی و درهم تنیدگی در رادار QTMS مورد ارزیابی قرار می گیرد و با توجه به این رفتار، روش هایی برای بهبود عملکرد رادار کوانتومی بیان می شود. در حالت کلی، هامیلتونی فوتون های دو مدی برابر است با [25، 26 و 29]:

$$H = i\hbar(g a_1^\dagger a_2^\dagger - g^* a_1 a_2), \quad (1)$$

که در آن، زیرنویس های 1 و 2 مدها را نشان می دهند، g ضریب جفت شدگی، a و a^\dagger به ترتیب عملگرهای نابودی و خلق فوتون هستند. عملگر چلانیدگی دو مدی نیز به صورت زیر بیان می شود [25، 26 و 29]:

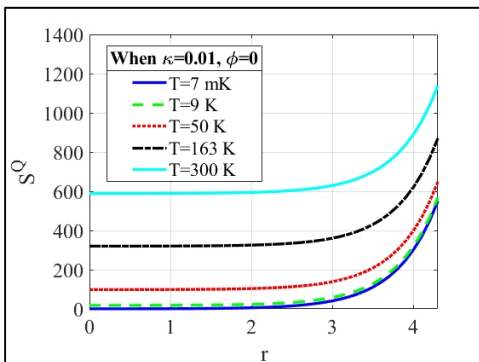
$$S(x) = \exp(-x^* a_1 a_2 + x a_1^\dagger a_2^\dagger), \quad (2)$$

1. Dilution Refrigerator
2. Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)

$$h^{\cdot} = 2^{-1/2} \frac{\sqrt{C_{11}^2 + C_{33}^2 + 2C_{13}^2 - \sqrt{(C_{11}^2 - C_{33}^2)^2 + 4C_{13}^2(C_{11} + C_{33})^2}}}{\phi^{1/2}} \quad (10)$$

در مقاله پیش‌روی رفتار چلانیدگی و درهم‌تنیدگی برای اولین بار در رادار QTMS زمانی که هدف وجود دارد و سیگنال به سمت هدف ارسال می‌شود، محاسبه شده و این رفتارها بر حسب پارامتر چلانیدگی r و دمای T مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مهم‌ترین هدف این مقاله ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد یک رادار QTMS با برد تقریبی 482 متر [35] با توجه به بررسی رفتار چلانیدگی و درهم‌تنیدگی است که از جمله مباحث بسیار مهم با نتایج کاربردی در رادارهای کوانتومی است. بررسی رفتار چلانیدگی و درهم‌تنیدگی رادارهای QTMS در رژیم توان پایین در دمای اتاق بسیار حائز اهمیت است و کاربردهای عملی فراوانی در صنعت و پزشکی دارد.

با توجه به معادلات (7 و 8)، رفتار کیفی چلانیدگی بر حسب پارامتر چلانیدگی و دما در رادار QTMS در شکل‌های 4 تا 6 آمده است. در شکل 4، رفتار چلانیدگی بر حسب پارامتر چلانیدگی برای دماهای مختلف ترسیم شده است. در این شکل می‌بینیم که با افزایش پارامتر چلانیدگی حتی اگر دما نیز افزایش یابد، چلانیدگی نیز افزایش خواهد یافت که نشانگر افزایش همبستگی بین سیگنال و آیدلر است. از جهتی توان سیگنال تولیدی با افزایش پارامتر چلانیدگی، افزایش می‌یابد.



شکل 4. رفتار کیفی چلانیدگی رادار QTMS بر حسب پارامتر چلانیدگی r برای دماهای مختلف زمانیکه $\phi=0$ و

$$\cdot w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$$

آیدلر افزایش می‌یابد، نویز در ترکیبات کوادراتورها چلانیده‌تر می‌شود و اثر نویز کوانتومی به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد [30]. همچنین در معادلات (2-4) n_i تعداد متوسط فوتون در حمام نویز گرمایی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$n_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \bar{w}_i}{k_B T}\right) - 1} \quad (7)$$

که در آن \hbar ثابت پلانک، $\mathbf{h} = \hbar / 2\pi$ ثابت k_B بولتزمن، T دما، $\bar{w}_i = 2\pi w_i$ و w_i فرکانس سیگنال $(i=1,2)$ هستند.

تابع رفتار چلانیدگی در رادار QTMS با توجه به معادلات (2-3) و با استفاده از معادله چلانیدگی در [34]، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S^Q(f) = C_{11} + C_{33} - 2C_{13} = [k(\cosh(2r) - 1) + 2n_i + 1 + \cosh(2r) - 2(\sqrt{k} \sinh(2r))]/4. \quad (8)$$

لازم به ذکر است که در این مقاله دو مورد چلانیدگی بیان شده است: یکی پارامتر چلانیدگی r که در رابطه 2 ظاهر می‌شود و دیگری تابع رفتار چلانیدگی S^Q است که با رابطه 7 بیان می‌شود و نیاز است که به تفاوت این دو مورد توجه شود.

بررسی رفتار درهم‌تنیدگی در رادارهای QTMS نیز با توجه به همبستگی بین سیگنال و آیدلر بسیار مهم است که می‌توان با استفاده از ابزار قدرتمند منفیت لگاریتمیک¹ که در زیر بیان شده، آن را به خوبی بررسی کرد [33-37]:

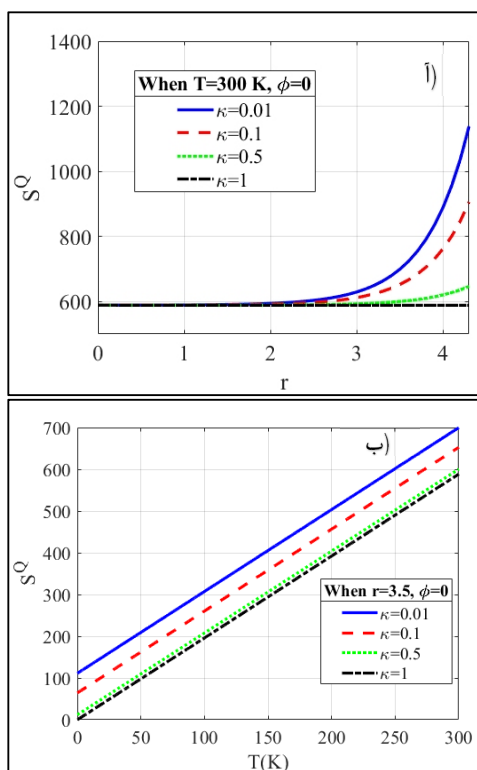
$$E_N = \max[0, -\log(2h^{\cdot})], \quad (9)$$

که در آن h^{\cdot} ویژه مقدار بسیط ترانهاده جزئی ماتریس C است و توسط رابطه زیر بیان می‌شود [33-37]:

1. Logarithmic Negativity

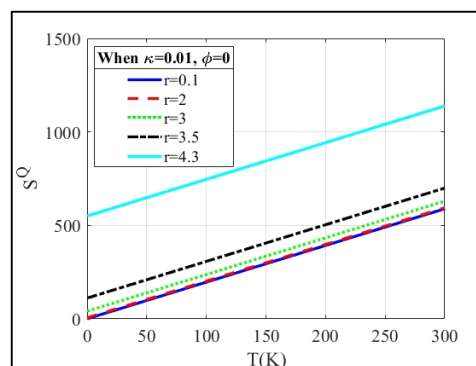
از این رو همبستگی بین دو سیگنال درهم‌تنیده نیز افزایش می‌یابد. دلیل فیزیکی این امر آن است که اثر نویز کوانتومی به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد و علاوه بر این توان سیگنال افزایش می‌یابد.

همچنین رفتار چلانیدگی برای نسبت‌های مختلف فوتون‌های دریافتی توسط گیرنده بر حسب پارامتر چلانیدگی و دما در شکل 7 ترسیم شده است. می‌بینیم که رفتار چلانیدگی در پارامتر چلانیدگی زیاد، با افزایش نسبت فوتون‌های دریافتی در گیرنده، کاهش می‌یابد. یعنی رفتار گیرنده در توان سیگنال زیاد ($r > 1.8$) می‌تواند دچار تغییر شود اما در توان پایین ($r < 1.8$) می‌بینیم که چنین نیست (شکل 7 آ). این بدان معنی است که انتخاب صحیح گیرنده نیز در رادار کوانتومی نقش بسزایی دارد.



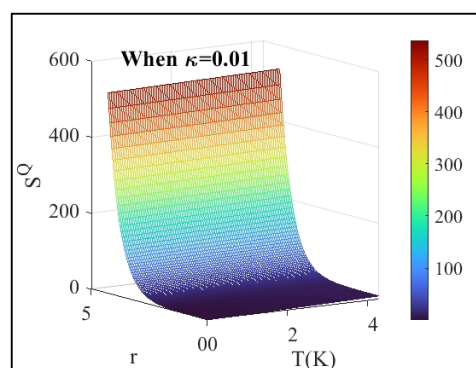
شکل 7. رفتار کیفی چلانیدگی رادار QTMS برای نسبت‌های مختلف فوتون‌های دریافتی در گیرنده بر حسب (آ) پارامتر چلانیدگی و (ب) دما زمانیکه $\phi=0$ و $w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$.

در شکل 5، رفتار چلانیدگی بر حسب دما برای پارامترهای چلانیدگی مختلف ترسیم شده است. در اینجا چلانیدگی در دمای اتاق نیز حفظ شده است و با افزایش پارامتر چلانیدگی افزایش می‌یابد. لذا می‌بینیم که همبستگی کوانتومی برای رادار QTMS در دمای اتاق نیز حفظ می‌شود.



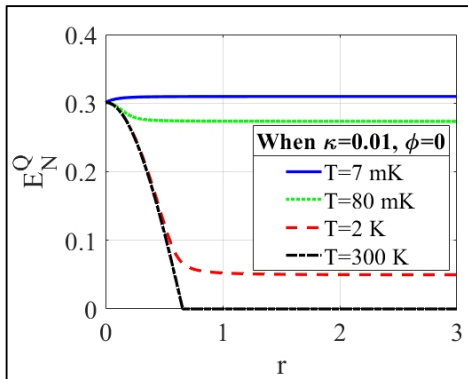
شکل 5. رفتار کیفی چلانیدگی رادار QTMS بر حسب دما برای پارامترهای چلانیدگی مختلف زمانی که $\phi=0$ و $w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$.

در شکل 6، رفتار کیفی چلانیدگی به‌طور هم‌زمان برای دما و پارامتر چلانیدگی ترسیم شده که همان نتایج شکل‌های 4 و 5 را به‌طور واضح‌تر بیان می‌کند.



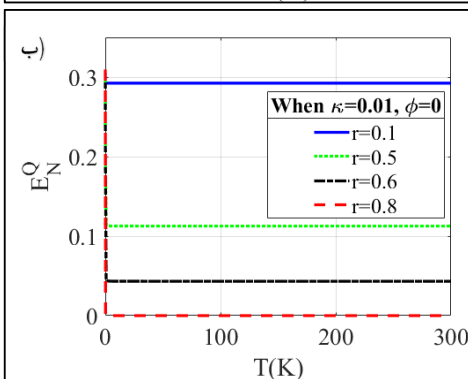
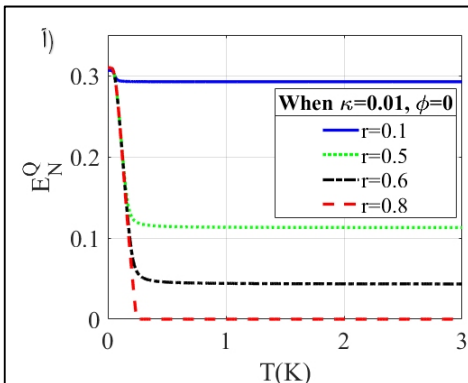
شکل 6. رفتار کیفی چلانیدگی رادار QTMS بر حسب دما و پارامتر چلانیدگی زمانی که $\phi=0$ و $w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$.

در سه شکل فوق، به وضوح دیده می‌شود که با افزایش اندازه پارامتر چلانیدگی، چلانیدگی سیستم افزایش می‌یابد و



شکل 8. رفتار کیفی درهم‌تنیدگی رادار QTMS بر حسب پارامتر چلائیدگی r برای دماهای مختلف زمانی که $\phi=0$ و $w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$.

در شکل 9، رفتار کیفی درهم‌تنیدگی بر حسب دما برای پارامتر چلائیدگی مختلف ترسیم شده است. در این شکل سعی شده نتایج حاصل از شکل 8 به بیان دقیق‌تر ترسیم شود که همان نتایج شکل 8 را تصدیق می‌کند.



شکل 9. رفتار کیفی درهم‌تنیدگی رادار QTMS برای پارامترهای مختلف چلائیدگی بر حسب دما (آ) دماهای پایین و (ب) دماهای بالا، زمانی که $\phi=0$ و $w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$.

رفتار مهم دیگری که بررسی می‌شود، درهم‌تنیدگی یک رادار QTMS است زمانی که سیگنال به سمت هدف ارسال می‌گردد (بر اساس معادلات 3 و 9). رفتار درهم‌تنیدگی بر حسب پارامتر چلائیدگی و دما در شکل‌های 8-10 بررسی شده است.

در شکل 8 رفتار درهم‌تنیدگی بر حسب پارامتر چلائیدگی برای دماهای مختلف بررسی شده است. مشاهده می‌شود زمانی که سیگنال به سمت هدف ارسال می‌شود اگر دما پایین باشد ($T < 2\text{ K}$) با هر توان سیگنالی، درهم‌تنیدگی وجود دارد. اما زمانی که سیگنال در دمای اتاق ($T = 300\text{ K}$) به سمت هدف ارسال گردد، مشاهده می‌شود که تنها در توان‌های سیگنال پایین یعنی تقریباً برای ($r < 0.7$)، درهم‌تنیدگی حفظ شده است. دلیل فیزیکی این سرکوبِ درهم‌تنیدگی در دماهای بالا کاملاً واضح است. عواملی همچون نویز¹ (تقویت² توسط تقویت‌کننده‌ها³) و اتلاف⁴ (بهره⁵ همچون بهره⁶ آنتن‌های فرستنده و گیرنده⁶)، باعث سرکوبِ درهم‌تنیدگی می‌شوند [35 و 30]. برای ارسال سیگنال به سمت هدف برای بردهای بالا نیاز به تقویت سیگنال توسط تقویت‌کننده‌ها است. در این مقاله، برای کاهش نویز وارد شده به سیستم از طریق تقویت‌کننده‌ها، از تقویت‌کننده‌های کم نویز ترانزیستور محرک الکترون بالا⁷ (HEMT) استفاده شده است. همچنین برای کاهش اثر بهره‌ها در تضعیف درهم‌تنیدگی، از آنتن‌های باندهای 8C که نسبت به سایر آنتن‌ها از بهره کمتری برخوردارند، استفاده شده است [35]. در ادامه روش‌هایی ارائه می‌گردد که درهم‌تنیدگی برای یک رادار QTMS حتی در رژیم توان بالا نیز حفظ می‌شود.

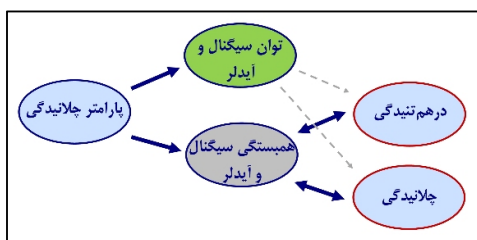
1. Noise
2. Amplification
3. Amplifier
4. Loss
5. Gain
6. Gains of Receive and Transmit Antenna
7. High-Electron-Mobility Transistor (HEMT)
8. C-Band Antenna

بحث و نتیجه گیری

رفتار کیفی چلانیدگی و درهم تنیدگی در رادار QTMS زمانی که هدف وجود دارد و سیگنال به سمت هدف ارسال می شود، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. از آنجا که پارامتر چلانیدگی وظیفه کنترل توان دو سیگنال تولیدی (سیگنال و آیدلر) و همبستگی بین آنها را دارد، می توان با کنترل پارامتر چلانیدگی، عملکرد رادار QTMS مورد نظر خود را بهینه کرد. با افزایش پارامتر چلانیدگی، چلانیدگی در رادار QTMS افزایش می یابد و از این رو، همبستگی بین سیگنال و آیدلر خروجی از JPA نیز افزایش می یابد اما اثر نویز کوانتومی در این حالت کاهش می یابد. با وجود این، توان سیگنال و آیدلر تولیدی افزایش می یابد. در بررسی رفتار درهم تنیدگی، وضعیت کمی فرق دارد به طوری که در افزایش پارامتر چلانیدگی یک حد افزایش وجود دارد که نمی توان از آن تجاوز کرد اما زمانی که نسبت فوتون های دریافتی در گیرنده زیاد باشد، می توان این محدودیت را دور زد. لذا علاوه بر افزایش پارامتر چلانیدگی باید به انتخاب صحیح یک گیرنده مناسب نیز توجه بسیار شود تا بتوان درهم تنیدگی را حتی در دمای اتاق (300-295 کلوین) حفظ کرد و گهگاه افزایش داد. لذا با کنترل پارامتر چلانیدگی و انتخاب صحیح یک گیرنده مناسب که منجر به بهبود رفتارهای چلانیدگی و درهم تنیدگی (نوعاً همبستگی) می شود، می توان عملکرد یک رادار چلانیده دومدی کوانتومی را در دمای اتاق بهینه کرد.

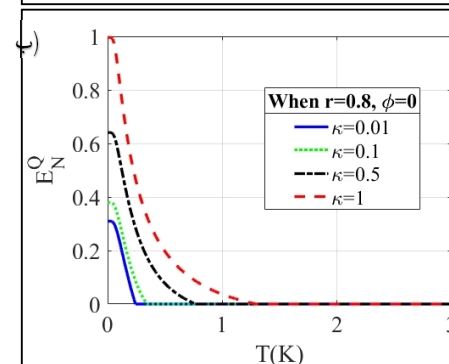
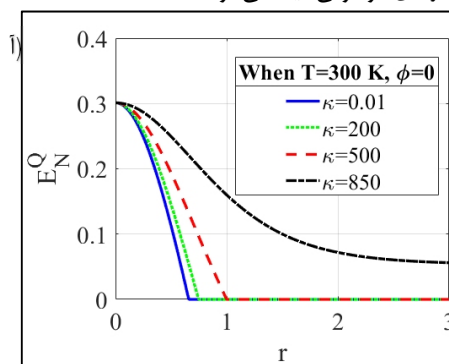
ضمیمه

نحوه کنترل پارامتر چلانیدگی r در رادار QTMS در یک پروتکل عملی به صورت زیر طرح بندی می شود [30]:



شکل 11. طرحواره نحوه کنترل پارامتر چلانیدگی در رادار QTMS.

بر خلاف شکل 7، در شکل 10 دیده می شود که درهم تنیدگی با افزایش نسبت فوتون های دریافتی در گیرنده، افزایش می یابد. در اینجا مشاهده می شود که درهم تنیدگی هم در توان های کم و هم در توان های بالای سیگنال قابل کنترل است. علاوه بر این، در (شکل 10 آ) دیده می شود که در پارامتر چلانیدگی زیاد، زمانی درهم تنیدگی وجود دارد که نسبت فوتون های دریافتی در گیرنده بسیار زیاد باشد (تقریباً برابر 850). شاید بتوان گفت مهم ترین نتیجه این کار در قسمت آ شکل 10 نمایش داده شده است. به طور خلاصه حتی در توان های پایین نیز می توان درهم تنیدگی را با نسبت فوتون های دریافتی زیاد در دمای اتاق (300-295 کلوین) حفظ کرد. از آنجا که همبستگی بیشتر بین سیگنال-آیدلر درهم تنیدگی را نیز بیشتر می کند، پس نتیجه گرفته می شود که تحت شرایط ذکر شده، زمانی که درهم تنیدگی سیستم بیشتر باشد، عملکرد رادار QTMS نیز بهبود می یابد. بنابراین در اینجا نیز اهمیت انتخاب صحیح یک گیرنده مناسب در رادارهای کوانتومی دیده می شود.



شکل 10. رفتار کیفی درهم تنیدگی رادار QTMS برای نسبت های مختلف فوتون های دریافتی در گیرنده بر حسب (آ) پارامتر چلانیدگی و (ب) دما زمانی که $\phi=0$ و $w_i \gg w_s = 5.31\text{GHz}$.

References

- [1] D. Luong, C. W. Sandbo Chang, A. M. Vadiraj, A. Damini, C. M. Wilson, and B. Balaji, "Receiver operating characteristics for a prototype quantum two-mode squeezing radar," accepted for publication in IEEE, 2019.
- [2] Sandbo Chang, C. W.; Vadiraj, A.M.; Bourassa, J.; Balaji, B.; Wilson, C.M. "Quantum-enhanced noise radar". Appl. Phys. Lett. 114 (11): 112601. 2018.
- [3] Luong, L.; Balaji, B.; Sandbo Chang, C.W.; Ananthapadmanabha Rao, V.M.; Wilson, C. "Microwave quantum radar: an experimental validation". 2018 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), Montreal, QC: 1–5. 2018.
- [4] Shapiro, Jeffrey, "The Quantum illumination story". IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 35 (4): 8–20, 2020.
- [5] David Luong, Sreeraman Rajan, and Bhashyam Balaji, "Quantum monopulse radar", IEEE Xplore, 2020.
- [6] David Luong, Sreeraman Rajan, and Bhashyam Balaji, "Entanglement-based quantum radar: From myth to reality". IEEE A&E Systems Magazine. 2020.
- [7] Han Liu, Amr Helmy, and Bhashyam Balaji, "Inspiring radar from quantum-enhanced lidar". IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE. 2020.
- [8] David Luong, Sreeraman Rajan, and Bhashyam Balaji, "Are quantum radar arrays possible?". Crown. 2019.
- [9] David Luong, Bhashyam Balaji, "Quantum radar, "quantum networks, not-so quantum hackers", Proc. SPIE 11018, Signal Processing, Sensor/Information Fusion, and Target Recognition XXVIII, 110181E (7 May 2019).
- [10] Marco, Frasco and Alfonso Farina, "Multiple input and multiple output quantum radar", IEEE Radar Conference (RadarConf20). 2020.
- [12] Fred Daum, Raytheon, "Quantum Radar Cost and Practical Issues", IEEE A&E Systems Magazine. 2020.
- [13] Fred Daum Raytheon, "A system engineering perspective on quantum radar", IEEE International Radar Conference (RADAR). 2020.
- [14] Torromé, Ricardo Gallego, Nadya Ben Bekhti-Winkel, and Peter Knott. "Introduction to quantum radar", arXiv preprint arXiv:2006.14238 (2020).
- [15] Barzanjeh, Shabir; Guha, Saikat; Weedbrook, Christian; Vitali, David; Shapiro, Jeffrey H.; Pirandola, Stefano. "Microwave quantum illumination", Physical Review Letters. 114(8):080503.(2015-02-27).
- [16] Barzanjeh, Shabir; Pirandola, Stefano; Vitali, David; Fink, Johannes M. "Microwave quantum illumination using a digital receiver", Science Advances. 6 (19): eabb0451. 2020.
- [17] Maccone, Lorenzo, and Changliang Ren. "Quantum radar." Physical Review Letters 124.20 (2020): 200503.
- [18] Pirandola, S; Bardhan, B. R.; Gehring, T.; Weedbrook, C.; Lloyd, S. "Advances in photonic quantum sensing". Nature Photonics. 12 (12): 724–733. 2018.
- [19] Tan, Si-Hui; Erkmén, Baris I.; Giovannetti, Vittorio; Guha, Saikat; Lloyd, Seth; Maccone, Lorenzo; Pirandola, Stefano; Shapiro, Jeffrey H. "Quantum illumination with gaussian states". Physical Review Letters. 101 (25): 253601. 2008.
- [20] H. Liu, B. Balaji and A. S. Helmy, "Target detection aided by quantum temporal correlations: theoretical analysis and experimental validation" in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 56, no. 5, 3529-3544, 2020.
- [21] Zhuang, Quntao, and Jeffrey H. Shapiro. "Ultimate accuracy limit of quantum pulse-compression ranging." Physical Review Letters 128.1: 010501. 2022.
- [22] Lanzagorta, Marco. "Quantum radar." Synthesis Lectures on Quantum Computing 3.1 (2011): 1-139.
- [23] Salmanogli, Ahmad, and Dincer Gokcen. "Entanglement sustainability improvement using optoelectronic converter in quantum radar (interferometric object-sensing)." IEEE Sensors Journal 21, no. 7 (2021): 9054-9062.
- [24] Cai, Qizhi, Jinkun Liao, and Qiang Zhou. "Stationary entanglement between light

- and microwave via ferromagnetic magnons." *Annalen der Physik* 532, no. 12 (2020): 2000250.
- [25] Grebel, J., et al. "Flux pumped impedance-engineered broadband Josephson parametric amplifier." *Applied Physics Letters* 118.14 (2021): 142601.
- [26] Scully, M., & Zubairy, M. *Quantum Optics*. Cambridge: Cambridge University Press (1997). doi:10.1017/CBO978051-1813993.
- [27] Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. *Quantum information and quantum computation*. 10th Anniversary Edition. Cambridge: Cambridge University Press. 2010.
- [28] Zubairy, M. Suhail. "Quantum state measurement via Autler-Townes spectroscopy". *Physics Letters A*, Vol. 222, Issue. 1-2, p. 91. 1996.
- [29] Nakahara, Mikio & Ohmi, Tetsuo. "Quantum computing from linear algebra to physical realizations". 10.1201/9781420012293. 2008.
- [30] Barnett, Stephen, and Paul M. Radmore. *Methods in theoretical quantum optics*. Vol. 15. Oxford University Press, 2002.
- [31] Luong, David, and Bhashyam Balaji. "Quantum two-mode squeezing radar and noise radar: covariance matrices for signal processing." *IET Radar, Sonar & Navigation* 14.1 (2020): 97-104.
- [32] Luong, David, Sreeraman Rajan, and Bhashyam Balaji. "Quantum two-mode squeezing radar and noise radar: Correlation coefficients for target detection." *IEEE Sensors Journal* 20.10 (2020): 5221-5228.
- [33] Cai, Qizhi, et al. "Microwave quantum illumination via cavity magnonics." *Physical Review A* 103.5 (2021): 052419.
- [34] Barzanjeh, Sh, Mehdi Abdi, Gerard J. Milburn, Paolo Tombesi, and David Vitali. "Reversible optical-to-microwave quantum interface." *Physical Review Letters* 109, no. 13 (2012): 130503.
- [35] Barzanjeh, Shabir, E. S. Redchenko, Matilda Peruzzo, Matthias Wulf, D. P. Lewis, G. Arnold, and Johannes M. Fink. "Stationary entangled radiation from micro-mechanical motion", *Nature* 570, no. 7762 (2019): 480-483.
- [36] Hosseiny, Seyed Mohammad, Milad Norouzi, Jamileh Seyed-Yazdi, and Mohammad Hossein Ghamat. "Engineered Josephson Parametric Amplifier in quantum two-modes squeezed radar." arXiv preprint arXiv:2205.06344 (2022).
- [37] H. A. Boura, and A. Isar, Logarithmic negativity of two bosonic modes in the two thermal reservoir model. *Rom. J. Phys.* 60, 1278 (2015).
- [38] A. Salmanogli, D. Gokcen, and H. S. Gecim, Entanglement of optical and microcavity modes by means of an optoelectronic system. *Phys. Rev. Appl.* 11, (2019)

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 BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4 0>)