

Optoelectronic

Open
Access

ORIGINAL ARTICLE

Quantum Enhancement Factor in a Noisy Environment and the Role of Transmissivity in the Quantum Illumination

Seyed Mohammad Hosseiny¹, Jamileh Seyedyazdi^{2*}, Milad Norouzi³

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

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

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

Correspondence

Jamileh Seyedyazdi

Email: j.seyedyazdi@vru.ac.ir

How to cite

Seyedyazdi, J., Hosseiny, S.M., Norouzi, M. (2023). Quantum Enhancement Factor in a Noisy Environment and The Role of Transmissivity in the Quantum Illumination, *Optoelectronic*, 5(2), 27-34.

ABSTRACT

In this article, we employ direct detection within an optical parametric amplifier (OPA) receiver in a lossy and noisy environment, deriving the quantum enhancement factor (QEF) and error probability, which significantly enhance the performance of quantum illumination (QI). QI relies on the entanglement between the signal and idler for target detection. Various parameters within the proposed setup aid us in improving target detection within the current configuration. Notably, we demonstrate that the channel transmissivity function from the transmitter output to the receiver input plays a crucial role in boosting QI performance. Furthermore, we assert that QEF increases with rising detector quantum efficiency and transmissivity. Among the most valuable applications of these findings is the development of quantum illumination with optimal performance, a crucial asset in defense and research industries.

KEYWORDS

Quantum Illumination, Quantum Radar, Entanglement, Quantum Enhancement Factor.

دوفصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

فاکتور بهبود کوانتومی در محیط پرنویز و نقش انتقال پذیری در برتابش کوانتومی

سید محمد حسینی¹، جمیله سیدزیدی²، میلاد نوروزی³

چکیده

در این مقاله، از یک آشکارسازی مستقیم در یک گیرنده تقویت کننده پارامتری نوری (OPA) در یک محیط پراتالاف و پرنویز استفاده می‌کنیم و فاکتور بهبود کوانتومی (QEF) و احتمال خطا را به دست می‌آوریم که در بهبود عملکرد برتابش کوانتومی (QI) اهمیت زیادی دارند. QI برای تشخیص هدف، از درهم‌تنیدگی بین سیگنال و آیدلر بهره می‌برد. پارامترهای مختلف طرح مفروض به ما کمک می‌کند تا آشکارسازی هدف را در پیکربندی فعلی بهبود بخشیم. به طوری که نشان می‌دهیم که عملکرد انتقال پذیری کانال از خروجی فرستنده به ورودی گیرنده نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد QI ایفا می‌کند. علاوه بر این، بیان می‌کنیم که با افزایش بازده کوانتومی آشکارساز و انتقال پذیری، QEF افزایش می‌یابد. از مهم‌ترین کاربردهای این یافته‌ها، می‌توان به ساخت برتابش کوانتومی با عملکرد بهینه اشاره کرد که در صنایع دفاعی و تحقیقاتی بسیار حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی

برتابش کوانتومی، رادار کوانتومی، درهم‌تنیدگی، فاکتور بهبود کوانتومی.

1 دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
2 دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران
3 دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

نویسنده مسئول:

جمیله سیدزیدی

رایانامه: j.seyedzadi@vru.ac.ir

استناد به این مقاله:

سید محمد حسینی، جمیله سیدزیدی، میلاد نوروزی (1402). فاکتور بهبود کوانتومی در محیط پرنویز و نقش انتقال پذیری در برتابش کوانتومی. دوفصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 5(2)، 27-34.

مقدمه

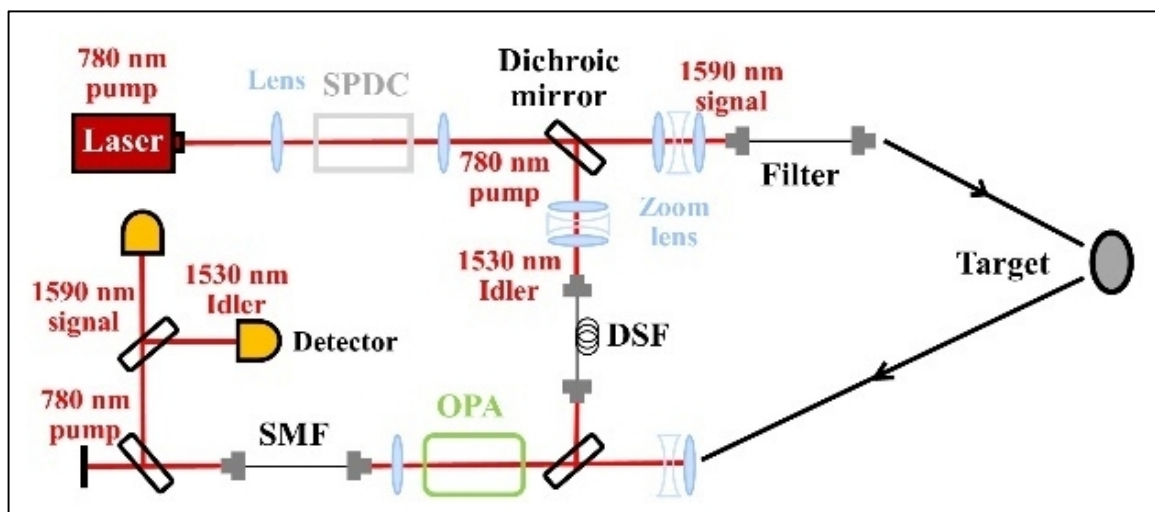
در برتابش کوانتومی¹ (QI) می‌توان مزایای قابل توجهی را با استفاده از درهم‌تنیدگی² در تشخیص هدف³، علی‌رغم وجود اتلاف⁴ و نویز⁵ سرکوب‌کننده⁶ درهم‌تنیدگی، به دست آورد [1]. اتلاف و نویز توسط محیط⁶ و قطعات مورد نیاز (مانند تقویت کننده) وارد سامانه⁷ می‌شوند. به طور طبیعی، هر چه نویز و اتلاف محیط کمتر باشد، شرایط بهتری برای انتقال سیگنال در محیط و عملکرد بهینه سامانه فراهم می‌شود. QI طرح متفاوتی است که از حالات کوانتومی برای دستیابی به بهبود عملکرد قابل ملاحظه در حضور واہمدوسی کوانتومی⁸ استفاده می‌کند. QI می‌تواند شنود⁹ ارتباطی را شکست دهد [2-8] و نسبت سیگنال به نویز¹⁰ (SNR) یک سامانه سنجش را تقویت کند [6-12].

عملکرد سامانه‌های QI را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [1، 5-13]: یک منبع¹¹، دو پرتوی درهم‌تنیده به نام‌های

مشترک¹⁴ را می‌توان توسط یک گیرنده بر روی پرتوی سیگنال بازگشتی و پرتوی آیدلر رکورد شده، که در حافظه کوانتومی¹⁵ ثبت شده است، انجام داد تا داده‌های مربوط به مدولاسیون¹⁶ سیگنال را در محیط استنتاج کند.

لازم به ذکر است که ایده اصلی رادارهای کوانتومی¹⁷ از برتابش کوانتومی استنتاج شده است. معمولاً تفاوت عمده بین برتابش کوانتومی و رادار کوانتومی در این است که در برتابش کوانتومی از خطوط تأخیر¹⁸ بین سیگنال و آیدلر استفاده می‌شود و در نهایت اندازه‌گیری مشترک اعمال می‌شود؛ در حالی که در رادارهای کوانتومی همانند رادارهای چلانده دو مدی کوانتومی¹⁹ (QTMS) به جای خطوط تأخیر از تأخیرهای زمانی²⁰ استفاده می‌کنند [15,14].

در این مقاله، از آشکارسازی مستقیم در یک گیرنده تقویت‌کننده پارامتری نوری²¹ (OPA) در محیط پرنویز و پراتلاف استفاده می‌کنیم و فاکتور بهبود کوانتومی²² (QEF) را



شکل 1. نمایش بلوک دیاگرام QI.

برای برتابش کوانتومی به دست می‌آوریم. با توجه به پارامترهای سامانه، QEF را بهبود می‌بخشیم که منجر به بهبود عملکرد برتابش کوانتومی در یک محیط پرنویز می‌شود.

سیگنال و آیدلر¹² ساطع می‌کند. سیگنال به سمت هدف ارسال می‌شود و آیدلر به گیرنده¹³ منتقل می‌شود. اندازه‌گیری

13 Receiver

14 Joint Measurement

15 Quantum Memory

16 Modulation

17 Quantum Radars

18 Delay Lines

19 Quantum Two-Mode Squeezed (QTMS) Radar

20 Time Delay

21 Optical Parametric Amplifier (OPA)

22 Quantum Enhancement Factor (QEF)

1 Quantum Illumination (QI)

2 Entanglement

3 Target Detection

4 Loss

5 Noise

6 Environment

7 System

8 Quantum Decoherence

9 Hack

10 Signal to Noise Ratio (SNR)

11 Source

12 Idler

که در آن N_S میانگین تعداد فوتون در هر مد سیگنال است [7, 13, 16]. سپس، تشخیص مستقیم تمام خروجی‌های M مد آیدلر از گیرنده OPA، اندازه‌گیری $(\hat{N}_I^{out}(j))$ را به دست می‌دهد، که SNR برای QI توسط [11, 13, 21-17] نشان داده می‌شود:

$$SNR^{QI} = \frac{4\hat{a}\hat{N}_I^{out}(0) - \hat{N}_I^{out}(p)\bar{n}}{\sqrt{\text{Var}(\hat{N}_I^{out}(0)) + \text{Var}(\hat{N}_I^{out}(p))}} \quad (2)$$

که صورت کسر بیانگر میانگین تعداد فوتون سیگنال و مخرج کسر بیانگر میزان نویز در ورودی گیرنده می‌باشد. با توجه به مراجع [13, 19]، نسبت سیگنال به نویز در یک برتابش کوانتومی در یک محیط پرنویز به صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$SNR^{QI} = \frac{16k_I k_S k_{extra} h_D M N_S}{N_B + N_{el}} \quad (3)$$

که در آن M تعداد مدهای سیگنال و آیدلر، η_D بازده کوانتومی آشکارساز⁶ می‌باشد. N_{el} به دلیل نویز الکترونیکی پس از تشخیص است که همان میانگین نویز الکترونیکی است، $k_{extra} < 1$ که همان انتقال‌پذیری خارجی است در اصل تمام غیر ایده‌آل‌های سامانه را مدل‌بندی می‌کند و $N_S \ll 1$ میانگین تعداد فوتون در هر مد سیگنال فرض شده است. این حد بیانگر این موضوع است که N_S از حد همبستگی متقابل حساس به فاز کلاسیک فراتر می‌رود. علاوه بر این، ما فرض می‌کنیم که هدف در یک حمام گرمایی⁷ قرار دارد لذا، N_B میانگین تعداد فوتون در هر مد در حالت گرمایی پس‌زمینه⁸ است. حمام گرمایی دارای یک میانگین تعداد فوتون در هر مد $N_B = 1 / \exp[h\nu / k_B T_B] - 1$ در حالت گرمایی پس‌زمینه با پیروی از توزیع پلانک⁹ است [18, 19] که در آن \square ثابت پلانک کاهش یافته¹⁰، k_B ثابت بولتزمن¹¹ و T_B دمای حمام گرمایی و W بسامد سیگنال است. اگر $N_B \gg 1$ در نظر گرفته شود نویز ویژه‌ای به دامنه پهنای باند تطبیق فاز B اعمال می‌شود. افزون بر این، در رابطه (3)، κ_S و κ_I به ترتیب انتقال‌پذیری¹² رفت و برگشت سیگنال و ذخیره‌سازی آیدلر هستند. انتقال‌پذیری رفت و برگشت سیگنال، خاصیت فیزیکی سیگنال در انتقال در محیط می‌باشد و بدین معنی است که هرچه یک سیگنال از توان بیشتری برخوردار باشد پس

ساختار مقاله را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد: در بخش دوم مقدمات و مدل معرفی می‌شوند. بحث و نتایج کار در بخش سوم و عمده نتایج کار در بخش نتیجه‌گیری ارائه می‌شوند.

مدل و مقدمات

در تشخیص هدف QI با استفاده از حالت‌های گاوسی¹ درهم‌تنیده تولید شده توسط موج پیوسته SPDC (CW) [7-9]، پرتوهای سیگنال باند-پهن (S) و آیدلر (I) را می‌توان مجموعه‌ای از $M = \tau B$ در نظر گرفت که به طور یکسان جفت مد سیگنال-آیدلر توزیع می‌شود و در آن τ مدت زمان ادغام و B پهنای باند تطبیق فاز² است. نمایش بلوک دیاگرام QI را می‌توان در شکل 1 مشاهده کرد.

نحوه عملکرد برتابش کوانتومی در مدل حاضر در شکل 1 نمایش داده شده است. لیزر که به‌عنوان منبع در نظر گرفته می‌شود پرتویی با بسامد 780 نانومتر ساطع می‌کند. با استفاده از بلورهای غیرخطی³ که در آن فرآیند تبدیل پایین پارامتریک خودبه‌خودی⁴ (SPDC) اتفاق می‌افتد و با استفاده از یک شکافنده پرتو، دو پرتوی درهم‌تنیده (یک سیگنال با بسامد 1590 نانومتر و یک آیدلر با بسامد 1530 نانومتر) حاصل می‌شوند. لازم به ذکر است که تقویت‌کننده‌هایی برای اجرای این امر مورد استفاده قرار می‌گیرند که نویزهایی را به سامانه وارد می‌کنند. این نویزها می‌توانند درهم‌تنیدگی را تحت تأثیر قرار دهند و گاه آن را سرکوب کنند [14, 15]. بعد از تولید دو پرتوی درهم‌تنیده، سیگنال به سمت هدف ارسال می‌شود و آیدلر به سمت گیرنده تقویت‌کننده پارامتری نوری OPA و به‌طور همزمان اندازه‌گیری مشترک بر روی سیگنال ارسال شده و آیدلر رکورد شده اعمال می‌گردد و با یک آشکارساز مناسب حضور و یا عدم حضور هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یک جفت مد درهم‌تنیده سیگنال و آیدلر را در نظر بگیرید که از SPDC (CW) به دست آمده است. این جفت مد با عملگرهای نابودی \hat{a}_S و \hat{a}_I در حالت درهم‌تنیده با نمایش عددی-کت (حالات فوک⁵) به صورت زیر نمایش داده می‌شوند [1]:

$$|\psi_{SI}\rangle = \hat{\mathbf{a}} \prod_{n=0}^{\infty} \sqrt{\frac{N_S^n}{(N_S + 1)^{n+1}}} |\ln \bar{n}_S\rangle |\ln \bar{n}_I\rangle, \quad (1)$$

6 Quantum Efficiency of Detector

7 Thermal Bath

8 Background

9 Planck Distribution

10 Reduced Planck Constant

11 Boltzmann Constant

12 Transmissivity

1 Gaussian States

2 Phase-Matching Bandwidth

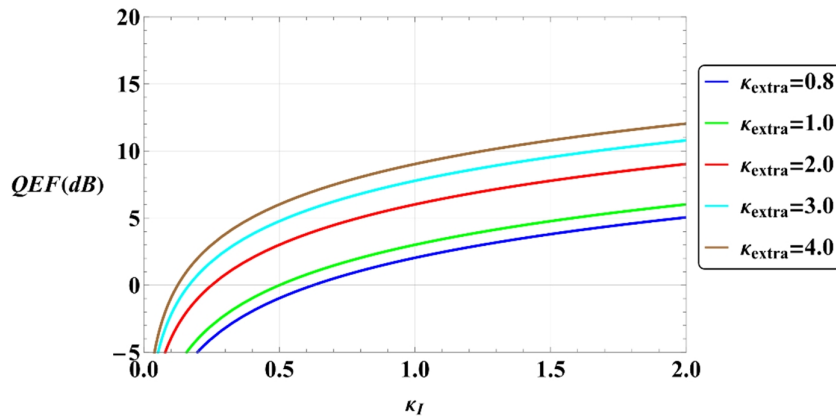
3 Nonlinear Crystals

4 Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)

5 Fock States

$$QEF = \frac{SNR^{OI}}{SNR^{CI}} = \frac{2\kappa_1 \kappa_{extra} h_D N_B}{N_B + N_{ei}} \quad (6)$$

که این نتیجه جالب را به دست می‌دهد که بهبود QI نسبت به CI مستقیماً با κ_1 و κ_{extra} و η_D در ارتباط می‌باشد. لازم بذکر است که افزایش QEF، مزیت بهبود نسبت سیگنال به نویز در یک برتابش کوانتومی نسبت به کلاسیک را به ما نشان می‌دهد. لذا هرچه QEF بیشتر باشد، برتابش کوانتومی ما بهینه‌تر خواهد بود. توجه شود در ترسیم شکل‌های، تمام واحدها بر حسب دسی‌بل در نظر گرفته شده است.



شکل 2. فاکتور بهبود کوانتومی (QEF) برحسب انتقال‌پذیری κ_1 برای κ_{extra} های مختلف. $\eta_D = 1$ ، N_B ، $N_{ei} = 0$ ، $\epsilon = 0.03$

بحث و نتایج

در شکل 2، با استفاده از رابطه (6)، QEF برحسب تابعی از انتقال کانال در خروجی فرستنده به ورودی گیرنده، زمانی که κ_{extra} افزایش می‌یابد، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در این شکل با افزایش انتقال‌پذیری κ_1 ، QEF افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش κ_{extra} افزایش دیگری وجود دارد که بسیار قابل توجه است. پس باید در ساخت برتابش‌های کوانتومی به این نکته توجه داشت که حتماً انتقال‌پذیری بالا در محیط را در نظر گرفت تا به یک بهبود کوانتومی دست یابیم. همان طور که قبلاً در بخش 2 بیان شد، انتقال‌پذیری در محیط با توان بالای سیگنال رابطه مستقیم دارد. بنابراین یک بهبود کوانتومی نیازمند انتقال‌پذیری بالای سیگنال و به طبع آن توان بالای سیگنال می‌باشد.

همچنین QEF برحسب بازده کوانتومی آشکارساز در شکل 3 نشان داده شده است. بازده کوانتومی آشکارساز نقش مهمی در بهبود عملکرد گیرنده در QI ایفا می‌کند. از این رو، در این شکل مشاهده می‌کنیم که با افزایش بازده کوانتومی آشکارساز،

انتقال‌پذیری بیشتری در محیط دارد. همان طور که می‌دانیم سیگنال به سمت هدف ارسال می‌شود و آیدلر توسط فیبرهای نوری به سمت گیرنده ارسال شده و ذخیره می‌شود تا اینکه با سیگنال بازگشتی از هدف به طور همزمان اندازه‌گیری شود. سؤالی که مطرح می‌شود این است که انتقال‌پذیری آیدلر به چه معنی است. در پاسخ بیان می‌شود که قابلیت انتقال در فیبر نوری را انتقال‌پذیری آیدلر می‌گویند. به طور کلی، انتقال‌پذیری به عنوان تابعی از انتقال‌پذیری کانال از خروجی فرستنده به ورودی گیرنده می‌باشد. در این کار ما نقش این انتقال‌پذیری‌ها را در فاکتور بهبود کوانتومی در یک برتابش کوانتومی بررسی

می‌کنیم.

احتمال خطای¹ آشکارسازی هدف در یک برتابش کوانتومی توسط [7، 11 و 21] به دست می‌آید:

$$P_M^{OI} = \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{SNR^{OI}}}{\sqrt{8}} \right) \quad (4)$$

که در آن erfc تابع خطای مکمل² است. از همه مهم‌تر، SNR^{OI} ایده‌آل ($N_{ei}=0$ ، $\eta_D=1$ ، $\kappa_{extra}=\kappa_1$) در گیرنده OPA، 3 دسی‌بل بهتر از سامانه CI بهینه در شرایط ایده‌آل مشابه، است. SNR برای CI در این شرایط توسط [13، 19] به صورت زیر داده می‌شود:

$$SNR^{CI} = \frac{8\kappa_s MN_s}{N_B} \quad (5)$$

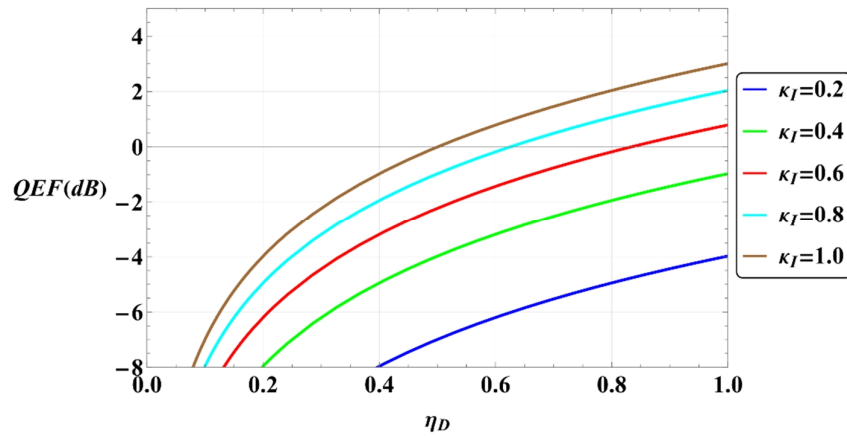
و در نهایت فاکتور بهبود کوانتومی QEF که نسبتی از بهبود SNR کوانتومی به کلاسیک است را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

1 Error Probability

2 Complementary Error Function

است زیرا احتمال خطا در تشخیص هدف کاهش می‌یابد. علاوه بر این، می‌بینیم که با افزایش انتقال پذیری κ_I ، احتمال خطا کاهش می‌یابد. این نتایج به این موضوع اشاره دارند که هرچه

QEF بهبود می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش انتقال پذیری، می‌توان به افزایش دیگری برای بهبود عملکرد QI دست یافت. نکته بسیار مهمی که از شکل 3 می‌توان استخراج کرد این

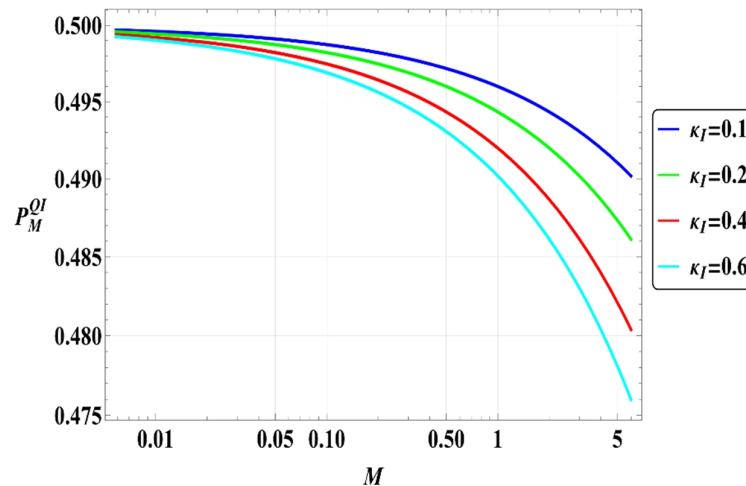


شکل 3. QEF برحسب بازده کوانتومی آشکارساز η_D برای انتقال‌های مختلف κ_I زمانیکه $\kappa_{\text{extra}}=1$ ، $N_{\text{el}}=0$ ، $N_{\text{B}}=0.03$.

انتقال‌پذیری سیگنال و تعداد جفت مد، بیشتر باشد لذا خطای ما در آشکارسازی هدف کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که بیشینه احتمال خطا برابر یک خواهد بود و فراتر از آن نخواهد رفت.

تمام این نتایج بیان می‌دارد که انتقال‌پذیری سیگنال و

است که زمانی که انتقال‌پذیری و بازده کوانتومی بیشتری داریم، نسبت سیگنال به نویز کوانتومی بهبود یافته‌تری در مقایسه با نسبت سیگنال به نویز کلاسیک داریم. این امر به دلیل آن است که فاکتور بهبود کیفیت در اصل مزیت بهبود نسبت سیگنال به نویز کوانتومی به نسبت سیگنال به نویز



شکل 4. احتمال خطا برحسب تعداد جفت مد M برای انتقال‌های مختلف κ_I زمانیکه $\kappa_{\text{S}}=0.028$ ، $N_{\text{el}}=1$ ، $N_{\text{B}}=0.03$ ، $N_{\text{S}}=0.01$ ، $\eta_D=1$ ، $\kappa_{\text{extra}}=0.9$.

آیدرل نقشی بسیار کلیدی در فاکتور بهبود کوانتومی QEF ایفا می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، از آشکارسازی مستقیم در یک گیرنده تقویت‌کننده پارامتری نوری (OPA) استفاده شد و فاکتور بهبود کوانتومی (QEF) در یک محیط پرنویز برای برتابش کوانتومی

کلاسیک را نمایش می‌دهد. از این رو، نقش مهم انتقال‌پذیری در بهبود یک برتابش کوانتومی به وضوح در شکل‌های 2 و 3 قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل 4، احتمال خطای آشکارسازی هدف بر حسب جفت مد برای انتقال‌های مختلف با استفاده از روابط (3) و (4) ترسیم شده است. نشان می‌دهیم که با افزایش تعداد جفت مد، احتمال خطا کاهش می‌یابد. این یک نتیجه بسیار مهم

Loss	اتلاف
Target	هدف
Frequency	بسامد
Temperature	دما
Reflected signal	سیگنال بازتاب شده
Amplification	تقویت
Amplifier	تقویت کننده
Recorded idler	آیدلر رکورد شده
Phase-matching bandwidth	پهنای باند تطبیق فاز
Optical parametric amplifier (OPA)	تقویت کننده پارامتری نوری
Quantum memory	حافظه کوانتومی
Modulation	مدولاسیون
Quantum enhancement factor (QEF)	فاکتور بهبود کوانتومی
Hack	شنود
Signal to noise ratio (SNR)	نسبت سیگنال به نویز
Source	منبع
Background	پس زمینه
Planck distribution	توزیع پلانک
Reduced Planck constant	ثابت پلانک کاهش یافته
Boltzmann constant	ثابت بولتزمن
Error probability	احتمال خطا
Nonlinear crystals	بلورهای غیرخطی
Spontaneous parametric down-conversion (SPDC)	تبدیل پایین پارامتریک خودبه خودی
Fock states	حالات فوک
Quantum efficiency of detector	بازده کوانتومی آشکارساز
Transmissivity	انتقال پذیری
Complementary error function	تابع خطای مکمل

(QI)، محاسبه گردید. از جمله مهم ترین نتایج به دست آمده عبارت است از: در QEF، افزایش انتقال پذیری سیگنال و آیدلر به عنوان تابعی از انتقال پذیری کانال از خروجی فرستنده به ورودی گیرنده، باعث افزایش فاکتور بهبود کوانتومی می شود که بیانگر این مزیت مهم است که برتابش کوانتومی بهبود می یابد. علاوه بر این، با افزایش بازده کوانتومی آشکارساز، QEF نیز افزایش می یابد که نشان دهنده بهبود عملکرد آشکارسازی هدف در QI است. در نهایت، احتمال خطای آشکارسازی هدف را نشان دادیم و بیان کردیم که با افزایش تعداد جفت مدها و انتقال پذیری آیدلر، احتمال خطا کاهش می یابد که نشان دهنده این موضوع است که برتابش کوانتومی در تشخیص هدف بسیار کارآمد است. از جمله کاربردهای این نتایج، می توان به ساخت برتابش کوانتومی با عملکرد بهبود یافته اشاره کرد که مورد استفاده در صنایع دفاعی و تحقیقاتی کشور می باشد.

پیوست

اصطلاحاتی که در این مقاله به کار برده شده است، در جدول 1 بیان شده است:

جدول 1. اصطلاحات مقاله

عبارت لاتین	معادل فارسی
Gaussian states	حالات گاوسی
Quantum illumination (QI)	برتابش کوانتومی
Quantum radar	رادار کوانتومی
Field modes	مدهای میدان
Quantum two-mode squeezed radar (QTMS)	رادار چلانده دو مدی کوانتومی
Quantum decoherence	واهمدوسی کوانتومی
Entanglement	درهم تنیدگی
Environment	محیط
Noise	نویز، نوفه
Detector	آشکارساز
Signal	سیگنال
Idler	آیدلر
Time delay	تاخیر زمانی
Delay line	خط تاخیر
Joint measurement	اندازه گیری مشترک
Receiver	گیرنده
Thermal bath	حمام گرمایی
System	سامانه

منابع

- [1] Tan, Si-Hui, Baris I. Erkmen, Vittorio Giovannetti, Saikat Guha, Seth Lloyd, Lorenzo Maccone, Stefano Pirandola, and Jeffrey H. Shapiro. "Quantum illumination with Gaussian states." *Physical review letters* 101, no. 25 (2008): 253601.
- [2] Shapiro, Jeffrey H. "Defeating passive eavesdropping with quantum illumination." *Physical review A* 80, no. 2 (2009): 022320.
- [3] Xu, Wenbang, and Jeffrey H. Shapiro. "Defeating active eavesdropping with quantum illumination." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 1363, no. 1, pp. 31-34. American Institute of Physics, 2011.
- [4] Zhang, Zheshen, Maria Tengner, Tian Zhong, Franco NC Wong, and Jeffrey H. Shapiro. "Entanglement's benefit survives an entanglement-breaking channel." *Physical review letters* 111, no. 1 (2013): 010501.
- [5] Shapiro, Jeffrey H., Zheshen Zhang, and Franco NC Wong. "Secure communication via quantum illumination." *Quantum information processing* 13 (2014): 2171-2193.
- [6] Lloyd, Seth. "Enhanced sensitivity of photodetection via quantum illumination." *Science* 321, no. 5895 (2008): 1463-1465.
- [7] Tan, Si-Hui, Baris I. Erkmen, Vittorio Giovannetti, Saikat Guha, Seth Lloyd, Lorenzo Maccone, Stefano Pirandola, and Jeffrey H. Shapiro. "Quantum illumination with Gaussian states." *Physical review letters* 101, no. 25 (2008): 253601.
- [8] Shapiro, Jeffrey H., and Seth Lloyd. "Quantum illumination versus coherent-state target detection." *New Journal of Physics* 11, no. 6 (2009): 063045.
- [9] Guha, Saikat, and Baris I. Erkmen. "Gaussian-state quantum-illumination receivers for target detection." *Physical Review A* 80, no. 5 (2009): 052310.
- [10] S. Zhang, J. Guo, W. Bao, J. Shi, C. Jin, X. Zou, and G. Guo. "Quantum illumination with photon-subtracted continuous-variable entanglement." *Physical review A* 89, no. 6 (2014): 062309.
- [11] Barzanjeh, Shabir, Saikat Guha, Christian Weedbrook, David Vitali, Jeffrey H. Shapiro, and Stefano Pirandola. "Quantum illumination at the microwave wavelengths." *arXiv preprint arXiv:1410.4008* (2014).
- [12] Lopaeva, E. D., I. Ruo Berchera, Ivo Pietro Degiovanni, S. Olivares, Giorgio Brida, and Marco Genovese. "Experimental realization of quantum illumination." *Physical review letters* 110, no. 15 (2013): 153603.
- [13] Zhang, Zheshen, Sara Mouradian, Franco NC Wong, and Jeffrey H. Shapiro. "Entanglement-enhanced sensing in a lossy and noisy environment." *Physical review letters* 114, no. 11 (2015): 110506.
- [14] Hosseiny, Seyed Mohammad, Milad Norouzi, Jamileh Seyed-Yazdi, and Fatemeh Irannezhad. "Purity in the QTMS radar." *Physica Scripta* 98, no. 5 (2023): 055105.
- [15] Hosseiny, Seyed Mohammad, Milad Norouzi, Jamileh Seyed-Yazdi, and Fatemeh Irannezhad. "Performance improvement factors in quantum radar/illumination." *Communications in Theoretical Physics* 75, no. 5 (2023): 055101.
- [16] Jung, Eylee, and DaeKil Park. "Quantum illumination with three-mode Gaussian state." *Quantum Information Processing* 21, no. 2 (2022): 71.
- [17] Barzanjeh, Shabir, Stefano Pirandola, David Vitali, and Johannes M. Fink. "Microwave quantum illumination using a digital receiver." *Science advances* 6, no. 19 (2020): eabb0451.
- [18] Jo, Yonggi, Sangkyung Lee, Yong Sup Ihn, Zaeill Kim, and Su-Yong Lee. "Quantum illumination receiver using double homodyne detection." *Physical Review Research* 3, no. 1 (2021): 013006.
- [19] Torromé, Ricardo Gallego. "Enhancement in the mean square range delay accuracy by means of multiple entangled photon states quantum illumination." *arXiv preprint arXiv:2208.04691* (2022).
- [20] Wu, Bo-Han, Saikat Guha, and Quntao Zhuang. "Entanglement-assisted multi-aperture pulse-compression radar for angle resolving detection." *Quantum Science and Technology* 8, no. 3 (2023): 035016.
- [21] 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).