

بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران. ۱۴۰۰ بهمن ۱۴۰۰



در هم تنیدگی جفت فو تون در رادارهای چلانیده دو مدی کوانتومی میلاد نوروزی^{(*}، سید محمد حسینی^۲، جمیله سیدیزدی^{۳*}، محمد حسین قامت^۴ و میلاد کعبی^۵

^{۳۱} گروه فیزیک دانشگاه ولیعصر رفسنجان، <u>gmail.com (م</u>روه فیزیک دانشگاه ولیعصر رفسنجان، <u>sm.hosseiny@urmia.ac.ir</u> ^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه <u>h.ghamat@gmail.com</u> ^{*} دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز <u>mk°۸۲°۲۸۷@gmail.com</u>

چکیده-درهم تنیدگی، قلب رادار کوانتومی و کلیدی ترین بخش یک رادار چلانیده دو مدی کوانتومی (QTMS)، منبع تولید جفت فوتون درهم تنیده یعنی تقویت کننده پارامتری جوزفسون (JPA) است. با بکارگیری ابزار سنجش درهم تنیدگی در اپتیک کوانتومی، میدان تحقیق متمرکز بر بررســی رفتار درهم تنیدگی خروجی JPA با توجه به دمای محیط رادار QTMS اســت. با افزایش دما درهم تنیدگی از بین میرود اما با افزایش پارامتر چلانیدگی و حذف زاویه چلانیدگی، درهم تنیدگی در رادار QTMS حفظ میشود.

کلید واژه- جفت فوتون درهمتنیده، چلانیدگی دو مدی، درهمتنیدگی، رادار کوانتومی، همبستگی کوانتومی.

Photon Pair Entanglement in the QTMS Radar

Milad Norouzi^{`*}, Seyed Mohammad Hosseiny^{*}, Jamileh Seyedyazdi^{**}, Mohammad Hossein Qamat[‡] and Milad Kabi[°]

^{.,} 000000 00000000, 0000-0-000 00000000 00 0000000,

miladnorozi) 🎢 ۹۷ • @gmail.com

Abstract- Entanglement is the heart of quantum radar and the key component of a quantum two mode squeezed (QTMS) radar, is the entangled photon pair generation source, the Josephson parametric amplifier (JPA). Using entanglement measurement tools in quantum optics, the research field focuses on investigating the entanglement behavior of JPA output with respect to QTMS radar environment temperature. The entanglement disappears by

increasing temperature, but the entanglement is maintained in the QTMS radar by increasing the squeezing parameter and removing the squeezing angle.

Keywords: Entanglement, Entangled photon pair, Quantum correlation, Quantum radar, Two modes squeezed.



شکل ۱: طرحواره بلوکی یک رادار QTMS با منبع JPA.

در حقیقت JPA، سیگنال چلانیده دومدی تولید می کند. عبارت چلانیدگی در اینجا به حالتی از میدان الکترومغناطیسی اشاره دارد که با کاهش عدم قطعیت در یکی از مؤلفههای میدان نسبت به حالت همدوس، عدم قطعیت در مؤلفه دیگر افزایش می یابد [۱۰]. به بیان دقیق تر، نویز کوانتومی در ترکیبات خطی برخی از کوادراتورها کاهش می یابد و در سایر ترکیبات افزایش می یابد [۱۰].

ماتریس کوواریانس رادار QTMS

هامیلتونی دو فوتونی دومدی برابر است با [۱۱و ۱۰]: $H = i\hbar (ga_1^{\dagger}a_2^{\dagger} - g^{\bullet}a_1a_2), \qquad (1)$ $g \quad \text{ or } g^{\dagger}a \quad \text{ in } T_{2}a \quad \text{ or } g^{\dagger}a \quad \text{$

نابودی و خلق فوتون هستند. عملگر چلانیدگی دو مدی نیز بصورت زیر بیان میشود [۱۱ و ۱۰]:

$$S(\xi) = exp\left(-\xi^{\hat{a}}a_1a_2 + \xi a_1^{\dagger}a_2^{\dagger}\right), \qquad (\Upsilon)$$

که $\xi = rexp(i\phi)$ که $\xi = rexp(i\phi)$ یک عدد مختلط اختیاری است. r و ϕ به ترتیب پارامتر چلانیدگی و زاویه چلانیدگی (فاز) محسوب می شوند.

مقدمه

اساس کار یک رادار ساده است: رادارها امواج رادیویی را به سمت اهداف ارسال میکنند و اکوی آن را اندازه گیری میکنند تا حضور یا عدم حضور اهداف را بررسی کنند [۱]. تفاوت بین رادار کلاسیک و کوانتومی در مفاهیمی همچون اصل عدم قطعیت، درهمتنیدگی، همبستگی، آمار فوتون، افت و خیزهای خلاء، چلانیدگی، اپتیک کوانتومی و... است که در رادارهای کوانتومی استفاده میشود [۹–۱]. نمونههای که در رادارهای کوانتومی توسط پژوهشگران زیادی اولیه عملیاتی رادارهای کوانتومی توسط پژوهشگران زیادی ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده ارائه شده است. نمونهای از رادار کوانتومی، رادار چلانیده آن ارائه شده است. نمونهای از رادار می منبع درهمتنیدگی کار با استفاده از ابزار سنجش درهمتنیدگی، درهمتنیدگی

اساس کار یک رادار QTMS

اساس کار یک رادار QTMS را می توان به اختصار بیان کرد [۹–۱]: تولید جریانی از جفت فوتونهای درهم تنیده (سیگنال–آیدلر) توسط JPA بعد از تولید دو سیگنال همبسته، یکی از آنها بعد از تقویت ارسال می شود و آیدلر حفظ می شود. بعد از دریافت سیگنال در آنتن گیرنده، مچ فیلترینگ بین سیگنال و آیدلر اعمال می شود. با استفاده از شکارساز، حضور یا عدم حضور اهداف قابل استنباط است. طرحواره بلوکی یک رادار QTMS در شکل ۱ طراحی شده است. فرکانسهای سیگنال و آیدلر به ترتیب برابر ۶٫۱۴ و است. فرکانسهای سیگنال و آیدلر به ترتیب برابر ۶٫۱۴ و یخچال رقیقساز هلیومی با دمای MK قرار می گیرد.

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

 $arphi_i$ به طوریکه در آن \hbar ثابت پلانک، $k_{\scriptscriptstyle B}$ ثابت بولتزمن، ω_i فرکانس سیگنال و آیدلر $\left(i=1,2
ight)$ و T دما میباشد.

بحث و نتايج

در شکل ۲، رفتار درهمتنیدگی برحسب دما برای پرامترهای چلانیدگی مختلف ترسیم شده است. لذا بیان میشود زمانیکه پارامتر چلاندیگی صفر است، درهمتنیدگی نیز کمینه است اما با افزایش پارامتر چلانیدگی، درهمتنیدگی برای دماهای بیشتر افزایش مییابد. یعنی هرچه سیگنال و آیدلر همبستهتر باشند، درهمتنیدگی میتواند در دماهای بیشتر حفظ شود.



شکلهای ۳ و ۵، بیان می کنند که همیشه باید زاویه چلانیدگی (فاز) در رادارهای QTMS صفر در نظر گرفته شود تا درهم تنیدگی حفظ شود. همچنین در شکل ۴ نشان داده شده با افزایش دما برای حفظ درهم تنیدگی، باید پارامتر چلانیدگی نیز افزایش یابد. لذا مهمترین بخش حفظ درهم تنیدگی در دماهای بالا مانند دمای اتاق، ساخت سیگنالهای بسیار همبسته است.

با استفاده از فرمول بیکر-کمبل-هاسدورف (BCH) و با
استفاده از بسط توابع سینوس و کسینوس، در نهایت برای
استفاده از بسط توابع سینوس و کسینوس، در نهایت برای
$$\phi = 0$$
 استولیس کوواریانس بصورت زیر خواهد بود [۱۱]:
 $\phi = 0$ along $\phi = 0$
 $\cos h2r = \begin{pmatrix} \cosh 2r & 0 & \sinh 2r & 0 \\ 0 & \cosh 2r & 0 & -\sinh 2r \\ 0 & -\sinh 2r & 0 & \cosh 2r \end{pmatrix},$ (۳)
و برای $0 \neq \phi$ ، داریم [1–1]:

 $Cov_{sa2}^{\phi\neq 0}$

 $= \begin{pmatrix} cosh2r & 0 & sinh2rcos\phi & sinh2rsin\phi \\ 0 & cosh2r & sinh2rsin\phi - sinh2rcos\phi \\ sinh2rcos\phi & sinh2rsin\phi & cosh2r & 0 \\ sinh2rsin\phi - sinh2rsin\phi & 0 & cosh2r \end{pmatrix}$

درهم تنیدگی مَنفیّت لگاریتمی به صورت زیر بیان میشود [۱۲]:

$$E_{N} = \max[0, -\log(2\eta^{-})], \qquad (\Delta)$$

که η^- ویژه مقدار بسیط ترانهاده جزئی ماتریس Cov است و توسط رابطه زیر داده می شود [۱۲]:

$$\eta^{-} = 2^{-1/2} [C_{11}^{2} + C_{33}^{2} + 2C_{13}^{2} - \sqrt{\left(C_{11}^{2} - C_{33}^{2}\right)^{2} + 4C_{13}^{2}\left(C_{11} + C_{33}\right)^{2}}]^{1/2}.$$
(7)

که در آن

و

(۴)

$$C_{11} = C_{22} = \frac{\left(1 + n_1 + n_2\right)\cosh\left(2r\right) + \left(n_1 - n_2\right)}{2} \qquad (Y)$$

$$\begin{split} C_{33} &= C_{44} = \frac{\left(1 + n_1 + n_2\right) \cosh\left(2r\right) - \left(n_1 - n_2\right)}{2} \\ C_{13} &= -C_{24} = \frac{\left(1 + n_1 + n_2\right) \sinh\left(2r\right) \cos\phi}{2} \\ &: 2 \\ \text{ subscription} \\ \text{ subscr$$

بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران، ۱۲– ۱۴ بهمن ۱۴۰۰

مرجعها

- [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*, Young.
- [Y] C. W. Sandbo Chang, A. M. Vadiraj, J. Bourassa, B. Balaji, C. M. Wilson, "Quantum-enhanced noise radar", Appl. Phys. Lett., Vol. 112(11), 1177-1 (Y·1A).
- [*] D. Luong, B. Balaji, C. W. Sandbo Chang, V. M. Ananthapadmanabha Rao, C. Wilson, "Microwave quantum radar: An experimental validation", 2018 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), Montreal, QC: 1-0., Y. 1A.
- [2] D. Luong, S. Rajan, B. Balaji, "Entanglement-based quantum radar: From myth to reality", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, ro(٤), rro, (ror).
- [•] D. Luong, S. Rajan, B. Balaji, "Are quantum radar arrays possible?", Y. Y. IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)
- [1] R. Gallego Torrome´, N. B. Bekhti-Winkel, and P. Knott, "Introduction of quantum radar". ^Y · ¹⁹, arXiv: ^Y · ¹, ¹ £^Y^K.
- [Y] S. Barzanjeh, S. Guha, C. Weedbrook, D. Vitali, J. H. Shapiro, S. Pirandola, "Microwave quantum illumination", Phys. Rev. Lett., 112 (A), ACON (Y.10).
- [^A] S. Barzanjeh, S. Pirandola, D. Vitali, J. M. Fink, "Microwave quantum illumination using a digital receiver", IEEE Radar Conference, ¹-⁷ (^Y · ^Y).
- [9] M. Lanzagorta, Quantum Radar Synthesis Lectures on Quantum Computing, 199 pages (1.11).
- [1.]M. O. Scully, M. S. Zubairy, *Quantum Optics*, Cambridge University Press. p ۲۲۳-۲۲٤ (۱۹۹۷).
- [1]X. B. Wang, T. Hiroshima, A. Tomita, M. Hayashi, Quantum information with Gaussian states, Rhys. Rep., εελ, 1-ε (۲···λ).
- [17]S. Barzanjeh, E. S. Redchenko, M. Peruzzo, M. Wulf, D. P. Lewis, G. Arnold, J. M. Fink, Stationary entangled radiation from micromechanical motion, Nature, ov., £A.-£Ar (Y.)9).



شکل ۳: درهم تنیدگی E_n بر حسب دما T با زاویه چلانیدگی شکل ۳: درهم تنید ϕ مختلف زمانی که r=1 .



شکل ۴: درهم تنیدگی E_n بر حسب پارامتر چلانیدگی r با دماهای T مختلف زمانی که $\phi = 0$.



شکل ۵: درهم تنیدگی $E_{_n}$ بر حسب زاویه چلانیدگی ϕ با دماهای r جکله .r=1 .

نتيجهگيرى

در این کار با استفاده از منفیّت لگاریتمی، درهمتنیدگی خروجی JPA یک رادار QTMS بررسی شد. مشاهده شد که با افزایش دما درهمتنیدگی از بین میرود. از طرفی با حذف زاویه چلانیدگی و همچنین با افزایش پارامتر چلانیدگی میتوان درهمتنیدگی را در دماهای بالانیز حفظ