



مقایسه کسر کاملاً درهم تنیده و ناهمخوانی کوانتومی در آماده سازی حالت از راه دور

نیره صابریان، سید جواد اخترشناس

گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

چکیده - کسر کاملاً درهم تنیده می تواند میزان مفید بودن یک حالت $d \times d$ مفروض برای ارسال یک حالت d بعدی ناشناخته با استفاده از فرآیند فرابرد کوانتومی را تعیین نماید. حال با توجه به اینکه پروتکل آماده سازی حالت از راه دور شبیه فرابرد کوانتومی است، سوالی که مطرح می گردد این است که آیا کسر کاملاً درهم تنیده را می توان به عنوان منبعی برای آماده سازی حالت شناخته شده از راه دور در نظر گرفت؟ در این مقاله به بررسی این پرسش پرداخته و نشان داده می شود که با وجود اینکه رفتار هر دو کمیت کسر کاملاً درهم تنیده و ناهمخوانی کوانتومی با شباهت آماده سازی حالت از راه دور، در برخی حالت ها، کاملاً سازگار است؛ این ویژگی در حالت کلی برقرار نیست، بلکه حالت هایی نیز وجود دارند که کسر کاملاً درهم تنیده رفتار سازگار تری با شباهت پروتکل، نسبت به ناهمخوانی کوانتومی نشان می دهد.

کلید واژه - آماده سازی حالت از راه دور، کسر کاملاً درهم تنیده، ناهمخوانی کوانتومی.

The Comparison between Fully Entangled Fraction and Quantum Discord in Remote State Preparation

Nayere Saberian, Seyed Javad Akhtarshenas

Department of Physics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract- The fully entangled fraction can be used to characterize whether a quantum state in a $d \times d$ system can be used to teleport an unknown d -dimensional quantum state faithfully. Regarding the similarity of remote state preparation and quantum teleportation, a natural question is: Whether fully entangled fraction can be used as a resource for remote preparation of a known state? In this paper, we address this question and show that although both fully entangled fraction and quantum discord have similar behavior with respect to the fidelity of remote state preparation, it is not the case in general. Moreover, we show that there exist states for which fully entangled fraction have better behavior with respect to the quantum discord.

Keywords: Fully Entangled Fraction, Quantum Discord, Remote State Preparation.

۱- مقدمه

$$\rho = \frac{1}{4} [I \otimes I + \sum_{k=1}^3 x_k \sigma_k \otimes I + \sum_{l=1}^3 y_l I \otimes \sigma_l + \sum_{k,l=1}^3 T_{kl} \sigma_k \otimes \sigma_l], \quad (1)$$

به طوری که در آن $T_{kl} = \text{Tr}[(\sigma_k \otimes \sigma_l) \rho]$ عناصر تانسور همبستگی T می باشند، بردار $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$ با مؤلفه های $x_k = \text{Tr}[\sigma_k \rho_A]$ بردار بلاخ ماتریس چگالی کاهش یافته آلیس، یعنی ρ_A است و $\vec{y}$ نیز به صورت مشابه برای باب تعریف می شود.

در این پروتکل، هدف این است که آلیس حالتی شناخته شده را از راه دور برای باب آماده سازی نماید. ابتدا فرض می کنیم آلیس و باب در جهت $\hat{B}$ توافق دارند و آلیس از حالت عمومی ρ (معادله (۱)) که با باب به اشتراک گذاشته است برای آماده سازی حالتی خالص با بردار بلاخ $\hat{s}$ استفاده می کند؛ که $\hat{s}$ برداری در صفحه عمود بر جهت $\hat{B}$ می باشد. او آماده سازی حالت برای باب را با انجام یک اندازه گیری محلی در جهت $\hat{a}$ آغاز می کند. آلیس خروجی اندازه گیری خود را $(\alpha = \pm 1)$ به عنوان یک بیت اطلاعات کلاسیک (1 cbit)، به باب ارسال می نماید. به ازای نتیجه $\alpha = -1$ باب دوران π حول محور $\hat{B}$ اعمال می کند، درحالی که برای نتیجه $\alpha = 1$ هیچ تغییری نیاز ندارد.

حالتی که در این مرحله در اختیار باب قرار دارد با بردار بلاخ $\vec{r}$ نشان داده می شود. در مقاله [4] بازده این پروتکل به صورت زیر محاسبه شده است:

$$F \equiv \min_{\hat{B}} \langle P_{\text{opt}} \rangle = \frac{1}{2} (T_2^2 + T_3^2). \quad (2)$$

در این عبارت T_2^2 و T_3^2 کوچکترین ویژه مقادیر TT^t هستند و t نماد ترانپاده است.

در [4] نشان داده می شود که برای کلاس خاصی از حالت ها که بردار بلاخ آلیس موازی با ویژه بردار متناظر با بزرگترین ویژه مقدار تانسور همبستگی TT^t می باشد، ناهم خوانی کوانتومی هندسی نیز مانند شباهت RSP به صورت زیر به دست می آید:

$$G_D = \frac{1}{2} (T_2^2 + T_3^2). \quad (3)$$

یکی از اهداف اصلی نظریه اطلاعات کوانتومی، یافتن منابع لازم و کافی برای انتقال حالت های کوانتومی است. آماده سازی حالت از راه دور (Remote State Preparation) -به اختصار RSP- یکی از راه های انتقال این حالت ها می باشد که از آن با نام فرابرد کوانتومی (Quantum Teleportation) یک حالت شناخته شده یاد می کنند [1]. زیرا در این پروتکل حالتی که قرار است آماده سازی شود، برخلاف حالت ارسالی در فرابرد کوانتومی، برای فرستنده کاملاً شناخته شده می باشد. از آنجا که همبستگی کوانتومی نقش مهمی در انتقال بهینه این حالت های کوانتومی دارد؛ بررسی آن در این پروتکل حائز اهمیت است.

داکیک و همکارانش در مقاله [4] نشان داده اند که ناهم خوانی کوانتومی (Quantum Discord) [2,3] منبعی ضروری برای پروتکل RSP است. هم چنین در همان مقاله به طور واضح نشان داده اند که ناهم خوانی کوانتومی هندسی [8,9] با شباهت (Fidelity) این پروتکل مرتبط است و به این ترتیب تعبیری فیزیکی برای ناهم خوانی کوانتومی هندسی ارائه کرده اند. حال با توجه به اینکه کسر کاملاً درهم تنیده (Fully Entangled Fraction) -به اختصار FEF- می تواند تعیین کند که به چه میزان یک حالت $d \times d$ مفروض برای ارسال یک حالت d بعدی با استفاده از فرآیند فرابرد کوانتومی مناسب است [5]، سوالی که مطرح می گردد این است که آیا FEF را می توان به عنوان منبعی برای RSP در نظر گرفت؟

مقایسه شباهت RSP معرفی شده در مقاله داکیک [4] با FEF می تواند ما را در پاسخ به این پرسش یاری نماید. بنابراین در ابتدا مروری بر پروتکل آماده سازی حالت از راه دور خواهیم داشت. سپس به طور مختصر درباره مقاله داکیک توضیح داده می شود و مفهوم شباهت RSP بیان می گردد. پس از آن کمیت FEF معرفی می گردد و در پایان با رسم چند نمودار به مقایسه ناهم خوانی کوانتومی، شباهت RSP و FEF می پردازیم.

۲- آماده سازی حالت از راه دور

نمایش یک حالت دوکیوبیتی کلی را برحسب ماتریس های پائولی $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ در نظر می گیریم:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{1}{4}(1+T_1-T_2+T_3), \\ \lambda_2 &= \frac{1}{4}(1-T_1+T_2+T_3), \\ \lambda_3 &= \frac{1}{4}(1+T_1+T_2-T_3), \\ \lambda_4 &= \frac{1}{4}(1-T_1-T_2-T_3).\end{aligned}\quad (7)$$

با محاسبه می‌توان نشان داد که کسر کاملاً درهم‌تنیده حالت ρ_{BD} ، ویژه مقدار بیشینه است:

$$f(\rho) = \max\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}. \quad (8)$$

شباهت RSP نیز برای این حالت از رابطه (۲) به دست می‌آید. باتوجه به مقالات [3,4]، ناهمخوانی کوانتومی برای حالت‌های بل-قطری چهاربعدي از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}D(\rho_{BD}) &= 1 + \lambda_1 \log_2 \lambda_1 + \lambda_2 \log_2 \lambda_2 + \lambda_3 \log_2 \lambda_3 \\ &\quad + \lambda_4 \log_2 \lambda_4 - \frac{1-T_{\max}}{2} \log_2 \frac{1-T_{\max}}{2} \\ &\quad - \frac{1+T_{\max}}{2} \log_2 \frac{1+T_{\max}}{2},\end{aligned}\quad (9)$$

که در آن $T_{\max} = \max\{T_1, T_2, T_3\}$

نمودارهایی که در ادامه می‌آیند سه کمیت ناهمخوانی کوانتومی، ناهمخوانی کوانتومی هندسی یا شباهت RSP و کسر کاملاً درهم‌تنیده را برای چند حالت مختلف این کلاس نشان می‌دهند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

به عنوان اولین مثال نمودار شکل ۱ را در نظر می‌گیریم که در آن کسر کاملاً درهم‌تنیده، شباهت RSP یا ناهمخوانی کوانتومی هندسی و ناهمخوانی کوانتومی برای حالت بل-قطری به ازای مقادیری که در زیر نمودار آمده است رسم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت، هر سه تابع رفتار یکسانی دارند. به‌طوری‌که در $\lambda_1 = 0.25$ کمینه می‌شوند.

بدین ترتیب تعبیری فیزیکی برای ناهمخوانی کوانتومی هندسی ارائه شده است.

۳- کسر کاملاً درهم‌تنیده

کسر کاملاً درهم‌تنیده که آن را با $f(\rho)$ نشان می‌دهیم، برای هر حالت کوانتومی دلخواه ρ در یک سامانه $d \times d$ ، به‌صورت بیشینه هم‌پوشانی ρ و حالت‌های خالص $|e\rangle$ با درهم‌تنیدگی بیشینه، تعریف می‌گردد [6]:

$$f(\rho) = \max_{|e\rangle} \langle e | \rho | e \rangle. \quad (4)$$

عبارت فوق میزان نزدیکی حالت موردنظر به حالت بیشینه درهم‌تنیده را می‌سنجد. این کمیت می‌تواند مقادیر بین $\frac{1}{4}$ و ۱ را داشته باشد که به ترتیب برای حالت کاملاً آمیخته و حالت بیشینه درهم‌تنیده حاصل می‌شود.

بنت و همکارانش در [6] به سادگی این کمیت را برای سامانه‌های دوکیوبیتی محاسبه می‌کنند. با استفاده از همین روش محاسبه می‌توان نتایج زیر را به‌دست آورد.

۴- مقایسه کسر کاملاً درهم‌تنیده و شباهت RSP

همان‌گونه که در مقاله [7] ذکر شده است، همواره می‌توان چارچوب مرجعی یافت که در آن ماتریس هم‌بستگی T قطری باشد:

$$T = [T_1, T_2, T_3]; \quad |T_1| \geq |T_2| \geq |T_3|. \quad (5)$$

بنابراین می‌توان یک حالت بل-قطری را به‌صورت زیر نوشت:

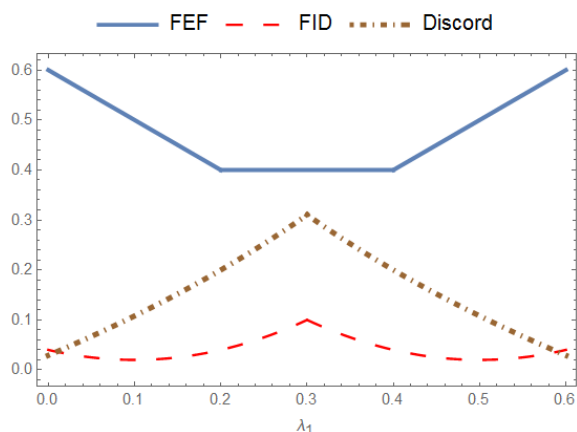
$$\rho_{BD} = \frac{1}{4} [I \otimes I + \sum_{i=1}^3 T_i \sigma_i \otimes \sigma_i]. \quad (6)$$

این حالت در پایه جادویی $|e_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ ،

$$|e_2\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle), |e_3\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle),$$

$$|e_4\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$$

با ویژه مقادیر زیر قطری است:

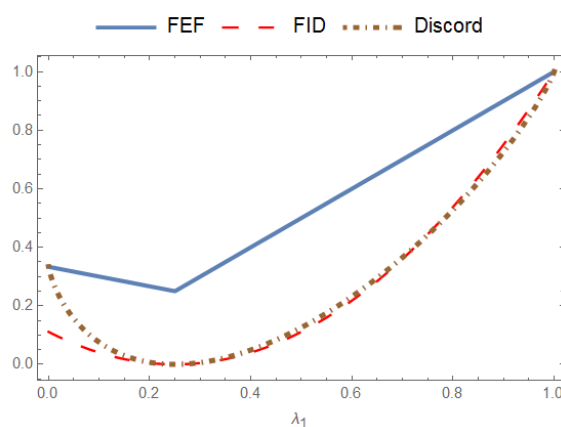


شکل ۳: نمودار کمیت‌ها برحسب λ_1 به ازای $\lambda_3 = 0.4$ ، $\lambda_4 = 0$ و $\lambda_2 = 1 - \lambda_1 - \lambda_3 - \lambda_4$.

علاوه بر عملکرد مناسب FEF برای این کلاس از حالت‌ها، می‌توان مشاهده کرد که مقدار آن برای حالتی که ناهمخوانی کوانتومی آن به صورت محلی ایجاد شده است و شباهت RSP غیرصفر دارد - که توسط جیورجی در مقاله [10] معرفی گردیده است - بیشتر از حالتی است که ناهمخوانی آن به صورت غیرمحلی ایجاد شده است اما بازده پروتکل RSP برای آن صفر است. هم‌چنین محاسبه این کمیت برای حالت جداپذیر و درهم‌تنیده ذکر شده در [4] مفید بودن حالت جداپذیر برای این پروتکل را تایید می‌نماید.

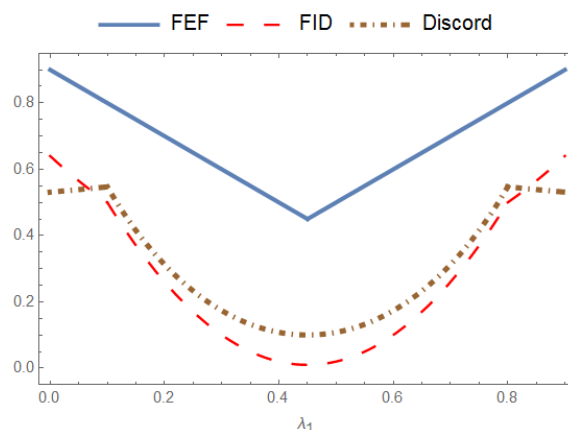
مراجع

- [1] C. H. Bennett, P. Hayden, D. W. Leung, P. W. Shor, and A. Winter, "Remote preparation of quantum states," IEEE Trans. Inf. Theory 51, 56-74, 2005.
- [2] L. Henderson and V. Vedral, "Classical, quantum and total correlation," J. Phys. A: Math. Gen. 34, 6899-6905, 2001.
- [3] H. Ollivier and W. H. Zurek, "Quantum discord: A measure of the quantumness of correlations," Phys. Rev. Lett. 88, 017901, 2001.
- [4] B. Dakic, Y. O. Lipp, X. Ma, M. Ringbauer, S. Kropatschek, S. Barz, T. Paterek, V. Vedral, A. Zeilinger, C. Brukner, and P. Walther, "Quantum discord as resource for remote state preparation," Nature. Phys. 8, 666-670, 2012.
- [5] M.-J. Zhao, "Maximally entangled states and fully entangled fraction," Phys. Rev. A 91, 012310, 2015.
- [6] C. H. Bennett, D. P. DiVincenzo, J. Smolin, and W. K. Wootters, "Mixed-state entanglement and quantum error correction," Phys. Rev. A 54, 3824, 1996.
- [7] R. Horodecki and M. Horodecki, "Information-theoretic aspects of inseparability of mixed states," Phys. Rev. A 54, 1838-1843, 1996.
- [8] B. Dakic, V. Vedral, and C. Brukner, "Necessary and sufficient condition for nonzero quantum discord," Phys. Rev. Lett. 105, 190502-190506, 2010.
- [9] S. Luo and S. Fu, "Geometric measure of quantum discord," Phys. Rev. A 82, 034302, 2010.
- [10] G. L. Giorgi, "Quantum discord and remote state preparation," Phys. Rev. A 88, 022315, 2013.



شکل ۱: نمودار سه کمیت کسر کاملاً درهم‌تنیده، شباهت RSP و ناهمخوانی کوانتومی، برحسب λ_1 به ازای

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \frac{1 - \lambda_1}{3}$$



شکل ۲: نمودار کمیت‌ها برحسب λ_1 به ازای $\lambda_3 = 0.1$ ، $\lambda_4 = 0$ و $\lambda_2 = 1 - \lambda_1 - \lambda_3 - \lambda_4$.

در شکل ۲ نیز مشاهده می‌گردد که FEF و شباهت RSP رفتار سازگاری دارند، درحالی‌که ناهمخوانی کوانتومی در ابتدا و انتهای بازه رفتار متفاوتی نشان می‌دهد. اما همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، این سازگاری برای FEF در حالت کلی برقرار نمی‌باشد. اما باز هم به ازای $\lambda_1 \geq 0.5$ و $\lambda_1 \leq 0.1$ که نشان‌دهنده حالت‌های بل-قطری درهم‌تنیده می‌باشند رفتار FEF و FID یکسان است.