

ĐỊNH LƯỢNG ĐỘ RỐI VÀ VIỄN TẢI LƯỢNG TỬ VỚI TRẠNG THÁI HAI MODE KẾT HỢP $SU(1,1)$ THÊM MỘT VÀ BỐT MỘT PHOTON

HOÀNG THỊ THÚY DUNG¹
TRƯƠNG MINH DỨC¹, TRẦN QUANG ĐẠT²
¹Trường Đại học Sư phạm, Đại học Huế
²Phân hiệu trường Đại học GTVT tại TP HCM

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu tính đan rối, định lượng độ rối và viễn tải lượng tử với trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon. Kết quả thu được là trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon thể hiện tính đan rối theo tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy. Ngoài ra, trạng thái này còn thể hiện tính chất đan rối cao theo tiêu chuẩn định lượng độ rối Độ đồng quy. Khi sử dụng trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon làm nguồn đan rối để viễn tải một trạng thái kết hợp, chúng tôi nhận thấy rằng quá trình viễn tải thành công với độ trung thực trung bình F_{av} thỏa mãn điều kiện viễn tải $F_{av} \geq 0.5$.

Từ khóa: Trạng thái hai mode kết hợp, Tính chất đan rối, Viễn tải lượng tử

GIỚI THIỆU

Ngày nay, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học kỹ thuật, trong lĩnh vực công nghệ thông tin, làm thế nào để truyền tín hiệu đi xa mà vẫn đảm bảo tính lọc lựa cao và giảm được thăng giáng đến mức thấp nhất là vấn đề cấp thiết cho các nhà vật lý lý thuyết cũng như thực nghiệm. Trong đó, rối lượng tử và viễn tải lượng tử là nguồn tài nguyên có giá trị đáp ứng cho yêu cầu này.

Trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ được định nghĩa như sau [1]

$$|\varphi\rangle_{ab} = |\xi, q\rangle_{ab} = (1 - |\xi|^2)^{\frac{1+q}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{1/2} \xi^n |n+q, n\rangle_{ab}, \quad (1)$$

trong đó $\xi = -\tanh(\theta/2) \exp(-i\varphi)$; $(\theta/2) = r$ với θ rất bé. Từ (1), chúng tôi đưa ra một trạng thái phi cổ điển mới bằng cách thêm một và bớt một photon lên trạng thái hai mode

kết hợp SU(1,1) như sau:

$$|\psi_{ab}\rangle = \mathcal{N}(a^+ + b)|\xi, q\rangle_{ab}, \quad (2)$$

trong đó \mathcal{N} là hệ số chuẩn hóa. Khi khai triển thông qua trạng thái Fock, hệ số chuẩn hóa \mathcal{N} có dạng

$$\begin{aligned} \mathcal{N} = & \left([1 - |\xi|^2]^{1+q} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} (2n + q + 1) \frac{(n + q)!}{n!q!} |\xi|^{2n} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ & + \left([1 - |\xi|^2]^{1+q} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\sum_{n=1}^{\infty} (n + q) \frac{(n + q - 1)!}{(n - 1)!q!} |\xi|^{2n} \frac{1}{\xi^*} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ & + \left([1 - |\xi|^2]^{1+q} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} (n + q + 1) \frac{(n + q)!}{n!q!} |\xi|^{2n} \xi^* \right)^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

Trong bài báo này, chúng tôi tiến hành khảo sát tính đan rối của trạng thái hai mode kết hợp SU(1,1) thêm một và bớt một photon. Sau đó tiến hành viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp với trạng thái này và đánh giá sự thành công của quá trình viễn tải thông qua độ trung thực trung bình. Các kết quả thu được sẽ được chúng tôi biện luận chi tiết ở phần kết luận.

1 NGHIÊN CỨU TÍNH ĐAN RỐI VÀ ĐỊNH LƯỢNG ĐỘ RỐI

Chúng tôi sử dụng tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy [2] để nghiên cứu tính đan rối của trạng thái hai mode kết hợp SU(1,1) thêm một và bớt một photon. Theo tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy, một trạng thái được gọi là đan rối nếu thỏa mãn bất đẳng thức sau

$$\langle (\hat{a}^\dagger)^m (\hat{a})^m \rangle \langle (\hat{b}^\dagger)^n (\hat{b})^n \rangle < \left| \langle (\hat{a})^m (\hat{b}^\dagger)^n \rangle \right|^2. \quad (3)$$

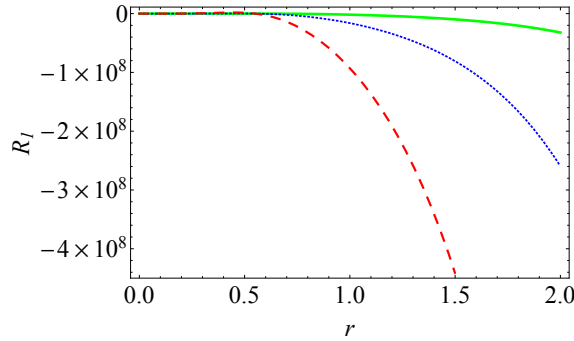
Sử dụng tiêu chuẩn (3), đặt $m = n = l$ và để thuận lợi cho việc nghiên cứu chúng tôi đưa vào tham số đan rối R_1 dưới dạng

$$R_1 = \left\langle (\hat{a}^\dagger)^l (\hat{a})^l \right\rangle \left\langle (\hat{b}^\dagger)^l (\hat{b})^l \right\rangle - \left| \left\langle (\hat{a})^l (\hat{b}^\dagger)^l \right\rangle \right|^2. \quad (4)$$

Khi đó, theo bất đẳng thức (3) ta thấy rằng một trạng thái là đan rối nếu thỏa mãn $R_1 < 0$ và R_1 càng âm thì mức độ đan rối càng tăng. Chúng tôi thực hiện tính toán các đại lượng trong biểu thức (4) và để thuận tiện cho việc khảo sát chúng tôi đặt $\varphi = 0$, $\theta = 2r$, với θ rất bé, ta được $\xi = -\tanh r$. Sau đó thay $\xi = -\tanh r$ vào biểu thức (4) ta thu được kết quả

$$R_1 = \mathcal{N}^2 (1 - (\tanh r)^2)^{(1+q)} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n + q)!}{n!q!} \right] (\tanh r)^{2n}$$

$$\begin{aligned}
& \times (n+q+1) \prod_{j=1}^l (n+1-j) \prod_{j=1}^l (n+q+2-j) \\
& + \mathcal{N}^2 (1 - (\tanh r)^2)^{(1+q)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+q)!}{n!q!} 2(\tanh r)^{2n} (-\tanh r) \\
& \times (n+q+1) \prod_{j=1}^l (n+1-j) \prod_{j=1}^l (n+q+2-j) \\
& + \mathcal{N}^2 (1 - (\tanh r)^2)^{(1+q)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] (\tanh r)^{2n} \\
& \times n \prod_{j=1}^l (n-j) \prod_{j=1}^l (n+q+1-j). \tag{5}
\end{aligned}$$



Hình 1: Sự phụ thuộc của tham số đan rối R_1 vào r với giá trị $q = 1, 2, 3$. Các giá trị q được chọn theo thứ tự tương ứng với đường liền nét, đường chấm chấm và đường đứt nét.

Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của tham số đan rối R_1 vào r , với nằm trong đoạn $0 \leq r \leq 2$, với $q = 1$ ứng với đường liền nét, $q = 2$ ứng với đường chấm chấm, $q = 3$ ứng với đường đứt nét. Chúng ta nhận thấy rằng, khi q tăng thì giá trị R_1 càng âm, điều đó chứng tỏ trạng thái này càng rối. Hơn nữa, mỗi đường cong đều có dạng đi xuống cho thấy mức độ đan rối tăng mạnh khi r tăng. Tuy nhiên, với giá trị bé của biên độ kết hợp thì có một vùng nhỏ chưa đan rối. Có thể nói, tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy tập trung vào việc không chia tách được của các hệ đa mode theo phương diện "số photon". Các kết quả khảo sát của chúng tôi đã thể hiện rằng trạng thái hai mode kết hợp SU(1,1) được thêm một và bớt một photon có đan rối theo phương diện này. Vậy trạng thái hai mode kết hợp SU(1,1) thêm một và bớt một photon là trạng thái đan rối theo tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy bậc cao, nên trạng thái này có thể làm nguồn rối cho quá trình viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp. Tuy nhiên, khi độ rối chỉ mới được đánh giá thông qua tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy thì rất cần thiết phải kiểm tra lại các kết quả thu được một lần nữa bằng một phương pháp khác độc lập với cách trên. Vì lý do đó, chúng tôi sẽ định lượng độ rối bằng tiêu chuẩn Độ đồng quy. Theo tiêu chuẩn Độ đồng quy [3], ta có trạng thái hai mode

a và b được đưa ra dưới dạng

$$|\Psi\rangle_{ab} = \mathcal{N} [\mu |\eta\rangle_a |\gamma\rangle_b + v |\zeta\rangle_a |\delta\rangle_b], \quad (6)$$

trong đó \mathcal{N} là hệ số chuẩn hóa; μ, v là số phức; $\zeta, \eta, \gamma, \delta$ là các trạng thái đã được chuẩn hóa của hai mode a và b . Từ đó, ta định nghĩa độ đồng quy

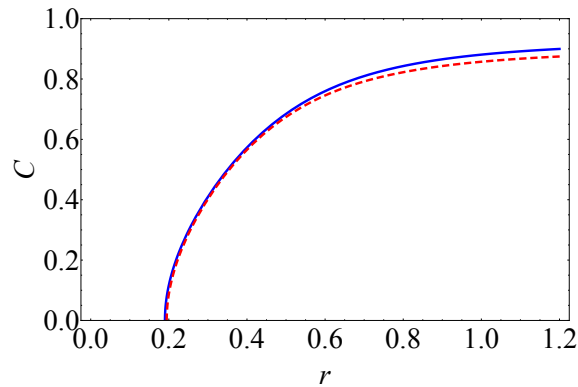
$$C = \frac{2|\mu||v|\sqrt{(1-|P_1^2|)(1-|P_2^2|)}}{|\mu|^2 + |v|^2 + \text{Re}(\mu^*vP_1P_2^*)}, \quad (7)$$

trong đó $P_1 = {}_a\langle\eta|\zeta\rangle_a$, $P_2 = {}_b\langle\delta|\gamma\rangle_b$. Trạng thái $|\Psi\rangle_{ab}$ là đan rối nếu $C > 0$ và đạt giá trị đan rối cực đại nếu $C = 1$. Khi áp dụng cho trạng thái hai mode kết hợp SU(1,1) thêm một và bớt một photon, ta thu được của độ đồng quy có dạng

$$C = \frac{2|\sqrt{N_1}||\sqrt{N_2}|\sqrt{(1-|P_1^2|)}}{N_1 + N_2}, \quad (8)$$

trong đó

$$\begin{aligned} N_1 &= (1 - |\xi|^2)^{1+q} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] |\xi|^{2n} (n+q+1), \\ N_2 &= (1 - |\xi|^2)^{1+q} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] |\xi|^{2n} n, \\ P_1 &= \frac{1}{\sqrt{N_1 N_2}} (1 - |\xi|^2)^{1+q} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] \frac{(n+q-1)!}{(n-1)!q!} \sqrt{n(n+q)} \xi^n \xi^{*(n-1)}. \end{aligned}$$



Hình 2: Sự phụ thuộc của độ đồng quy C vào r với các giá trị $q = 1$ ứng với đường liền nét, $q = 2$ ứng với đường đứt nét.

Sự phụ thuộc của độ đồng quy C theo biên độ kết hợp r được thể hiện trong hình 2. Nhìn vào đồ thị hình 2 ta thấy độ đồng quy C có giá trị trong khoảng từ 0 đến 1. Vì vậy trạng

thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon là trạng thái đan rối thỏa mãn tiêu chuẩn Độ đồng quy. Khi r càng lớn thì C càng gần với 1, như vậy tính chất đan rối càng thể hiện rõ hơn khi r càng cao. Có những điều thú vị ở các kết quả khảo sát của chúng tôi khi so sánh tiêu chuẩn này với tiêu chuẩn Hillery-Zubairy. Thứ nhất, khi q tăng thì C giảm nhưng không đáng kể (trong miền r lớn) nên sự tăng lên của tham số q đã làm giảm biểu hiện của tính chất đan rối theo tiêu chuẩn độ đồng quy. Thứ hai, khi r nhỏ, trạng thái được xét không biểu hiện tính đan rối theo các tiêu chuẩn này.

2 KHẢO SÁT QUÁ TRÌNH VIỄN TẢI LƯỢNG TỬ

Trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon là một trạng thái đan rối nên có thể sử dụng nó cho quá trình viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp.

Theo mô hình viễn tải của Agarwal và Gasbris [4], bên gửi thông tin là Alice và bên nhận thông tin là Bob. Trạng thái 2 mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon có hai mode a và b , trong đó mode a được đưa tới Alice và mode b được đưa tới Bob, trạng thái được viễn tải là trạng thái kết hợp $|\gamma\rangle_c$ tương ứng với mode c được đưa vào Alice. Tại nơi gửi thông tin, đầu tiên Alice sẽ thực hiện việc tổ hợp trạng thái $|\gamma\rangle_c$ và $|\Psi\rangle_{ab}$ trở thành một trạng thái 3 mode dưới dạng

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{abc} &= |\Psi\rangle_{ab} |\gamma\rangle_c \\ &= \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\frac{1+q}{2}} \xi^n \sqrt{n+q+1} |n+q+1, n\rangle_{ab} |\gamma\rangle_c \\ &\quad + \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\frac{1+q}{2}} \xi^n \sqrt{n} |n+q, n-1\rangle_{ab} |\gamma\rangle_c. \end{aligned} \quad (9)$$

Tiếp theo Alice thực hiện 1 phép đo trạng thái Bell tổ hợp trên 2 mode a và c để đo thông tin về mức độ đan rối giữa $|\gamma\rangle_c$ và $|\Psi\rangle_{ab}$ dựa trên 2 mode a và c .

Trạng thái Bell được biểu diễn qua trạng thái Fock như sau

$$|B(X, P)\rangle_{ac} = \frac{2}{\sqrt{\Pi}} \sum_{k=0}^{\infty} D_c(2A) |k, k\rangle_{ac}. \quad (10)$$

Khi phép đo tổ hợp hoàn thành, trạng thái tích $|\Psi\rangle_{abc}$ chuyển sang trạng thái mới. Do Bob và Alice cùng chia sẻ trạng thái đan rối nên Bob có trạng thái sau khi biến đổi như sau:

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_B &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\frac{1+q}{2}} \exp(A^* \gamma - A \gamma^*) \exp\left(-\frac{1}{2} |\gamma - 2A|^2\right) \\ &\quad \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^n \sqrt{n+q+1} \frac{(|\gamma - 2A|)^{n+q+1}}{\sqrt{(n+q+1)!}} |n\rangle_b \\ &\quad + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\frac{1+q}{2}} \exp(A^* \gamma - A \gamma^*) \exp\left(-\frac{1}{2} |\gamma - 2A|^2\right) \\ &\quad \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^n \sqrt{n} \frac{(|\gamma - 2A|)^{n+q}}{\sqrt{(n+q)!}} |n-1\rangle_b. \end{aligned} \quad (11)$$

Bây giờ, bên Bob tồn tại trạng thái tương ứng với mode b chứa các thông tin về mode c . Bob thực hiện phép dịch chuyển $\hat{D}(g\beta)$ để xây dựng lại trạng thái được viễn tải ban đầu $|\gamma\rangle_c$, với g là hệ số điều khiển mà Bob dùng để hoàn thiện độ trung thực của quá trình viễn tải. Từ đó, trạng thái cuối cùng thu được trong quá trình viễn tải là

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{out} &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\left(\frac{1+q}{2}\right)} \exp(A^* \gamma - A \gamma^*) \exp\left(-\frac{1}{2} |\gamma - 2A|^2\right) \\
 &\times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^n \sqrt{n+q+1} \frac{(|\gamma - 2A|)^{n+q+1}}{\sqrt{(n+q+1)!}} \hat{D}(g2A) |n\rangle_b \\
 &+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\left(\frac{1+q}{2}\right)} \exp(A^* \gamma - A \gamma^*) \exp\left(-\frac{1}{2} |\gamma - 2A|^2\right) \\
 &\times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^n \sqrt{n} \frac{(|\gamma - 2A|)^{n+q}}{\sqrt{(n+q)!}} \hat{D}(g2A) |n-1\rangle_b. \tag{12}
 \end{aligned}$$

Đến thời điểm này quá trình viễn tải đã hoàn thành và để đánh giá mức độ thành công của quá trình viễn tải chúng ta phải dựa vào độ trung thực trung bình F_{av}

$$F_{av} = \int |\langle \gamma | \Psi \rangle_{out}|^2 d^2 A. \tag{13}$$

Thực hiện tính toán và chúng tôi có

$$\begin{aligned}
 |\langle \gamma | \Psi \rangle_{out}| &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\left(\frac{1+q}{2}\right)} \exp(A^* \gamma - A \gamma^*) \exp\left(-\frac{1}{2} |\gamma - 2A|^2\right) \\
 &\times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^n \sqrt{n+q+1} \frac{(|\gamma - 2A|)^{n+q+1}}{\sqrt{(n+q+1)!}} \langle \gamma | \hat{D}(g2A) |n\rangle_b \\
 &+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\left(\frac{1+q}{2}\right)} \exp(A^* \gamma - A \gamma^*) \exp\left(-\frac{1}{2} |\gamma - 2A|^2\right) \\
 &\times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^n \sqrt{n} \frac{(|\gamma - 2A|)^{n+q}}{\sqrt{(n+q)!}} \langle \gamma | \hat{D}(g2A) |n-1\rangle_b. \tag{14}
 \end{aligned}$$

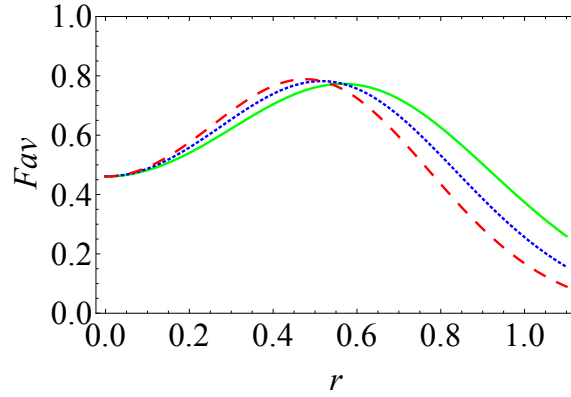
Từ trên ta suy ra được

$$\begin{aligned}
 \langle \gamma | \Psi \rangle_{out}^* &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\left(\frac{1+q}{2}\right)} \exp\left[-\frac{1}{2} (|\gamma - 2A|^2 + |\gamma - g2A|^2)\right] \\
 &\times \exp[(g-1)(\gamma A^* - \gamma^* A)] \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{(m+q)!}{m!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^{*m} \sqrt{m+q+1} \\
 &\times \frac{(|\gamma^* - 2A^*|)^{m+q+1}}{\sqrt{(m+q+1)!}} \frac{(\gamma - g2A)^m}{\sqrt{m!}} \\
 &+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \mathcal{N}(1 - |\xi|^2)^{\left(\frac{1+q}{2}\right)} \exp\left[-\frac{1}{2} (|\gamma - 2A|^2 + |\gamma - g2A|^2)\right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \exp[(g-1)(\gamma A^* - \gamma^* A)] \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{(m+q)!}{m!q!} \right]^{\frac{1}{2}} \xi^{*m} \sqrt{m} \\
& \times \frac{(|\gamma^* - 2A^*|)^{m+q} (\gamma - g2A)^{m-1}}{\sqrt{(m+q)!} \sqrt{(m-1)!}}. \tag{15}
\end{aligned}$$

Từ đó chúng tôi tính được độ trung thực trung bình F_{av} như sau:

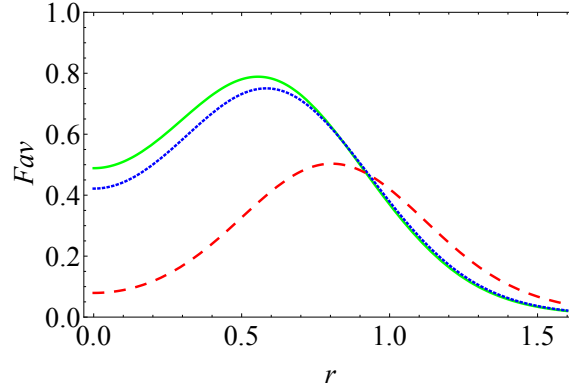
$$\begin{aligned}
F_{av} &= 4\mathcal{N}^2(1 - (\tanh r)^2)^{(1+q)} \exp(-|\gamma|^2) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] \\
& \times (\tanh r)^{2n} (n+q+1) \frac{|\gamma|^{2n}}{n!} \\
& + 4\mathcal{N}^2(1 - (\tanh r)^2)^{(1+q)} \exp(-|\gamma|^2) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] \\
& \times 2(n+q+1) \frac{|\gamma|^{2n}}{n!} (\tanh r)^{2n} (-\tanh r) \\
& + 4\mathcal{N}^2(1 - (\tanh r)^2)^{(1+q)} \exp(-|\gamma|^2) \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(n+q)!}{n!q!} \right] (\tanh r)^{2n} \frac{|\gamma|^{2(n-1)}}{(n-1)!} n. \tag{16}
\end{aligned}$$



Hình 3: Sự phụ thuộc của độ trung thực trung bình F_{av} vào r với giá trị $q = 2, 4, 5$ ứng với $\gamma = 1.47$. Các giá trị q được chọn theo thứ tự tương ứng với đường liền nét, đường chấm chấm và đường đứt nét.

Sự phụ thuộc của độ trung thực trung bình F_{av} vào biên độ kết hợp r được thể hiện ở hình 3. Dựa vào đồ thị, ứng với giá trị $\gamma = 1$ chúng ta thấy rằng: khi $q = 2$ (ứng với đường liền nét), quá trình viễn tải là thành công với khoảng viễn tải là $0.2 \leq r \leq 0.9$; khi $q = 4$ (ứng với đường chấm chấm), quá trình viễn tải là thành công với khoảng viễn tải là $0.2 \leq r \leq 0.75$; khi $q = 5$ (ứng với đường đứt nét), quá trình viễn tải là thành công với khoảng viễn tải là $0.2 \leq r \leq 0.7$. Như vậy, khi q tăng thì khoảng viễn tải hẹp dần. Ngoài ra, độ trung thực trung bình cực đại gần 0.8. Bây giờ, ta xét một trường hợp cụ thể với giá trị $q = 2$ (trường hợp có khoảng giá trị r lớn nhất). Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của

độ trung thực trung bình F_{av} vào biên độ kết hợp r được cho như hình 4. Đồ thị cho thấy ứng với giá trị $q = 2$, khi $\gamma = 1.45$ thì độ trung thực trung bình cực đại đạt gần 0.8; khi $\gamma = 1.50$ thì độ trung thực trung bình cực đại đạt gần 0.75; khi $\gamma = 1.99$ thì độ trung thực trung bình cực đại đạt 0.5. Khi tiếp tục tăng giá trị của γ lên thì độ trung thực trung bình đạt dưới 0.5 nên quá trình viễn tải không thành công nữa. Như vậy, chúng tôi thấy rằng quá trình viễn tải là thành công ứng với giá trị của γ là $1.45 \leq \gamma \leq 1.99$.



Hình 4: Sự phụ thuộc của độ trung thực trung bình F_{av} vào r với giá trị $q = 2$ ứng với $\gamma = 1.45$, $\gamma = 1.50$, $\gamma = 1.99$. Các giá trị γ được chọn theo thứ tự tương ứng với đường liền nét, đường chấm chấm và đường đứt nét.

3 KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã tiến hành nghiên cứu tính đan rối của trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon bằng tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy. Qua quá trình nghiên cứu cho chúng tôi thấy trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon là một trạng thái đan rối theo tiêu chuẩn Hillery-Zubairy bậc cao. Mặt khác, chúng tôi cũng đã tiến hành định lượng độ rối bằng tiêu chuẩn độ đồng quy nhằm khẳng định lại một lần nữa trạng thái hai mode kết hợp $SU(1,1)$ thêm một và bớt một photon là một trạng thái rối. Khi đã xem xét rằng trạng thái này là một trạng thái rối thì chúng tôi đã sử dụng nó làm nguồn rối để xây dựng mô hình viễn tải lượng tử; sau đó đánh giá mức độ thành công của quá trình viễn tải thông qua độ trung thực trung bình F_{av} . Kết quả cho thấy quá trình viễn tải lượng tử thành công, các đường biểu diễn cho thấy độ trung thực trung bình F_{av} phụ thuộc vào các giá trị tham số đưa vào. Kết quả này đã một lần nữa khẳng định mối liên quan chặt chẽ giữa việc đánh giá độ đan rối và sự thành công của quá trình viễn tải lượng tử.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOS-TED) trong đề tài mã số 103.01-2018.361.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Perelomov A. M. (1972), “Coherent states for arbitrary Lie groups”, *Communications in Mathematical Physics*, 26, 3, pp. 222 - 236.
- [2] Hillery M., and Zubairy M. S. (2006), “Entanglement conditions for two- mode states”, *Physical Review Letters*, 96, 5, pp. 050503-1 - 050503-7.
- [3] Jiani Wu, Shiyou Liu, Liyun Hu, Jiehui Huang, Zhenglu Duan and Yinghua Ji (2015), “Improving entanglement of even entangled coherent states by a coherent superposition of photon subtraction and addition”, *Journal of the Optical Society of America B*, 32, 11, pp. 2299-1 - 2299-9.
- [4] G. S. and Biswas A. (2005), “Inseparability inequalities for higher order moments for bipartite systems”, *New Journal of Physics*, 7, 1, pp. 211-1 - 211-8.
- [5] Duc. T. M, Noh. J (2008), “Higher-order properties of photonadded coherent states”, *Optics communications*, 281, pp. 2842-2848.

Title: QUANTITATIVE MEASURES OF ENTANGLEMENT AND QUANTUM TELEPORTATION OF THE ONE-PHOTON-ADDED AND ONE-PHOTON-SUBTRACTED TWO-MODE $SU(1,1)$ COHERENT STATE

Abstract: In this paper, we consider the entanglement properties of the one-photon-added and one-photon-subtracted two-mode $SU(1,1)$ coherent state. By applying the Hillery-Zubairy and the Concurrence entanglement criteria, we conclude that the one-photon-added and one-photon-subtracted two-mode $SU(1,1)$ coherent state is absolutely entangled states. Then, these state is used as an entangled resource for teleportation of a coherent state to assess the efficiency of the process via the average fidelity F_{av} . From the results of the average fidelity, we show that the teleportation process is successful when the average fidelity satisfies the condition $F_{av} \geq 0.5$.

Keywords: Two-mode coherent state, entanglement, quantum teleportation.