ĐỊNH LƯỢNG ĐỘ RỐI VÀ VIỄN TẢI LƯỢNG TỬ VỚI TRẠNG THÁI THÊM VÀ BỚT MỘT PHOTON LÊN HAI MODE KẾT HỢP

Phạm Thị Hằng[1]
Trần Quang Đạt[2]
Trương Minh Đức[1]

TÓM TẮT

Trong bài báo này, chúng tôi định lượng độ rối và viễn tải lượng tử của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp. Bằng việc sử dụng đồng thời tiêu chuẩn đan rối Hillery–Zubairy bậc cao và tiêu chuẩn Entropy tuyến tính, chúng tôi thu được kết quả trạng thái này là một trạng thái hoàn toàn đan rối khi ta chọn các tham số trạng thái phù hợp. Tiếp theo chúng tôi tiến hành viễn tải lượng tử với trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp, sau đó đánh giá mức độ thành công của quá trình viễn tải thông qua độ trung thực trung bình. Kết quả cho thấy rằng quá trình viễn tải lượng tử là thành công khi ta chọn các tham số trạng thái phù hợp.

Từ khóa: *Tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy bậc cao, tiêu chuẩn Entropy tuyến tính,viễn tải lượng tử, độ trung thực trung bình*

1. Giới thiệu

Vào năm 1963 Glauber [1] và Sudar Shan [2] đã đưa ra trạng thái kết hợp, đó là trạng thái tương ứng với giá trị thăng giáng nhỏ nhất suy ra từ hệ thức bất định Heisenberg. Sau đó Agarwal và Tara đã đề xuất ý tưởng về trạng thái kết hợp thêm photon [3] và cũng đã chứng minh được nó là một trạng thái phi cổ điển năm 1991. Việc tạo ra các trạng thái phi cổ điển có ý nghĩa rất quan trọng cho sự phát triển khoa học và công nghệ thông tin lượng tử. Một phương pháp quan trọng để tạo ra một trạng thái phi cổ điển mới là việc thêm và bớt photon vào một trạng thái vật lý. Trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp có dạng

$$\left|\psi\right\rangle_{ab} = N_{\alpha,\beta}\left(\hat{a}^{\dagger} + \hat{b}\right)\left|\alpha\right\rangle_{a}\left|\beta\right\rangle_{b}, \quad (1)$$

trong đó

$$N_{\alpha,\beta} = \frac{1}{\sqrt{1+|\alpha|^{2}+|\beta|^{2}+2\mathrm{Re}[\alpha\beta]}} \quad (2)$$

là hệ số chuẩn hóa, $\hat{a}^{\dagger}$ và $\hat{b}$ lần lượt là toán tử sinh đối với mode a và toán tử hủy đối với mode b của trường điện từ với hai mode a và b độc lập. Việc khảo sát các tính chất phi cổ điển của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp đã được tác giả Nguyễn Hữu Luân [4] nghiên cứu. Tuy nhiên, việc định lượng độ rối và viễn tải lượng tử với trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp vẫn chưa được đề cập đến. Vì vậy, trong bài báo này chúng tôi định lượng độ rối và viễn tải lượng tử với trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp.

[1]Trường Đại học Sư phạm – Đại học Huế
Email: tmduc2009@gmail.com
[2] Trường Đại học Giao thông vận tải – Phân hiệu tại TP. Hồ Chí Minh

2. Định lượng độ rối của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp

2.1. Định lượng độ rối bằng tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy bậc cao

Tiêu chuẩn đan rối Hillery–Zubairy bậc cao [5] đưa ra năm 2006 là một lớp bất đẳng thức mà sự vi phạm của chúng chỉ ra sự hiện diện của đan rối trong các hệ hai mode được cho bởi biểu thức $\left\langle \hat{a}^{\dagger m}\hat{a}^{m}\hat{b}^{\dagger n}\hat{b}^{n}\right\rangle < \left|\left\langle \hat{a}^{m}\hat{b}^{\dagger n}\right\rangle\right|^{2}$.

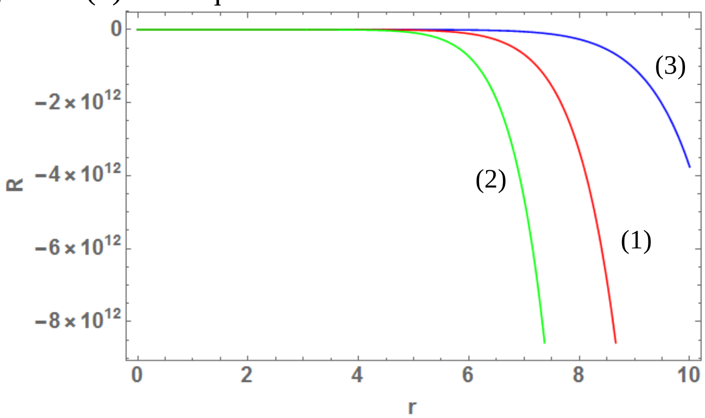
Để thuận tiện cho khảo sát tôi đưa vào tham số đan rối R dưới dạng

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

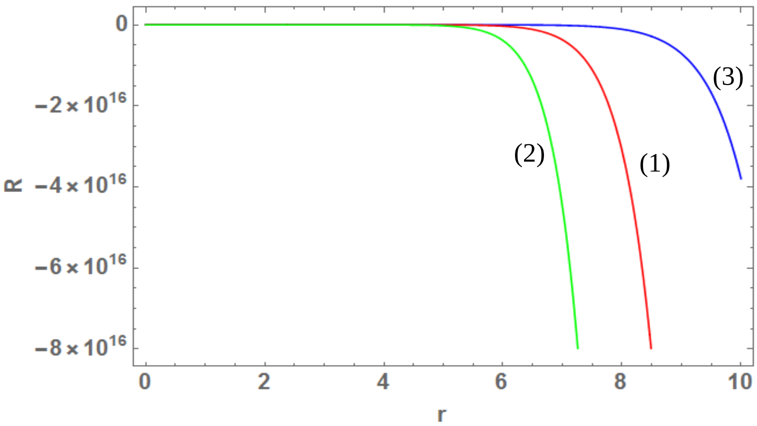
Một trạng thái bất kỳ được xem là trạng thái đan rối nếu R<0, ngược lại nếu R>0 thì trạng thái đó không đan rối. Sử dụng các tính chất của các toán tử $[\hat{a},\hat{a}^{\dagger}]=1$ và $[\hat{b},\hat{b}^{\dagger}]=1$ đối với mode a và mode b, ta chứng minh được

$$\begin{aligned} R(m,n) = {} & |N_{\alpha,\beta}|^{2}\Big[\Big(|\alpha|^{2(m+1)} + (2m+1)|\alpha|^{2m} + m^{2}|\alpha|^{2(m-1)}\Big)|\beta|^{2n} \\ & + \Big(|\alpha|^{2m} + m|\alpha|^{2(m-1)}\Big)|\beta|^{2n}\, 2\mathrm{Re}[\alpha\beta] + |\alpha|^{2m}|\beta|^{2(n+1)}\Big] \\ & - |N_{\alpha,\beta}|^{4}\Big[\Big(|\alpha|^{2} + m + 1 + |\beta|^{2}\Big)^{2}|\alpha|^{2m}|\beta|^{2n} \\ & + \Big(|\alpha|^{2} + m\Big)|\alpha|^{2(m-1)}|\beta|^{2n}\, 2\mathrm{Re}[\alpha^{2}\beta^{2}] \\ & + \Big(|\alpha|^{2} + m + 1 + |\beta|^{2}\Big)|\beta|^{2n}\Big(2|\alpha|^{2m} + m|\alpha|^{2(m-1)}\Big)2\mathrm{Re}[\alpha\beta] \\ & + \Big(|\alpha|^{2} + m\Big)^{2}|\alpha|^{2(m-1)}|\beta|^{2(n+1)} + |\alpha|^{2(m+1)}|\beta|^{2(n+1)}\Big]. \end{aligned} \quad (4)$$

Để đơn giản chúng ta đặt $\alpha = r_1\exp(i\varphi_1), \beta = r_2\exp(i\varphi_2)$ và $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, $r_2 = kr_1 = kr$, đồng thời thay vào công thức (4). Kết quả khảo sát tính đan rối của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp thể hiện thông qua các đồ thị hình 1 và hình 2.



Hình 1: *Đồ thị khảo sát sự phụ thuộc của R(2,2) theo biên độ r, k = 1 ứng với đường (3), k = 1,5 ứng với đường (1) và k = 2 ứng với đường (2)*



Hình 2: *Đồ thị khảo sát sự phụ thuộc của R(3,3) theo biên độ r, k = 1 ứng với đường (3), k = 1,5 ứng với đường (1) và k = 2 ứng với đường (2)*

Từ đồ thị hình 1 và hình 2 ta thấy với cùng điều kiện đã chọn thì giá trị của tham số R luôn có giá trị âm, tức là trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp hoàn toàn đan rối theo tiêu chuẩn Hillery Zubairy bậc cao. Đặc biệt khi r càng tăng thì R càng âm, nghĩa là tính đan rối xảy ra càng mạnh.

2.2. Định lượng độ rối bằng tiêu chuẩn Entropy tuyến tính

Tiêu chuẩn Entropy tuyến tính của Agarwal và Biswas đưa ra để đánh giá mức độ đan rối của trạng thái đa mode, được cho bởi hàm

$$M = 1 - Tr(\hat{\rho}_a^2), \tag{5}$$

trong đó $Tr(\hat{\rho}_a^2)$ là phép lấy vết của ma trận mật độ rút gọn $\hat{\rho}_a$ bình phương.

Một trạng thái rối sẽ có M > 0 và giới hạn M = 1 ứng với trạng thái đan rối cực đại, nếu M = 0 thì trạng thái không đan rối. Để tính Entropy tuyến tính ta biểu diễn trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp theo trạng thái Fock

$$\begin{aligned}|\psi\rangle_{ab} &= N_{\alpha,\beta} \exp\left(-\frac{|\alpha|^2 + |\beta|^2}{2}\right) \sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha^n \beta^m}{\sqrt{n!m!}} \\ &\times \left[\sqrt{(n+1)}\,|n+1,m\rangle_{ab} + \sqrt{m}\,|n,m-1\rangle_{ab}\right].\end{aligned} \tag{6}$$

Ma trận mật độ của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp có dạng

$$\begin{aligned}\hat{\rho} = |\psi\rangle_{abba}\langle\psi| &= N_{\alpha,\beta}{}^2 \exp\left(-|\alpha|^2 - |\beta|^2\right) \sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha^n \beta^m \alpha^{*l} \beta^{*p}}{\sqrt{n!m!l!p!}} \\ &\times \left[\sqrt{(l+1)}\,{}_{ba}\langle p, l+1| + \sqrt{p}\,{}_{ba}\langle p-1, l|\right. \\ &\times \left[\sqrt{(n+1)}\,|n+1,m\rangle_{ab} + \sqrt{m}\,|n,m-1\rangle_{ab}\right].\end{aligned} \tag{7}$$

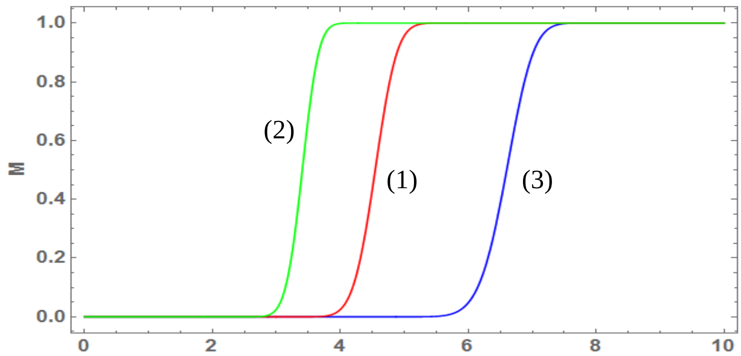
Do đó ma trận mật độ $\hat{\rho}_a$ của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp đối với mode a là

$$\hat{\rho}_a = Tr_b(\hat{\rho}) = N_{\alpha,\beta}{}^2 \exp\left(-|\alpha|^2 - |\beta|^2\right) Tr_b \sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{\alpha^n \beta^m \alpha^{*l} \beta^{*p}}{\sqrt{n!m!l!p!}}$$
$$\times\left[\sqrt{(l+1)}\,{}_{ba}\langle p, l+1| + \sqrt{p}\,{}_{ba}\langle p-1, l|\right. \tag{8}$$
$$\times\left[\sqrt{(n+1)}|n+1, m\rangle_{ab} + \sqrt{m}|n, m-1\rangle_{ab}\right].$$

Thay (8) vào (5) và biến đổi ta thu được

$$M = 1 - \left[\frac{1}{\sqrt{1+|\alpha|^2+|\beta|^2+2\mathrm{Re}[\alpha\beta]}}\right]^4 \exp\left(-2|\alpha|^2 - 2|\beta|^2\right)$$
$$\times \sum_{n,m,l,m'=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2(n+l)}|\beta|^{2(m+m')}}{n!m!l!m'!}\left[(n+m'+1)4\mathrm{Re}[\alpha\beta] + 2\mathrm{Re}[\alpha^2\beta^2]\right. \tag{9}$$
$$\left.+(l+1)(n+1) + mm' + |\alpha|^2(m+m') + m(n+l+2)\right].$$

Để thuận tiện cho việc khảo sát hàm Entropy tuyến tính, chúng ta đặt $\alpha = r_1\exp(i\varphi_1)$, $\beta = r_2\exp(i\varphi_2)$ và $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, $r_2 = kr_1 = kr$, đồng thời thay vào công thức (9). Kết quả khảo sát tính đan rối của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp thể hiện thông qua đồ thị hình 3.



Hình 3: *Đồ thị khảo sát entropy tuyến tính theo r của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp, k = 1 ứng với đường (3), k = 1,5 ứng với đường (1) và k = 2 ứng với đường (2)*

Từ đồ thị hình 3 ta thấy tham số M có giá trị từ 0 đến 1, khi r càng tăng thì M tiến đến giá trị 1. Vì vậy trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp là trạng thái đan rối theo tiêu chuẩn đan rối Entropy tuyến tính.

3. Quá trình viễn tải lượng tử với trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp

3.1. Quá trình viễn tải lượng tử

Trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp là một trạng thái rối hai mode, do đó trạng thái này được sử dụng làm nguồn rối để viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp. Theo mô hình viễn tải của Agarwal và Gábris, bên gửi thông tin là Alice và bên nhận thông tin là Bob. Trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp có hai mode a và b, trong đó mode a được đưa tới Alice và mode b được đưa tới Bob và trạng thái được viễn tải là trạng thái kết hợp $\left|\gamma\right\rangle_c$ 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 $\left|\gamma\right\rangle_c$ và $\left|\psi\right\rangle_{ab}$ trở thành một trạng thái ba mode có dạng

$$\begin{aligned}\left|\psi\right\rangle_{abc} &= N_{\alpha,\beta}\exp\left(-\frac{\left|\alpha\right|^2+\left|\beta\right|^2}{2}\right)^2\sum_{n,m=0}^{\infty}\frac{\alpha^n\beta^m}{\sqrt{n!m!}} \\ &\times\left[\sqrt{(n+1)}\left|n+1,m\right\rangle_{ab}\left|\gamma\right\rangle_c+\sqrt{m}\left|n,m-1\right\rangle_{ab}\left|\gamma\right\rangle_c\right].\end{aligned} \tag{10}$$

Tiếp theo, Alice dùng phép đo Bell tổ hợp trên hai mode a và c để đo thông tin về mức độ đan rối giữa $\left|\gamma\right\rangle_c$ và $\left|\psi\right\rangle_{ab}$ dựa trên hai mode a và c. Phép đo này hình thành nên một trạng thái rối phức hợp, chính là trạng thái Bell. Trạng thái Bell được biểu diễn qua trạng thái Fock như sau

$$\left|B(X,P)\right\rangle_{ac}=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\sum_{k=0}^{\infty}\hat{D}_c(2A)\left|k,k\right\rangle_{ac}. \tag{11}$$

Khi phép đo tổ hợp hoàn thành, trạng thái này sụp đổ. Do Bob và Alice cùng chia sẻ trạng thái rối nên Bob có trạng thái sau

$$\begin{aligned}\left|\psi\right\rangle_B &= \frac{2}{\sqrt{\pi}}N_{\alpha,\beta}\exp\left(-\frac{\left|\alpha\right|^2+\left|\beta\right|^2}{2}\right)^2\sum_{n,m=0}^{\infty}\frac{\alpha^n\beta^m}{\sqrt{n!m!}} \\ &\times\exp\left(A^*\gamma-A\gamma^*\right)\exp\left(-\frac{1}{2}\left|\gamma-2A\right|^2\right) \\ &\times\left[\frac{1}{\sqrt{n!}}(\gamma-2A)^{n+1}\left|m\right\rangle_b+\frac{\sqrt{m}}{\sqrt{n!}}(\gamma-2A)^n\left|m-1\right\rangle_b\right].\end{aligned} \tag{12}$$

Bây giờ, bên Bob tồn tại trạng thái ứng với mode b chứa các thông tin về mode c. Bob sẽ thực hiện phép dịch chuyển $\hat{D}(g2A)$ để xây dựng lại trạng thái được viễn tải ban đầu $\left|\gamma\right\rangle_c$, với g là hệ số điều khiển mà Bob dùng để hoàn thiện độ trung thực của quá trình viễn tải. Trạng thái cuối cùng thu được trong quá trình viễn tải sẽ là

$$\begin{aligned}|\psi\rangle_{out} &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_{\alpha,\beta} \exp\left(-\frac{|\alpha|^2+|\beta|^2}{2}\right)\sum_{n,m=0}^{\infty}\frac{\alpha^n\beta^m}{\sqrt{n!m!}} \\ &\times \exp\left(A^*\gamma - A\gamma^*\right)\exp\left(-\frac{1}{2}|\gamma-2A|^2\right) \\ &\times\left[\frac{1}{\sqrt{n!}}(\gamma-2A)^{n+1}\hat{D}(g2A)|m\rangle_b + \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{n!}}(\gamma-2A)^n\hat{D}(g2A)|m-1\rangle_b\right].\end{aligned} \quad (13)$$

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

3.2. Độ trung thực trung bình của quá trình viễn tải

Độ trung thực trung bình F_{av} được dùng để xác định sự thành công của quá trình viễn tải. Quá trình viễn tải là thành công nếu $0,5 \le F_{av} \le 1$. Quá trình viễn tải được đánh giá là hoàn hảo nếu đạt được $F_{av} = 1$. Độ trung thực trung bình trong quá trình viễn tải được xác định như sau

$$F_{av} = \int \left| {}_{in}\langle\psi|\psi\rangle_{out}\right|^2 d^2A. \quad (14)$$

Từ (13) suy ra

$$\begin{aligned}{}_{in}\langle\psi|\psi\rangle_{out} &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_{\alpha,\beta} \exp\left(-\frac{|\alpha|^2+|\beta|^2}{2}\right)\sum_{n,m=0}^{\infty}\frac{\alpha^n\beta^m}{\sqrt{n!m!}} \\ &\times \exp\left(A^*\gamma - A\gamma^*\right)\exp\left(-\frac{1}{2}|\gamma-2A|^2\right) \\ &\times\left[\frac{1}{\sqrt{n!}}(\gamma-2A)^{n+1}{}_c\langle\gamma|\hat{D}(g2A)|m\rangle_b \right.\\ &\left. + \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{n!}}(\gamma-2A)^n{}_c\langle\gamma|\hat{D}(g2A)|m-1\rangle_b\right].\end{aligned} \quad (15)$$

Thay (15) vào (14) ta thu được

$$\begin{aligned}F_{av} &= \int\frac{4}{\pi}|N_{\alpha,\beta}|^2\exp\left(-|\alpha|^2-|\beta|^2\right)\exp\left(-|\gamma-2A|^2-|\gamma-g2A|^2\right)\sum_{n,m,l,p=0}^{\infty}\frac{\alpha^n\beta^m\alpha^{*l}\beta^{*p}}{n!m!l!p!} \\ &\times\Big[(\gamma-2A)^{n+1}\left(\gamma^*-g2A^*\right)^m\left(\gamma^*-2A^*\right)^{l+1}(\gamma-g2A)^p \\ &+p(\gamma-2A)^{n+1}\left(\gamma^*-g2A^*\right)^m\left(\gamma^*-2A^*\right)^{l}(\gamma-g2A)^{p-1} \\ &+m(\gamma-2A)^{n}\left(\gamma^*-g2A^*\right)^{m-1}\left(\gamma^*-2A^*\right)^{l+1}(\gamma-g2A)^{p} \\ &+mp(\gamma-2A)^{n}\left(\gamma^*-g2A^*\right)^{m-1}\left(\gamma^*-2A^*\right)^{l}(\gamma-g2A)^{p-1}\Big]d^2A.\end{aligned} \quad (16)$$

Biểu thức (16) cho biết độ trung thực trung bình dưới dạng tổng quát, với g là hệ số Bob dùng để hoàn thiện độ trung thực của quá trình viễn tải, nên ta có thể chọn g để điều khiển độ trung thực trung bình. Chọn trường hợp g = 0 và thực hiện các bước biến đổi, ta thu được biểu thức độ trung thực trung bình có dạng

$$
\begin{aligned}
F_{av} = {} & \frac{1}{\pi}\left|N_{\alpha,\beta}\right|^2 \exp\left(-|\alpha|^2-|\beta|^2-|\gamma|^2\right) \\
& \times \sum_{n,m,l,p=0}^{\infty} \frac{\alpha^n \beta^m \alpha^{*l} \beta^{*p}}{n!m!l!p!} \int \exp\left(-|\gamma-2A|^2\right) \\
& \times \Big[(\gamma-2A)^{n+1} \gamma^{*m} \left(\gamma^*-2A^*\right)^{l+1} \gamma^p \\
& + p(\gamma-2A)^{n+1} \gamma^{*m} \left(\gamma^*-2A^*\right)^{l} \gamma^{p-1} \\
& + m(\gamma-2A)^{n} \gamma^{*m-1} \left(\gamma^*-2A^*\right)^{l+1} \gamma^{p} \\
& + mp(\gamma-2A)^{n} \gamma^{*m-1} \left(\gamma^*-2A^*\right)^{l} \gamma^{p-1} \Big] d^2(\gamma-2A).
\end{aligned} \tag{17}
$$

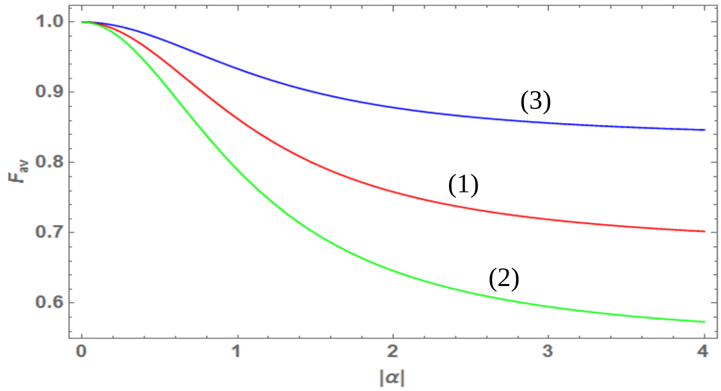
Biến đổi ta thu được

$$
\begin{aligned}
F_{av} = {} & \frac{1}{1+|\alpha|^2+|\beta|^2+2Re[\alpha\beta]} \exp\left(-|\alpha|^2-|\beta|^2-|\gamma|^2\right) \\
& \times \left[\sum_{n,m,p=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2n} \beta^m \beta^{*p} \gamma^{*m} \gamma^p}{n!m!p!}(n+1) + \sum_{m,n,p=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2n} \beta^m \beta^{*p} \gamma^{*m} \gamma^p}{n!m!p!} \alpha^* \beta^* \right. \\
& \left. + \sum_{m,l,p=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2l} \beta^m \beta^{*p} \gamma^{*m} \gamma^p}{m!l!p!} \alpha\beta + \sum_{n,m,p=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2n} \beta^m \beta^{*p} \gamma^{*m} \gamma^p}{n!m!p!} |\beta|^2 \right].
\end{aligned} \tag{18}
$$

Để thuận lợi cho việc khảo sát, chúng ta sẽ khảo sát $|\beta|$ và $|\gamma|$ theo $|\alpha|$ với $|\beta| = |\gamma| = k|\alpha|$, từ đó độ trung thực trung bình được viết lại dưới dạng

$$
\begin{aligned}
F_{av} = {} & \frac{1}{1+|\alpha|^2+\left(k|\alpha|\right)^2+2Re[\alpha\beta]} \exp\left[-|\alpha|^2-2\left(k|\alpha|\right)^2\right] \\
& \times \left[\sum_{n,m,p=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2n}\left(k|\alpha|\right)^{2(m+p)}}{n!m!p!}\left(n+1+2\mathrm{Re}[\alpha\beta]\right) + \sum_{n,m,p=0}^{\infty} \frac{|\alpha|^{2n}\left(k|\alpha|\right)^{2(m+p+1)}}{n!m!p!} \right].
\end{aligned} \tag{19}
$$

Chúng tôi khảo sát sự phụ thuộc của F_{av} vào biên độ kết hợp $|\alpha|$ theo biểu thức (19) để đánh giá về quá trình viễn tải lượng tử với nguồn rối là trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp. Kết quả khảo sát được thể hiện thông qua đồ thị hình 4.



Hình 4: *Đồ thị độ trung thực trung bình theo biên độ kết hợp* $|\alpha|$ *của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp, k = 1,1 ứng với đường (3), k = 1,2 ứng với đường (1) và k = 1,3 ứng với đường (2)*

Từ đồ thị hình 4 cho thấy rằng kết quả của quá trình viễn tải là thành công, giá trị của độ trung thực trung bình F_{av} nằm trong khoảng từ 0,5 đến 1 khi r có giá trị nhỏ.

4. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng tiêu chuẩn đan rối Hillery-Zubairy bậc cao và tiêu chuẩn đan rối Entropy tuyến tính để khảo sát tính đan rối của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp, sử dụng trạng thái này làm nguồn rối để thực hiện viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp và tính độ trung thực trung bình của quá trình viễn tải. Kết quả cho thấy, trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp là một trạng thái đan rối theo tiêu chuẩn Hillery-Zubairy bậc cao và tiêu chuẩn Entropy tuyến tính. Khi xác định các tham số trạng thái phù hợp thì trạng thái này là một trạng thái đan rối hoàn toàn và có thể sử dụng chúng như là một nguồn tài nguyên đan rối để viễn tải lượng tử. Chúng tôi đã thực hiện quá trình viễn tải lượng tử một trạng thái kết hợp với nguồn rối là trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp và đánh giá sự thành công của quá trình viễn tải thông qua độ trung thực trung bình của quá trình viễn tải. Kết quả cho thấy, độ trung thực trung bình của quá trình viễn tải nằm trong khoảng $0,5 < F_{av} < 1$ với trạng thái có biên độ bé và độ trung thực trung bình tiến gần đến 1 khi chọn các giá trị tham số $|\alpha| = |\beta| = |\gamma|$. Vậy quá trình viễn tải lượng tử với nguồn rối là trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp là thành công.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Glauber. R. J. (1963), *Phys. Rev. Lett*, 131, 2766

2. Sudarshan. E. C. G. (1963), *Phys. Rev. Lett*, 10, 277

3. Agarwal. G. S. and Tara. K. (1991), *Physical Review A*, 43, 492

4. Nguyễn Hữu Luân (2017), "Nghiên cứu các tính chất phi cổ điển của trạng thái thêm và bớt một photon lên hai mode kết hợp", Luận văn Thạc sĩ Vật lý, trường Đại học Sư phạm Huế

5. Hillery M. and Zubairy M. S. (2006), *Phys. Rev. A, 74*(3), 032333

A STUDY OF ENTANGLEMENT PROPERTY AND QUANTUM TELEPORTATION WITH SINGLE-PHOTON ADDED AND SUBTRACTED TWO-MODE COHERENT STATES

ABSTRACT

In the paper, we consider entanglement property of single-photon added-and-subtracted two-mode coherent states. By applying the higher-order Hillery-Zubairy entangled and linear Entropy conditions, we concluded that the single-photon added-and-subtracted two-mode coherent states are absolutely entangled states. Then the states are used as an entangled resource for the quantum teleportation of a combination states to assess the efficiency of the process via the average fidelity. From the results of the average fidelity, we show that teleportation process is successful when the fidelity reaches the value of $0.5 < F_{av} < 1$.

Keywords: *Entanglement property, quantum teleportation, Hillery-Zubairy entagled conditions, linear Entropy condition*

(Received: 11/6/2018, Revised: 26/6/2018, Accepted for publication: 7/5/2019)