

## تكنولوجيا التشفير الكثيفة القائمة على الاتصالات الكمومية

الملخص: يقدم هذا المقال تقنية التشفير الكثيفة القائمة على الاتصال الكمي ومبادئه الأساسية. تقنية التشفير الكثيف هي بروتوكول اتصال يستخدم الاتصال الكمي لتحقيق نقل معلومات متعددة البت. ومن خلال تحضير الحالات المتشابكة ومعالجة الجسيمات وقياسها، يمكن نقل أجزاء متعددة من المعلومات في أزواج من الجسيمات المتشابكة المشتركة بين الطرفين المتصلين. تقدم المقالة أيضًا مفاهيم تراكب الحالة الكمومية وتحديد الحالة الكمومية، وتشرح بالتفصيل عملية تنفيذ مخططات التشفير الكثيفة القائمة على حالات GHZ. بالإضافة إلى ذلك، ذكر المقال أيضًا أهمية مصادر الضوء الكمومية، والتي يمكن أن تنتج حالات كمومية محددة لتشفير المعلومات ونقلها. يمثل دور أجهزة التشفير وأجهزة فك التشفير الكمومية في تشفير المعلومات إلى حالات كمومية وفك تشفير المعلومات الأصلية. وأخيرًا، يناقش المقال سيناريوهات تطبيق تقنية التشفير الكثيف المعتمدة على الاتصالات الكمومية في شبكات اتصالات الألياف الضوئية والحوسبة الكمومية.

الكلمات المفتاحية: الاتصال الكمي، التشفير الكثيف، تراكب الحالة الكمومية، تحديد الحالة الكمومية، اتصالات الألياف الضوئية.

### Dense Coding Technology based on Quantum Communication

1956220 alatan

Class of 2020, Communication Engineering, College of Electronic and Information Engineering.

**Abstract:** This article introduces the dense coding technique based on quantum communication and its key principles. Dense coding is a communication protocol that utilizes quantum communication for the transmission of multi-bit information. By preparing entangled states and manipulating and measuring particles, it is possible to transmit information of multiple bits in entangled particle pairs shared between the communicating parties. The article also presents the concepts of quantum superposition and quantum state discrimination, and elaborates on the implementation process of dense coding schemes based on GHZ states. Additionally, the importance of quantum light sources is mentioned, as they generate specific quantum states used for information encoding and transmission. Quantum encoders and decoders play a role in encoding information onto quantum states and decoding the original information. Finally, the article discusses the application scenarios of dense coding based on quantum communication in optical fiber communication networks and quantum computing.

المبادئ الأساسية لتقنية التشفير فائق الكثافة المبنية على الاتصال الكمي. 1.

:التشفير الفرعي هو بروتوكول اتصال اقترحه بينيت في عام 1992 [1]. المبادئ الأساسية للبروتوكول هي كما يلي



الشكل 1: رسم تخطيطي لعملية التشفير الكمي الكثيف

لنفترض أن هناك طرفين اتصال قانونيين، وهما أليس وبوب. أولاً، تقوم أليس بإعداد حالة تشابك EPR ، إذا كانت الحالة في الحالة  $|\phi^+\rangle_{AB}$

$$|\phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle). \quad (1-1)$$

تم تحتفظ أليس بالجسيم A وترسل الجسيم B إلى . بهذه الطريقة، يتشارك الطرفان المتصلان في زوج من الجسيمات المتشابكة. نعم، أي عملية إنشاء قناة الاتصال. بعد أن يستقبل بوب الجسيم B، يمكنه اختيار إحدى العمليات الأربع التالية لتشغيل الجسيم

B:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\sigma_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1-1)$$

في التشفير الكمي الكثيف، بعد أن يقوم بوب بتشغيل الجسيم B، ستتغير حالات التشابك للجسيمين A و B إلى:

$$\begin{aligned} I|\phi^+\rangle &= |\phi^+\rangle \\ \sigma_1|\phi^+\rangle &= |\psi^+\rangle \\ \sigma_2|\phi^+\rangle &= |\phi^-\rangle \\ \sigma_3|\phi^+\rangle &= |\psi^-\rangle \end{aligned} \quad (1-2)$$

بعد ذلك، يمرر بوب الجسيم B إلى أليس، وتقوم أليس بقياس الجسيمين الموجودين في يدها لتحديد العملية التي أجراها بوب. إذا اتفق الطرفان مسبقاً على أن الحالات الأربعة تمثل 00 و 01 و 10 و 11 على التوالي، فسيتم إرسال نتيتين من المعلومات بنجاح. هذه العملية هي تشفير كثيف الكم.

## 1.1 تراكب الحالة الكمومية

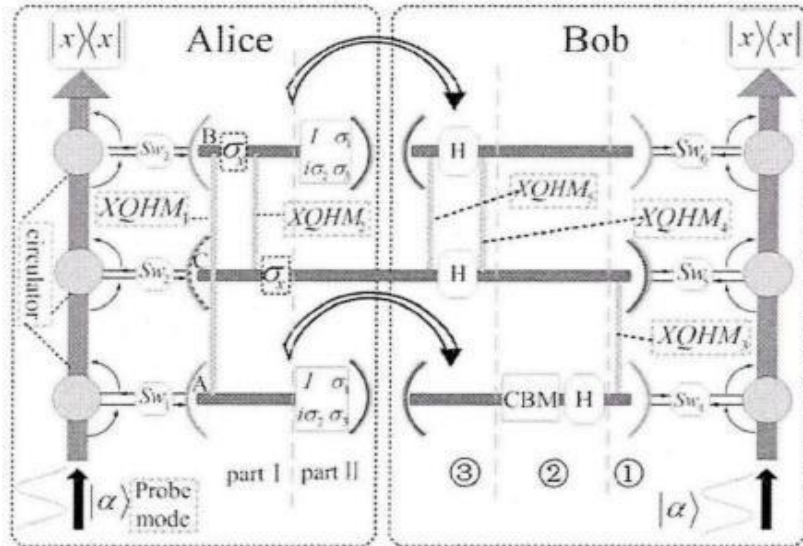
تستخدم تقنية التشفير الكثيف مبدأ تراكب الحالة الكمومية لتحقيق نقل المعلومات متعددة البت. في الاتصالات الكمومية، يسمح تراكب الحالة الكمومية بحمل أجزاء متعددة من المعلومات في وقت واحد على كيوبت واحد. ومن خلال تشفير المعلومات المختلفة في حالات تراكب كمي مختلفة، يمكن نقل المزيد من المعلومات خلال الفاصل الزمني للإرسال.

## 1.2 تحديد الحالة الكمومية

إن تحديد الحالة الكمومية في تقنية التشفير الكثيف يعني أن الطرف المتلقي يحدد بدقة ويفك تشفير الحالة الكمومية المرسلة. ومن خلال القياس الكمي وتكنولوجيا إعادة بناء الحالة الكمومية، يمكن تحويل الحالة الكمومية المنقولة إلى بيانات معلومات قابلة للمعالجة.

## 2. عملية تنفيذ تقنية التشفير الكثيف المعتمدة على الاتصال الكمي

التنفيذ المحدد لمخطط التشفير الكثيف، التشفير الكثيف هو مخطط اتصال كمي، يظهر المبدأ التجريبي للمخطط في الشكل 2؛ في هذا المخطط، يتشارك أليس وبوب في زوج من الجسيمات المتشابكة (حالة GHZ). في التجربة، أجرت أليس العملية في المربع المنقط على اليسار، والذي يتكون من جزأين. أولاً، تستخدم أليس الجسيمات التي تمتلكها لتشفير المعلومات وإكمال تحضير الحالة المتشابكة GHZ خلال الجزء الثاني. بعد ذلك، داخل المربع المنقط على اليمين، يقوم بوب بتنفيذ العمليات 1 و 2 و 3، والتي تسمح لبوب بفك تشفير المعلومات التي قامت أليس بتشفيرها بنجاح في الجسيمات التي تمتلكها.



الشكل 2: رسم تخطيطي للتنفيذ التجريبي للتشفير الكثيف بناءً على حالة GHZ.

من بينها، تمثل H عملية بوابة Hadamard، وتمثل CBM قياس أساس الحالة الذرية، وتمثل عملية XOHM.

التشغيل، XQHM، يمثل عملية XQHM i-th، ويشير Sw إلى مفتاح التحكم البصري i-th

من أجل تحقيق تشفير كثيف، تنفذ أليس واحدة من أربع عمليات على الجسيمات A و B في نفس الوقت:  $\sigma_y$ ،  $\sigma_x$ ،  $\sigma_z$ ، مثل

الجزء الثاني من الشكل 2. هذه العمليات المطبقة على الذرات A و B تطور الحالة الأولية للنظام  $|\Psi\rangle$  0 إلى الأشكال الأربعة التالية

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{1,4} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|100\rangle_{ABC} \pm |111\rangle_{ABC}) \\ |\Psi\rangle_{2,3} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|101\rangle_{ABC} \pm |010\rangle_{ABC}) \\ |\Psi\rangle_{5,8} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|100\rangle_{ABC} \pm |011\rangle_{ABC}) \\ |\Psi\rangle_{6,7} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|001\rangle_{ABC} \pm |110\rangle_{ABC}) \end{aligned} \quad (1-2)$$

[5] وبأخذ هذه العوامل بعين الاعتبار، فإن احتمال نجاح التجربة يبلغ تقريباً

$$P = (1 - 2\%)^3 \times (1 - 6\%) \times (1 - 2.3 \times 10^{-4})^5 \approx 0.8837.$$

هناك نقطتان رئيسيتان في هذه الخطة. أولاً، عندما يقوم بوب بفك تشفير المعلومات، تكون العمليات التي يقوم بها دورية، وهو ما يتوافق مع خصائص أجهزة الكمبيوتر، لأن عمليات الحلقة البسيطة هي الأكثر كفاءة لأجهزة الكمبيوتر. ثانياً، بالإضافة إلى هاتين النقطتين، لهذا الحل مزايا أخرى. في حين أن المبلغ الإجمالي للمعلومات يبقى دون تغيير، فإن هذا الحل يمكن أن يقلل بشكل فعال عدد العقد، وبالتالي تعزيز استقرار عمل الكمبيوتر. على وجه الخصوص، يحل هذا الحل مشكلة أن WNCK لا يمكنه إنتاج سوى عيوب صغيرة الزاوية.

## 2.1 مصدر الضوء الكمي

مصادر الضوء الكمومية هي مصادر ضوئية تعتمد على التأثيرات الكمومية [6] والتي يمكن أن تنتج حالات كمومية محددة، مثل حالات الفوتون المفرد أو أزواج الفوتون المتشابكة. في تكنولوجيا التشفير الكثيف، تلعب مصادر الضوء الكمومية دورًا رئيسيًا، حيث يمكنها تشفير المعلومات على هذه الحالات الكمومية وتحقيق نقل ومعالجة المعلومات متعددة البت.

مصدر الفوتون الواحد هو مصدر ضوئي قادر على إصدار فوتون واحد. إنه يستغل التأثيرات البصرية غير الخطية أو خصائص المواد مثل النقاط الكمومية لتوليد حالات الفوتون الواحد. يمكن لمصدر فوتون واحد أن يصدر فوتونًا خلال فترة زمنية معينة، ويمكن لهذا الفوتون أن يحمل بتًا واحدًا من المعلومات. ومن خلال التحكم في المعلمات مثل وقت الانبعاث وحالة استقطاب الفوتونات، يمكن تشفير المعلومات. مصدر زوج الفوتون المتشابك هو مصدر ضوء يمكن أن ينتج حالة متشابكة. التشابك هو حالة كمومية خاصة يرتبط فيها فوتونان بقوة مع بعضهما البعض، بغض النظر عن المسافة بينهما. يمكن لمصدر زوج الفوتون المتشابك أن ينتج زوجًا من الفوتونات المتشابكة، حيث يؤثر التغير في حالة أحد الفوتون على الفور على حالة الفوتون الآخر. يمكن استخدام علاقة التشابك هذه لتحقيق نقل المعلومات في الاتصالات الكمومية وعمليات البوابة الكمومية في الحوسبة الكمومية.

يعد استقرار وكفاءة مصادر الضوء الكمومية من الاعتبارات المهمة في تقنيات التشفير الكثيفة. من أجل تحقيق تشفير كثيف فعال، يجب أن تكون مصادر الضوء الكمومية قادرة على توليد حالات كمومية محددة بشكل ثابت وأن تتمتع بكفاءة انبعاث عالية. وفي الوقت نفسه، من الضروري أيضًا التحكم في التأثيرات غير الخطية والضوضاء لمصدر الضوء لتقليل الأخطاء والخسائر أثناء نقل المعلومات. في السنوات الأخيرة، أحرز الباحثون تقدمًا كبيرًا في مجال مصادر الضوء الكمومية وطوروا مجموعة متنوعة من مصادر الضوء الكمومية الفعالة والمستقرة. يوفر تطوير مصادر الضوء هذه أساسًا متينًا لتطبيق تقنية التشفير الكثيف. ومع التطوير والتقدم المستمر لتكنولوجيا الكم، سيتم تحسين أداء وموثوقية مصادر الضوء الكمومية بشكل أكبر، مما يوفر المزيد من الفرص والتحديات للتطبيق العملي لتقنية التشفير الكثيف.



## 2.2 التشفير الكمي وفك التشفير الكمي

يعد التشفير الكمي ووحدة فك التشفير الكمي مسؤولين عن تشفير المعلومات المرسل إلى حالة كمية وفك تشفير المعلومات الأصلية. تقوم أجهزة التشفير الكمومية بتعيين أجزاء من المعلومات إلى الحالات الكمومية، في حين تقوم أجهزة فك التشفير الكمومية بالعكس.

تشبه الشبكات الكمومية نماذج التشفير التلقائي الكلاسيكية من حيث أنها عبارة عن تمثيلات رسومية تتكون من مجموعة من العقد المترابطة. في الشبكة الكمومية، تمثل كل عقدة كيوبت، والطبقة الأولى عبارة عن سجل إدخال، والطبقة الأخيرة عبارة عن سجل إخراج. تمثل الحواف في الرسم البياني تحويلات وحدوية تربط الطبقات المجاورة، أي تمرير المدخلات من الطبقة الأولى إلى الطبقة التالية. تتمثل وظيفة التشفير التلقائي في تقليل المسافة بين الطبقة الأولى والطبقة الثانية (الشكل 3 أ).

بالنسبة للدائرة الكمومية التي تحتوي على شبكة التشفير التلقائي، تتم معالجة عقدة الإدخال أولاً باستخدام جزء يسمى "المشفر". ومع ذلك، أثناء هذه العملية، يجب التخلص من بعض المعلومات الموجودة في عقدة الإدخال. يمكننا أن نتخيل القيام بذلك عن طريق تتبع البتات الكمومية التي تمثل هذه العقدة (ممثلة في الشكل 3 ب من خلال أخذ قياسات هذه البتات). نقوم بعد ذلك بإعداد كيوبتات جديدة، وتجهيزها لبعض الحالات المرجعية، واستخدامها لتنفيذ الجزء النهائي من وحدة فك التشفير لإعادة بناء الحالة الأولية للمدخلات. ثم تتم مقارنة النتائج المعاد بناؤها مع الحالة الأولية.

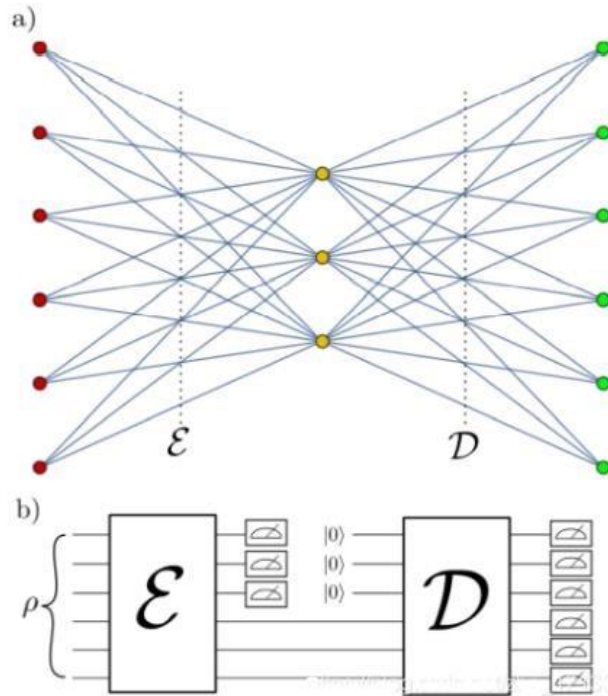


图 3 具有 3 位潜在空间的 6 位自动编码器的图形表示。

3. تكنولوجيا التشفير الكثيفة المعتمدة على الاتصال الكمي لها سيناريوهات تطبيقية محتملة في مجالات متعددة [6]. فيما يلي اثنين من سيناريوهات التطبيق النموذجية:

3.1 شبكة اتصالات الألياف الضوئية: يمكن لتقنية التشفير الكثيف تحسين معدل وقدره نقل المعلومات في شبكات اتصالات الألياف الضوئية. في أنظمة اتصالات الألياف الضوئية التقليدية، يستطيع كل فوتون حمل بت واحد فقط من المعلومات. ولكن من خلال تطبيق تقنيات التشفير الكثيفة، من الممكن تشفير أجزاء متعددة من المعلومات في حالة فوتون واحد ونقل المزيد من المعلومات خلال الفاصل الزمني للإرسال. وهذا يمكن أن يحسن كفاءة نقل المعلومات، ويقلل من تأخير وقت الاتصال، ويدعم نقل البيانات على نطاق واسع والاتصالات عالية السرعة. يساعد تطبيق تقنية التشفير الكثيف في شبكات اتصالات الألياف الضوئية على تلبية متطلبات البيانات المتزايدة وتحسين أداء الشبكة.

3.2 الحوسبة الكمومية: يمكن أيضًا تطبيق تقنية التشفير الكثيف على الحوسبة الكمومية لتحسين استخدام الكيوبتات. تستخدم الحوسبة الكمومية مبادئ ميكانيكا الكم لمعالجة المعلومات، ووحدها الأساسية هي البت الكمي (qubit). في الحوسبة الكمومية التقليدية، يمكن لكل كيوبت أن يحمل فقط بت واحد من المعلومات. ولكن من خلال تقنية التشفير الكثيفة، يمكن حمل أجزاء متعددة من المعلومات في وقت واحد على كيوبت واحد. وهذا يمكن أن يؤدي إلى تسريع الحوسبة الكمومية وتحسين كفاءة الحوسبة. يساعد تطبيق تقنية الترميز الكثيف في الحوسبة الكمومية على الاستفادة الكاملة من الموارد الكمومية وتحسين قوة الحوسبة والقدرة على حل المشكلات المعقدة، وحاليًا شكل مجال الحوسبة الكمومية [8] مسارات تقنية متعددة مثل الموصلية الفائقة، والمصادد الأيونية، والبصريات الكمومية، والتي جمعت عددًا من الشركات المحلية والأجنبية و فرق البحث العلمي مثل D-Wave، و Google، و IBM، و Intel، و Nvidia، و Honeywell، و الأكاديمية الصينية للعلوم، و جامعة العلوم والتكنولوجيا الصينية، و Origin. الكم، وما إلى ذلك، لتعزيز التطور السريع ورفع مستوى التكنولوجيا، وشكلت "الغناء على طريقتك"، أنا على المسرح "منافسة شرسة.

إن سيناريوهات التطبيق النموذجية هذه ليست سوى جزء من تطبيق تقنية التشفير الكثيف في مجال الاتصالات الكمومية، وفي الواقع تتمتع هذه التكنولوجيا أيضًا بمجموعة واسعة من إمكانات التطبيق. على سبيل المثال، يمكن أيضًا تطبيق تقنية التشفير الكثيف في مجالات مثل التشفير الكمي والاستشعار الكمي والشبكات الكمومية لتحسين أمان وحساسية وموثوقية نقل المعلومات. ومع التطوير الإضافي والتوسع في تطبيقات تكنولوجيا الكم، ستظهر تكنولوجيا التشفير الكثيف قيمتها في المزيد من المجالات وسيكون لها تأثير عميق على أساليب الاتصالات والحوسبة المستقبلية.

#### 4. الخلاصة

تتمتع تقنيات التشفير الكثيفة المعتمدة على الاتصالات الكمومية بالقدره على تحسين كفاءة وقدره نقل المعلومات. تستغل هذه التقنية خصائص الحالات الكمومية لحمل أجزاء متعددة من المعلومات في كل فترة زمنية للإرسال. من خلال المفاهيم الأساسية مثل تراكب الحالة الكمومية وتحديد الحالة الكمومية، يمكن لتكنولوجيا التشفير الكثيف تحقيق نقل ومعالجة المعلومات متعددة البت. في عملية التنفيذ، تلعب مصادر الضوء الكمومية دورًا رئيسيًا ويمكن أن تنتج حالات كمومية محددة. وفي الوقت نفسه، يكون التشفير الكمي ووحدة فك التشفير الكمي مسؤولين عن تشفير المعلومات إلى حالات كمومية وفك تشفير المعلومات الأصلية. تتمتع تقنية التشفير الكثيف المعتمدة على الاتصالات الكمومية بحالات تطبيق نموذجية في مجالات شبكات اتصالات الألياف الضوئية والحوسبة الكمومية. في شبكات اتصالات الألياف الضوئية، يمكن لهذه التقنية زيادة معدل نقل المعلومات وقدرتها، وتقليل تأخيرات الاتصال، ودعم نقل البيانات على نطاق واسع والاتصالات عالية السرعة. في الحوسبة الكمومية، يمكن لهذه التكنولوجيا تحسين استخدام الكيوبتات. ومع تطور تكنولوجيا الكم، من المتوقع أن تلعب تكنولوجيا التشفير الكثيف مزايا أكبر في التطبيقات العملية وتعزز المزيد من التطوير في مجالات الاتصالات الكمومية والحوسبة الكمومية.

#### مراجع

- [1] Bennett C H, Wiesner S. Communication via One- and Two-Particle Operators on Einstein-Podolsky-Rosen States[J]. Physical Review Letters, 1992, 69(20): 2881-2884.
- [2] 唐敖庆, 徐元植, 唐敖庆之量子力学[M]. 浙江大学出版社, 2011.
- [3] [https://blog.csdn.net/weixin\\_42017454/article/details/123937426](https://blog.csdn.net/weixin_42017454/article/details/123937426)
- [4] 张雨欣. 量子密集编码的安全性分析[D]. 北京邮电大学, 2020. DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2020.002926.
- [5] [1]孙倩. 基于光学系统的量子逻辑门和量子密集编码[D]. 安徽大学, 2015.
- [6] The interference effects at the Bell-state analyzer showed a high sensitivity on the size and position of the irises. The reason might be that the irises still are within the Rayleigh length of the source. Fresnel diffraction has therefore to be considered R. Chiao (private communication).
- [7] Su S L, Guo Q, Zhu L, Wang H F and Zhang S. Atomic quantum information processing in
- [8] Su S L, Guo Q, Zhu L, Wang H F and Zhang S. Atomic quantum information processing in low-Q cavity in the intermediate coupling region [J. J. Opt. Soc. Am. B 2012, 29: 002827. ↵
- [9] [量子计算密集“上新”，最新成果哪家强？\\_腾讯新闻\(qq.com\)](#) ↵