

مقاله علمی-ترویجی

مروری بر پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی

منیره هوشمند، گروه مهندسی برق، دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)، مشهد، ایران، m.hooshmand@imamreza.ac.ir

چکیده

پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی یکی از مهم‌ترین پروتکل‌های اطلاعات کوانتومی است. در این پروتکل، به کمک درهم‌تنیدگی کوانتومی و کانال کلاسیک، حالت یک ذره کوانتومی بدون پیمایش فاصله فیزیکی از فرستنده به گیرنده منتقل می‌شود. مخابره از راه دور کوانتومی، واحد سازنده پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی، محاسبات کوانتومی و شبکه‌های کوانتومی است. از این رو پس از پیشنهاد ایده‌های اولیه پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی در سال ۱۹۹۳، تلاش‌های بسیاری در مباحث نظری و پیاده‌سازی این پروتکل تاکنون صورت گرفته است. در پژوهش پیش‌رو، پس از معرفی و دسته‌بندی ایده‌های نظری پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی، به بررسی پیاده‌سازی‌های عملی این پروتکل می‌پردازیم. در ادامه الزامات فناوری مورد نیاز به همراه نقاط ضعف و قوت هر کدام ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: تشدید مغناطیسی هسته‌ای، سیستم‌های حالت جامد، فوتون، مخابره از راه دور کوانتومی.

An overview of quantum teleportation protocols

Monireh Houshmand, Electrical Engineering Department, Imam Reza International University, Mashhad, Iran, m.hooshmand@imamreza.ac.ir

Abstract

Quantum teleportation protocol is one of the most important quantum information protocols. In this protocol, with the help of quantum entanglement and the classical channel, the state of a quantum particle is transmitted without traveling the physical distance from the sender to the receiver. Quantum teleportation, is the building block of quantum cryptographic protocols, quantum computing, and quantum networks. Therefore, since the initial ideas of the quantum teleportation protocol were proposed in 1993, many efforts have been made in the theoretical discussions and implementation of this protocol. In the present study, after introducing and classifying the theoretical ideas of quantum communication protocol, we will examine the practical implementations of this protocol. Next, the required technology requirements are presented along with the strengths and weaknesses of each.

Keywords: Nuclear Magnetic Resonance, Solid State Systems, Photon, Quantum Teleportation

در فواصل دور بهره گرفت. از آنجا که مخابره از راه دور کوانتومی با مبنای ارسال اطلاعات کلاسیک تحقق می‌پذیرد، سرعت این نوع مخابره نیز محدود به سرعت نور است. مخابره از راه دور کوانتومی در ابتدا با فوتون‌های منفرد محقق شد اما در ادامه در سیستم‌های ماده‌ای متعدد از قبیل اتم‌ها، یون‌ها، الکترون‌ها و مدارات ابررسانا نیز محقق گردید [۹]. تاکنون مخابره از راه دور کوانتومی در ابعاد بزرگتر از مولکول گزارش نشده است [۱۰]. در پژوهش پیش‌رو پس از معرفی پروتکل اولیه مخابره از راه دور کوانتومی، به معرفی، دسته‌بندی و ارزیابی انواع مشتقات دیگر این پروتکل می‌پردازیم سپس پروژه‌های پیاده‌سازی شده این پروتکل معرفی می‌گردد. در ادامه انواع فناوری‌های قابل استفاده در پیاده‌سازی این پروتکل‌ها به همراه نقاط قوت و ضعف هر کدام معرفی می‌شود.

۲- مروری بر مکانیک کوانتومی

در دنیای کلاسیک همه اطلاعات اعم از حروف و اعداد با مجموعه‌ای از بیت‌ها به کامپیوتر داده می‌شود. هر بیت در هر لحظه مقداری برابر با صفر، یا مقداری برابر با یک دارد. واحد اطلاعات در کامپیوترهای کوانتومی، کیوبیت^۱ (مخفف کوانتوم بیت)، نامیده می‌شود که تحقق عملی آنها می‌تواند بر اساس الکترون‌ها، فوتون‌ها و ... باشد. بر خلاف بیت، کیوبیت‌ها می‌توانند چندین حالت را در یک لحظه اختیار کنند. این خاصیت فیزیکی در مکانیک کوانتومی، برهم‌نهی^۱ نامیده می‌شود. حالت یک کیوبیت با بردار

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \alpha, \beta \in \mathbb{C}, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1,$$

توصیف می‌شود که

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

به‌عنوان مثال فرض کنیم در دنیای کلاسیک، ۳ واحد حافظه داریم که هر کدام توانایی ذخیره یک بیت را دارند. این سه حافظه در کنار هم ۸ حالت، یعنی از اعداد ۰ (۰۰۰) تا عدد ۷ (۱۱۱) را به باینری نمایش خواهند داد که در هر لحظه فقط یکی از این حالت‌ها وجود خواهد داشت. ولی در سیستم‌های کوانتومی در همین سه حافظه که کیوبیت‌ها را ذخیره می‌کند، تمام این ۸ حالت می‌توانند هم‌زمان موجود باشند. به همین علت، ۳ حافظه کوانتومی می‌تواند تمامی ۸ حالت را در یک لحظه محاسبه و پردازش کند. از این خاصیت، به‌عنوان محاسبات موازی نام برده می‌شود. حال اگر یک سیستم کوانتومی با n واحد حافظه در نظر بگیریم، چنین سیستمی، همانند سیستم بالا، می‌تواند 2^n حالت را هم‌زمان داشته و برای همه حالات به‌صورت هم‌زمان محاسبه انجام دهد. اما، وقتی این سیستم مشاهده یا اندازه‌گیری می‌شود، حالت سیستم تغییر کرده و با یک توزیع احتمال مشخص، به یکی از این 2^n حالت سقوط می‌کند.

درهم‌تنیدگی کوانتومی خاصیتی از سیستم کوانتومی با دو یا تعداد بیشتری جز است که در آن اجزا سیستم به یکدیگر جفت شده‌اند، به طوری که یک جز سیستم را بدون در نظر گرفتن کل سیستم نمی‌توان توصیف کرد، حال حتی اگر این اجزا را کیلومترها از یکدیگر دور کنیم، تغییر در یک جز به صورت بلافاصله، در اجزا دیگر نیز تغییر ایجاد می‌کند. تحول هر ذره کوانتومی یا گیت کوانتومی با یک ماتریس یکانی U محقق می‌شود. ماتریس

در سال ۱۹۶۵، گوردون مور^۱، یکی از بنیانگذاران کمیانی اینتل، اظهار کرد تعداد ترانزیستورهای روی یک مدار مجتمع به‌طور تقریبی هر دو سال یک‌بار دو برابر می‌شود. نظریه مور در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی تا حدودی درست بود. اما از ابتدای دهه ۸۰ میلادی و با سرعت گرفتن این پیشرفت‌ها، شبهات و پرسش‌هایی در محافل علمی مطرح شد که این کوچک‌سازی‌ها تا کجا می‌توانند ادامه پیدا کنند؟ کوچک کردن ترانزیستورها و مجتمع کردن آنها در فضای کمتر نمی‌تواند تا ابد ادامه داشته باشد زیرا در حدود ابعاد نانومتری اثرات کوانتومی از قبیل تونل‌زنی الکترونی بروز می‌کنند [۱]. گرچه همیشه فناوری چندین گام بزرگ از نظریه عقب است، بسیاری از دانشمندان در زمینه‌های مختلف به فکر رفع این مشکل تا زمان رشد فناوری به حد مورد نظر افتادند. به این ترتیب بود که برای نخستین بار در سال ۱۹۸۲، ریچارد فاینمن^۲ استاد فیزیک و برنده جایزه نوبل، پیشنهاد کرد که باید محاسبات را از دنیای دیجیتال وارد دنیای جدیدی به نام محاسبات کوانتومی کرد که بسیار متفاوت از قبلی بوده و نه تنها مشکلات گذشته و محدودیت‌های موجود را بر طرف می‌سازد، بلکه افق‌های جدیدی را نیز به این مجموعه اضافه می‌کند. در واقع هدف محاسبات کوانتومی یافتن روش‌هایی برای طراحی دوباره ادوات شناخته شده محاسبات (مانند گیت‌ها و ترانزیستورها) به گونه‌ای است که بتوانند تحت اثرات کوانتومی که در محدوده ابعاد نانومتری و کوچک‌تر بروز می‌کنند، کار کنند. در فیزیک کوانتومی رفتارهای شگفت‌انگیزی از ذرات دیده می‌شود که نسخه متناظر کلاسیکی برای آنها وجود ندارد، از مهم‌ترین آنها می‌توان از محاسبات موازی، اندازه‌گیری احتمالاتی کوانتومی و درهم‌تنیدگی^۳ نام برد [۱]. یافتن روشی کارآمد برای ارسال ذرات کوانتومی بین دو گره در یک شبکه [۳] یک هدف اصلی در علم محاسبات و اطلاعات کوانتومی [۲،۳] است. اینترنت کوانتومی [۴] بستر پردازش اطلاعات نسل بعدی است که نوید مخابره امن و افزایش نمایی سرعت در محاسبات توزیع شده^۴ را می‌دهد. توزیع اطلاعات کوانتومی در فواصل طولانی یک مولفه اصلی برای تحقق این بستر جهانی است. یک روش برای حصول به این هدف، ارسال مستقیم یا جابجایی فیزیکی حالات است. از آنجا که بازدهی ارسال به صورت نمایی با فاصله بین گره‌ها کاهش می‌یابد، در فواصل طولانی، اتلاف‌های شدید این سناریو را غیرعملی می‌کند. در خصوص مخابرات کلاسیک راه حل آسان است. حالت می‌تواند در گره‌های میانی، تقویت شود. همچنین حالت می‌تواند کپی گردد که چنانچه، در ارسال از دست رفت، مجدداً آن را ارسال کرد. اما در مکانیک کوانتومی کپی کردن حالت امکان‌پذیر نمی‌باشد [۵]. برای حل این چالش می‌توان از مخابره از راه دور کوانتومی^۵ بهره گرفت. در مخابره از راه دور کوانتومی، یک حالت کوانتومی نامعلوم با کمک دو پارامتر درهم‌تنیدگی کوانتومی و ارسال اطلاعات کلاسیک از فرستنده به گیرنده بدون طی مسیر منتقل می‌شود. از آنجا که در مخابره از راه دور کوانتومی کیوبیت حاوی اطلاعات بر روی کانال ارسال نمی‌شود، بنابراین امکان حمله دشمن به اطلاعات وجود ندارد. بنابراین از این پروتکل در بسیاری از پروتکل‌های رمزنگاری کوانتومی [۶] می‌توان استفاده کرد. از طرف دیگر، مخابره از راه دور کوانتومی پیش‌نیاز جابجایی در هم‌تنیدگی^۶ [۷] است که به همراه حافظه کوانتومی و تغلیظ در هم‌تنیدگی^۷، تکرارگر^۸ کوانتومی [۸] را تولید می‌کنند که از آن می‌توان برای توزیع در هم‌تنیدگی

U ماتریسی است که معکوس آن با ترانهاده مزدوج آن ماتریس یکسان است. دو گیت مورد استفاده در پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی به شرح زیر است.

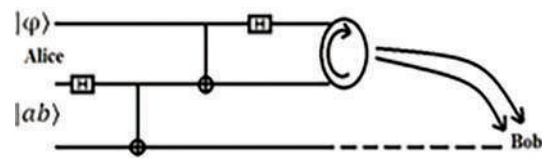
$$H = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

۳- پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی

در این بخش از مقاله ابتدا پروتکل اولیه مخابره از راه دور کوانتومی تشریح شده سپس سایر پروتکل‌های مشتق شده از این پروتکل بیان و ارزیابی می‌شوند.

۳-۱- پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی پایه

در سال ۱۹۹۳ چارلز بنت و همکاران^۶، نخستین پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی را پیشنهاد کردند [۱۱]. در مخابره از راه دور کوانتومی پیشنهادی، یک حالت ناشناخته و دلخواه کوانتومی تک کیوبیتی به نام $|\varphi\rangle$ از آلیس (فرستنده) به باب (گیرنده) بدون طی مسیر، منتقل می‌شود. برای تحقق این هدف، ارتباط کلاسیک و توزیع در هم‌تنیدگی مورد نیاز است. مدار مخابره از راه دور کوانتومی بدین صورت است که یکی از چهار حالت EPR انتخاب شده و بین آلیس و باب منتشر می‌شود. پس از آن آلیس گیت‌هایی را بر کیوبیت‌های خود اعمال کرده و سپس اندازه‌گیری می‌کند و نتایج اندازه‌گیری خود را با استفاده از کانال کلاسیک به باب می‌فرستد. باب با استفاده از اطلاعات کلاسیک ارسالی آلیس، با اعمال عملگر مناسب بر کیوبیت دست خود، حالت $|\varphi\rangle$ را بازسازی می‌کند. جزئیات پروتکل مخابره از راه دور به شرح شکل (۱) است.



شکل ۱: مدار اصلی مخابره از راه دور کوانتومی

در شکل (۱)، فرض کنیم $|ab\rangle = |00\rangle$ است که بر طبق آن خروجی مدار (گیت هادامارد بر کیوبیت اول و سپس گیت CNOT) به صورت $|B_{00}\rangle_{ab} = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$ است. این حالت بین آلیس و باب به اشتراک گذاشته می‌شود به این صورت که کیوبیت نخست آن که با a نشان داده شده، دست آلیس و کیوبیت دوم آن که با b نشان داده شده دست باب قرار می‌گیرد (توزیع در هم‌تنیدگی). سپس آلیس و باب از یکدیگر دور می‌شوند.

حال فرض کنیم حالت نامعلوم تک کیوبیتی $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ قرار است به باب منتقل شود. در این مرحله، آلیس گیت‌های دیگر مدار مخابره از راه دور، گیت CNOT و در ادامه گیت هادامارد را بر کیوبیت اول اعمال می‌کند. در ادامه آلیس بر دو کیوبیت خود در پایه محاسباتی اندازه‌گیری کرده و نتیجه را بر روی کانال کلاسیک برای باب ارسال می‌کند. باب با توجه به جدول از پیش تعیین‌شده‌ای بر کیوبیت دست خود گیت پائولی مناسب را اعمال کرده و بدین ترتیب حالت در دست او به حالت $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ تغییر می‌یابد.

پس از ارائه نخستین طرح مخابره از راه دور کوانتومی، پروتکل‌های

فراوانی با کانال‌های مختلف و تعداد کیوبیت منتقل شده متفاوت ارائه گردید. در [۱۲، ۱۳] پروتکل مخابره از راه دور با کانال حالات GHZ، در [۱۴، ۱۵] بر مبنای کانال سه کیوبیتی، در [۱۶-۱۸] بر مبنای حالات GHZ-Like و در [۱۹] بر مبنای حالات پنج کیوبیتی، ارائه گردید. سپس در [۲۰] و [۲۱] حالات دو کیوبیتی، در [۲۲] حالت دو کیوبیتی و در [۲۳] حالت GHZ منتقل گردید. در ادامه به بررسی انواعی از مخابره از راه دور کوانتومی، مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی و مخابره از راه دور کوانتومی دو طرفه می‌پردازیم.

۳-۲- پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی

در این نوع از مخابره از راه دور علاوه بر فرستنده و گیرنده، کاربر یا کاربران دیگری به‌عنوان کنترلر وجود دارند که تحقق و یا عدم تحقق پروتکل را کنترل می‌کنند. در سال ۱۹۹۸ نخستین طرح مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی را با استفاده از حالت GHZ پیشنهاد شد [۱۵]. در طرح ارائه شده از سوی آنها، گیرنده تنها با اجازه کنترل‌کننده قادر به دریافت حالت مخابره شده است. در ادامه پروتکل‌های کنترلی دیگری با کانال‌های متفاوت در حوزه مخابره از راه دور کوانتومی ارائه گردید [۲۴-۲۹].

۳-۳- مخابره از راه دور کوانتومی دوطرفه

نخستین پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی کنترلی دوطرفه در سال ۲۰۱۰ توسط ژا و همکاران^{۱۷} ارائه شد. در این پروتکل آلیس و باب تحت نظارت چارلی با استفاده از کانال پنج کیوبیتی درهم‌تنیده می‌توانند به‌طور هم‌زمان تک کیوبیت ناشناخته خود را به یکدیگر ارسال کنند. در این پروتکل دو کیوبیت از کانال متعلق به آلیس و دو کیوبیت متعلق به باب است و یک کیوبیت نیز نزد چارلی می‌باشد. با توجه به درهم‌تنیده بودن کیوبیت‌های کانال، با اندازه‌گیری آلیس و باب روی کیوبیت‌های خود تغییرات بر روی کیوبیت‌های طرف مقابل اتفاق خواهد افتاد و همین تغییرات در نهایت باعث منتقل شدن کیوبیت‌های ناشناخته آلیس و باب به یکدیگر می‌شود [۳۰].

سپس در [۳۱-۳۴] با استفاده از حالت شش کیوبیت با بیشینه درهم‌تنیدگی، پروتکل‌های مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی جدیدی پیشنهاد شد. پس از آن با استفاده از کانال پنج کیوبیتی، پروتکل‌های کنترلی دو طرفه دیگری نیز ارائه شد [۳۵-۳۶].

در ادامه پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی دوطرفه‌ای با استفاده از جابجایی در هم‌تنیدگی^{۱۸} ارائه گردید [۳۷]. تفاوت دیگر این پروتکل با نمونه‌های پیشین، غیر کنترلی بودن آن است. وانگ و شو^{۱۹} نیز پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی با استفاده از حالت GHZ-Type ارائه کردند [۳۸].

نقطه مشترک تمامی پروتکل‌های قبلی این است که در همه آنها آلیس و باب هر کدام تنها قادر به ارسال یک کیوبیت ناشناخته به‌طور هم‌زمان هستند. در سال ۲۰۱۵ پروتکل متفاوتی با پروتکل‌های قبلی ارائه شد که در آن طرفین می‌توانند بیش از یک کیوبیت را ارسال کنند. در این سال سنگ مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی با استفاده از هفت کیوبیت درهم‌تنیده ارائه کرد که در آن آلیس قادر به ارسال یک کیوبیت ناشناخته به باب است اما باب می‌تواند دو کیوبیت ناشناخته را به آلیس منتقل کند [۳۹]. پس از آن هونگ^{۲۰} مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی با استفاده از هفت کیوبیت با درهم‌تنیدگی بیشینه ارائه کرد [۴۰]. در این پروتکل پیشنهادی، که یک طرح مخابره از راه دور دوطرفه کنترلی نامتقارن است، یکی از کاربران اندازه‌گیری بر پایه Bell و کاربر

دیگر اندازه‌گیری تک کیوبیتی انجام می‌دهد. علاوه بر آن آلیس قادر به ارسال یک کیوبیت ناشناخته به باب و باب قادر به ارسال دو کیوبیت ناشناخته به آلیس است.

در سال ۲۰۱۶ لی و همکاران^{۴۱} موفق به ارائه یک پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترل‌ی با استفاده از کانال شش کیوبیتی خوشه‌ای شدند [۴۱]. در این پروتکل آلیس می‌تواند دو کیوبیت ناشناخته را به باب و باب تک کیوبیت ناشناخته خود را به آلیس منتقل کند. پس از آن اولین پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترل‌ی با ارسال بیش از یک کیوبیت توسط آلیس و باب به طور همزمان را داشته باشند [۴۲]. این پروتکل با استفاده از یک کانال شش کیوبیتی ارائه شده است. در این پروتکل آلیس و باب می‌توانند به طور همزمان یک حالت دو کیوبیتی EPR را به یکدیگر ارسال کنند. پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه کنترل‌ی با استفاده از یک کانال نه کیوبیتی ارائه گردید [۴۳]. در این کانال بدون محدودیت هر دو کاربر می‌توانند همزمان دو کیوبیت ناشناخته را به یکدیگر ارسال کنند.

در مرجع [۴۴] n حالت EPR بین آلیس و باب به اشتراک گذاشته می‌شود. باب، n گذرگاه خروجی دارد و با توجه به نتیجه اندازه‌گیری آلیس، باب تشخیص می‌دهد در کدام گذرگاه، حالت آلیس، قابل دست‌یابی است. در مقاله [۴۵]، دو پروتکل ارائه شده که در پروتکل نخست، یک حالت تک کیوبیتی که برای فرستنده آشکار است، توسط یک کانال چهار کیوبیتی، همزمان به دو گیرنده مخابره می‌گردد. در پروتکل دوم، توسط یک کانال چهار کیوبیتی، یک حالت تک کیوبیتی نامعلوم به آلیس و یک حالت تک کیوبیتی دیگر به چارلی مخابره می‌گردد. از آنجا که در مکانیک کوانتومی یک حالت نامعلوم کوانتومی را نمی‌توان کپی کرد در پروتکل دوم امکان ارسال یک حالت یکسان به دو گیرنده وجود ندارد. در مرجع [۴۶] پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه برای دسته خاصی از حالات کیوبیتی به کمک کانال $2n+2$ کیوبیتی ارائه می‌گردد و در مرجع [۴۷]، پروتکل برای هر حالت دلخواه n کیوبیتی در کانال نویزی توسعه می‌یابد. در مرجع [۴۸] پروتکلی برای امضای کوانتومی بر مبنای پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی ارائه می‌گردد سپس در [۴۹] پروتکلی برای مخابره از راه دور کوانتومی حالات دو کیوبیتی درهم‌تنیده به کمک کانال GHZ ارائه می‌گردد. در [۵۰]، پروتکلی برای مخابره از راه دور کوانتومی برای هر حالت دلخواه، بر مبنای تبدیل فوریه کوانتومی ارائه گردید. سپس در [۵۱، ۵۲] پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی بر مبنای کانال‌های دو GHZ و پنج کیوبیتی پیشنهاد می‌شود. در [۵۳] پروتکلی با چند گیرنده ارائه می‌گردد که فرستنده می‌تواند در هر بار ارسال حالت، گیرنده خود را انتخاب کند. در [۵۴] پروتکل مخابره از راه دور دوطرفه غیرمتمقارن ارائه می‌شود که دو کار بر حالات دو و سه کیوبیتی به همدیگر مخابره می‌کنند.

۴- پروتکل‌های پیاده‌سازی شده مخابره از راه دور کوانتومی

در این بخش، مهم‌ترین چالش‌ها و دست‌آوردهای پیاده‌سازی مخابره از راه دور کوانتومی ارائه می‌شود. در پیاده‌سازی واقعی، آلیس و باب به منابع محدود دسترسی دارند و بنابراین حالت خروجی لزوماً مشابه حالت ورودی نیست. میزان شباهت حالت ورودی و حالت خروجی با کمیتی به اسم فیدلیتی (F) ارزیابی می‌شود [۵۵].

سوالی که اینجا مطرح می‌شود این است که اگر بخواهیم اطلاعات حالت را تنها با کانال کلاسیک منتقل کرد چه اتفاقی می‌افتد. برای مثال، در یک روش کاملاً کلاسیک آلیس می‌تواند حالت ورودی را در یک پایه اورتونرمال اندازه‌گیری کرده و نتایج را به باب منتقل کند. سپس باب حالت را با اطلاعات به دست آمده بازسازی کند. در مرجع [۵۵] ثابت می‌شود که با کانال کاملاً کلاسیک، در حالت متغیر گسسته بیشینه $F = \frac{2}{3}$ قابل حصول است و ناحیه $\frac{2}{3} < F \leq 1$ به مخابره از راه دور کوانتومی اشاره دارد. به صورت ایده‌آل تحقق آزمایشگاهی مخابره از راه دور کوانتومی باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- ۱- حالت ورودی دلخواه باشد.
- ۲- فرد سوم (وکتور) حالت ورودی را برای آلیس تامین کرده و حالت خروجی باب را تایید کند (از طریق توموگرافی حالت کوانتومی^{۲۳} و یا تخمین فیدلیتی)
- ۳- آلیس بتواند اعضای حالات خانواده Bell را کامل از یکدیگر تمیز دهد.

۴- فیدلیتی مخابره از راه دور از میزان قابل قبولی که با روش‌های اندازه‌گیری-آماده‌سازی^{۲۳} کلاسیک قابل حصول است، بیشتر باشد.

در آزمایشگاه برخی از شرایط بالا ممکن است محقق نشود، به ویژه شرط سوم که منجر می‌شود مخابره از راه دور کوانتومی احتمالاتی داشته‌باشیم وقتی که فقط زیرمجموعه‌ای از حالات Bell قابل دسترسی است و کران بالایی برای احتمال موفقیت وجود دارد. در برابر، اگر شرط ۳ برآورده شود مخابره از راه دور قطعی کوانتومی و در غیر این صورت مخابره از راه دور احتمالاتی خواهیم داشت. کامل‌ترین آزمایش‌های مخابره از راه دور قطعی آنها می‌باشند که با فیدفوروارد فعال^{۲۴} همراه هستند، بدین معنی که نتایج اندازه‌گیری آلیس در پایه Bell به صورت بلادرنگ به باب ارسال شده و یکانی‌های شرطی قبل از تایید وکتور بر حالت خروجی اعمال می‌شوند. در سایر آزمایش‌ها فیدفوروارد در پس پردازش^{۲۵} شبیه‌سازی می‌شود یعنی حالت خروجی مستقیماً با وکتور اندازه‌گیری شده و یکانی‌ها تنها پس از بازسازی توموگرافیک^{۲۶} حالت شبیه‌سازی می‌شود.

در [۶۵]، نخستین پیاده‌سازی عملی مخابره از راه دور کوانتومی با حالت‌های با قطبیت خطی و قطبیت بیضوی محقق گردید. این پیاده‌سازی، یک پیاده‌سازی احتمالاتی با بازدهی آشکارسازی حالات Bell برابر ۲۵٪ است.

سپس در [۵۷]، مخابره از راه دور کوانتومی فوتون‌ها، در فاصله ۶۰۰ متر بر روی رودخانه دانوب در وین با استفاده از فیبر نوری و بر مبنای کیوبیت فوتونی (time bin) محقق گردید. این پیاده‌سازی نیز یک پیاده‌سازی احتمالاتی، با احتمال ۵۰٪ است. کیوبیت‌های time bin در پیاده‌سازی‌های فیبر نوری بسیار استفاده شده‌اند زیرا آنها در برابر تاثیر ناهم‌دوسی در فیبر نوری بسیار پایدار هستند [۹۰].

پیاده‌سازی فضای آزاد از مخابره از راه دور کوانتومی در فاصله ۱۶ کیلومتر در [۵۸] محقق می‌شود. لینک فضای آزاد برای توسعه فاصله انتقال به دلیل جذب اتمسفری پایین آن برای بازه‌های معینی از طول موج به شدت مطلوب است. این پیاده‌سازی بر مبنای روش فیدفوروارد است. متوسط فیدلیتی ۸۹٪ محقق شده است. این پیاده‌سازی امکان آزمایش‌های فضای آزاد را تایید کرده و گام مهمی به سمت کاربردهای مخابرات کوانتومی در سطح

جهانی است. در این پروتکل، اندازه‌گیری قطعی در پایه Bell انجام می‌شود.

در [۵۹]، آزمایشی با استفاده از فید فوروارد فعال تحقق می‌پذیرد. در این آزمایش، از دو لینک اپتیکی در فضای آزاد (کوانتوم و کلاسیک) برای تحقق مخابره از راه دور کوانتومی به فاصله ۱۴۳ کیلومتر بین دو جزیره فناری استفاده می‌شود. در این پیاده‌سازی از روش‌های پیشرفته شامل جفت منبع فوتون قطبیت در هم تنیده، آشکارسازهای تک فوتون با نویز به شدت پایین^{۲۷} و همگام‌سازی ساعت بر مبنای درهم تنیدگی^{۲۸} استفاده می‌شود. متوسط فیدلیتی بیشتر از دو سوم است.

در [۶۰] مخابره از راه دور قطعی متغیر پیوسته بین بسته‌های اتمی ماکروسکوپی در دمای اتاق در فاصله ۰٫۵ متر محقق می‌شود. در هم تنیدگی مورد نیاز برای مخابره از راه دور با نور منتشر شده از یک مجموعه به مجموعه دیگر توزیع می‌گردد.

مخابره از راه دور کوانتومی بر روی فیبر نوری چالشی است زیرا آشکارسازی چند فوتونی که جز اساسی در آزمایش‌های مخابره از راه دور کوانتومی است به دلیل ضریب پایین آشکارسازی آشکارسازهای تک فوتون telecom-band خیلی ناکارآمد است. در [۶۱]، یک پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی بر روی فیبر نوری با استفاده از چهار آشکارساز تک فوتون نانو-سیم ابررسانا^{۲۹} (SNSPD) با آشکارسازی-راندمان بالا است. این SNSPD ها امکان اندازه‌گیری چند فوتونی شدیداً کارآمد را فراهم می‌کنند که نشان می‌دهد فوتون‌ها بر روی فیبر به طول ۱۰۰ کیلومتر با فیدلیتی متوسط ۸۳٪ منتقل شده‌اند. برای سیستم‌های ماده‌ای رکورد برابر ۲۱ متر است [۶۲].

در [۶۳]، آزمایش‌گران گزارش دادند که آنها مخابره از راه دور پاکت‌های موج نور را تا عرض باند 10mhz محقق کردند در حالی که بر هم‌نهی حالات کاملاً حفظ شده‌است.

برای تحقق اینترنت کوانتومی جهانی، بازه مخابره از راه دور کوانتومی بایستی افزایش یابد. یک روش کارآمد برای انجام این، استفاده از سکوهای ماهواره که می‌تواند دو نقطه دور بر روی زمین را با اتلاف کانال به شدت کاهش یافته، به هم متصل کند زیرا بیشتر مسیر انتشار در فضای باز است. در [۶۴] مخابره از راه دور کوانتومی از کیوبیت‌های تک فوتونی بین زمین و یک ماهواره با مدار نزدیک زمین با فاصله ۱۴۰۰ کیلومتر ارائه می‌شود. فیدلیتی برای این تحقق برابر ۸۰٪ و بازدهی برابر ۳۲٪ است.

در [۶۵] یک شبکه توزیع یافته مبتنی بر فیبر نوری ۳۰ کیلومتری در فضایی به طول ۱۲٫۵ کیلومتر پیاده‌سازی می‌شود. این شبکه در برابر نویز با استراتژی‌های پایدارساز فعال^{۳۰} پایدار است. این پیاده‌سازی گامی حیاتی به سمت اینترنت کوانتومی جهانی در دنیای واقعی است.

در [۹۱] پیاده‌سازی مخابره از راه دور کوانتومی قطعی حالت همدوس اپتیکی از طریق کانال‌های فیبر ارائه می‌گردد. دو حالت EPR از طریق یک فیبر ۳ کیلومتری بین فرستنده و گیرنده به اشتراک گذاشته می‌شود. مخابره از راه دور قطعی مودهای اپتیکی بر روی کانال فیبر با طول ۶ کیلومتر محقق می‌گردد. فیدلیتی این طرح ۰٫۶۲ است. در [۹۲] پیاده‌سازی مخابره از راه دور کوانتومی گیت CNOT با فیدلیتی ۷۹٪ محقق می‌شود.

۵- الزامات فناوری

روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی عملی مخابره از راه دور کوانتومی وجود دارد: کیوبیت فوتونی^{۳۱}، تشدید مغناطیسی

هسته‌ای^{۳۲}، مودهای اپتیکی^{۳۳}، مجموعه‌های اتمی^{۳۴}، کیوبیت‌های اتمی به دام افتاده^{۳۵} و سیستم‌های حالت جامد^{۳۶} که به بررسی آنها می‌پردازیم.

۵-۱- کیوبیت‌های فوتونی

پیاده‌سازی عملی یک اندازه‌گیری کامل پایه Bell هنوز چالشی اساسی برای کیوبیت‌های فوتونی است زیرا اپتیک خطی^{۳۷} و آشکارسازی فوتونی^{۳۸} تنها امکان تمایز بین دو حالت از چهار حالت Bell را دارد بنابراین بازدهی حداکثر برابر با ۵۰٪ است [۶۷] [۶۶]. همچنین با استفاده از اپتیک خطی و کیوبیت کمکی می‌توان یک کیوبیت را با بازدهی بهتر آشکارسازی Bell ارسال کرد که در حالتی که به سمت بی‌نهایت میل کند بازده ۱۰۰٪ خواهد شد. این امکان نظری، به وضوح سرباری از منابع کوانتومی ایجاد می‌کند که چالش‌های جدی آزمایشگاهی در پی دارد. از جمله پیاده‌سازی‌های مخابره از راه دور کوانتومی در این فضا می‌توان به [۶۸] و [۶۹] اشاره کرد.

۵-۲- تشدید مغناطیسی هسته‌ای

تمایز کامل بین حالات Bell با مخابره از راه دور NMR در جایی که کیوبیت‌ها اسپین‌های هسته هستند قابل تحقق است. در مرجع [۷۰] اسپین دو هسته کربن (C_1, C_2) و هسته هیدروژن در نظر می‌گیرد. بعد از در هم‌تنیدگی بین C_1 و H تولید شده با بر هم‌کنش‌های اسپین-اسپین، مخابره از راه دور حالت C_2 بر H با استفاده از اندازه‌گیری کامل در پایه Bell بین دو هسته کربن ایجاد می‌شود. از آنجا که مخابره از راه دور NMR به فواصل زیراتمی محدود است، بنابراین مناسب مخابرات کوانتومی نبوده و تنها به عنوان زیرروالی در محاسبات کوانتومی NMR استفاده می‌شود.

۵-۳- حالات اپتیکی

اولین و ساده‌ترین روش تمایز بین حالات Bell به کمک متغیرهای پیوسته و مودهای اپتیکی به دست می‌آید. نسخه متغیر پیوسته از این اندازه‌گیری می‌تواند به سادگی در اپتیک خطی با استفاده از یک شکافنده ذره متوازن و دو آشکارساز homodyne conjugate در پورت‌های خروجی محقق شود. هر دو میدان دید شکافنده پرتو^{۳۹} و بازدهی کوانتومی هموداین می‌توانند به شدت بالا بوده بنابراین آشکارسازی نهایی می‌تواند به بازدهی ۱۰۰٪ برسد. مخابره از راه دور متغیر پیوسته تمامی شرایط چهارگانه غیر از حالت دلخواه کوانتومی را محقق می‌کند، زیرا در نتیجه فضای هیلبرت بی‌نهایت بعدی، بایستی حالت به الفبای خاصی متعلق باشد. اولین اندازه‌گیری با مودهایی اپتیکی، الفبایی با حالات همدوس^{۴۰} با انرژی ثابت مدوله شده با فاز^{۴۱} در نظر می‌گیرد که به فیدلیتی حدود ۵۸٪ می‌رسد [۴۹]. متأسفانه فیدلیتی مخابره از راه دورهای CV نمی‌تواند به ۱۰۰٪ برسد زیرا سیستم‌های CV امکان تولید حالت در هم‌تنیده ماکزیمم با منابع محدود را نمی‌دهد. حالت‌های واقعی EPR، با فشرده‌سازی خوب ولی محدود می‌توانند با تولید دو حالت فشرده تک حالتی از طریق down-conversion (برای مثال در اسیلاتورهای پارامتری اپتیکی) و تلفیق آنها بر روی یک شکافنده پرتو محقق می‌شود. رکورد فعلی برای فیدلیتی متغیرهای پیوسته، برابر با ۸۳٪ است [۷۱].

برای غلبه بر محدودیت‌های در نتیجه فشرده‌سازی محدود، مخابره از راه دور کوانتومی متغیر پیوسته از طریق فرمول‌بندی هایبرید^{۴۲} با متغیر گسسته ترکیب می‌شود. در مرجع [۷۲] مخابره از راه دور کوانتومی قطعی یک کیوبیت فوتونی با اعمال یک تله پورتر عریض باند^{۴۳} متغیر پیوسته به حالت‌های موقت یک کیوبیت bin-time محقق می‌شود. چنین رهیافتی به حل

همزمان آشکارسازی کامل حالات Bell (در نتیجه متغیرهای پیوسته) و همچنین رسیدن به فیدلیتی بالای مخابره از راه دور (در نتیجه متغیرهای گسسته) می‌پردازد. با استفاده از سطوح متوسط فشرده‌سازی می‌توان به فیدلیتی بالای ۸۰٪ رسید. مودهای اپتیکی گزینه‌های مناسبی برای فناوری‌های مخابرات به دلیل استفاده از آشکارسازهای هوموداین با عملکرد بالا و بخش‌هایی همانند مدولاتورهای الکترواپتیکی^{۴۴} (EOM) استفاده شده برای تولید ورودی و اندازه‌گیری خروجی، هستند.

۴-۵- مجموعه‌های اتمی

مخابره از راه دور کوانتومی ممکن است بین سیستم‌های کوانتومی با طبیعت مختلف برای مثال بین نور و ماده تحقق پذیرد. مرجع [۵۱] نخستین آزمایشی بود که این ویژگی را با مخابره از راه دور حالات همدوس یک مود اپتیکی به اسپین جمعی یک مجموعه اتم متشکل از حدود اتم کلسیم نشان داد. از آنجا که اجزای اسپین اتمی جمعی می‌تواند با عملگرهای quadrature توصیف شود این طرح، یک طرح مخابره از راه دور متغیر پیوسته است. این آزمایش در [۶۰]، به مخابره از راه دور قطعی ماده به ماده بین دو مجموعه از اتم کلسیم با استفاده از برهم کنش چهار موجی مخلوط توسعه می‌یابد. فیدلیتی این پروتکل بیشتر از ۵۵٪ است.

مخابره از راه دور نور به ماده در متغیرهای گسسته و با استفاده از مجموعه‌های اتمی سرد محقق شده است. این امر برد و فیدلیتی را افزایش می‌دهد اما پروتکل را به دلیل بازدهی آشکارسازی Bell که برابر با ۵۰٪ است احتمالاتی می‌کند. در [۷۳] یک کیوبیت قطبیت در فیبر به کیوبیت اتمی جمعی تولید شده از دو مجموعه سرد از اتم روبودیوم به فاصله ۷ متر مخابره می‌شود. فیدلیتی این مخابره برابر ۷۸٪ است.

۵-۵- کیوبیت‌های تله اتمی

مخابره از راه دور کیوبیت قطعی می‌تواند در فناوری یون‌های به تله افتاده با ارضا تمامی شرایط چهارگانه محقق گردد [۷۰]. حتی اگر این فواصل خیلی محدود باشد به دلیل برهم کنش‌های کولنی برد کوتاه، زمان‌های ذخیره‌سازی در این سیستم‌ها بسیار بلند است. این امر، آنها را حافظه‌ی کوانتومی خوب برای استفاده از مخابره از راه دور به عنوان زیرروال یک محاسبه کوانتومی می‌کند.

۶-۵- سیستم‌های حالت جامد

مخابره از راه دور احتمالاتی نور به ماده می‌تواند بین کیوبیت‌های فوتونی و حافظه‌های کوانتومی حالت جامد متشکل از نقاط کوانتومی^{۴۵} (QD) و یا کریستال‌های rareearth doped محقق شود. اولین آزمایش [۷۴] یک کیوبیت فرکانس فوتونی را به اسپین الکترون یک نقطه کوانتومی شارژ شده در فاصله ۵ متر با فیدلیتی ۷۸٪ مخابره کرد. نتایج سایر مخابره از راه دورها در سیستم‌های حالت جامد، از قبیل کیوبیت قطبیت به کریستال، کیوبیت‌های ابررسانا بر روی تراشه و مراکز خالی نیتروژن در الماس در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

۷-۵- مقایسه فناوری‌های مخابره از راه دور کوانتومی

واضح است که سیستم و یا فناوری کوانتومی ایده‌آلی وجود ندارد که بتواند در تمامی پارامترها برتری داشته باشد. بهترین نامزد با توجه به کاربرد خاص مشخص می‌شود. ترکیب‌سازی‌های مناسب این نامزدها با زیرساخت‌ها و روش‌های سازگار، ممکن است بهترین گزینه‌ها برای مخابره از راه دور آینده و کاربردهایشان باشد. سیستم‌های حالت جامد، با رهیافت مدار QED^{۴۶} برای مخابره از راه دور برد-کوتاه (کمتر از یک متر) به‌عنوان زیرروال برای محاسبات کوانتومی بهترین گزینه هستند. به‌ویژه کیوبیت‌های transom ابررسانا [۷۵] هر دو معیار قطعیت و فیدلیتی بالا را بر

روی یک تراشه محقق می‌کنند و همچنین پیاده‌سازی بی‌درنگ فیدفوروارد که در تراشه‌های فوتونی چالشی هستند را محقق می‌کنند. آنها همچنین ساختار مقیاس‌پذیرتر نسبت به فناوری موجود در مقایسه با رهیافت‌های قدیمی‌تر از قبیل یون‌های به دام افتاده ایجاد می‌کنند. [۷۶] در حال حاضر تنها نقطه ضعف این سیستم‌ها، زمان کوهرنس کوتاه آنها (کمتر از ۱۰۰ میکروثانیه) است. این مشکل با تجمیع مدار QED با حافظه‌های کوانتومی مجموعه اسپین که می‌تواند زمان ناهمدوسی بسیار طولانی ایجاد کنند حل می‌شود. مخابره از راه دور کوانتومی در فواصل حدود چند کیلومتر می‌تواند با مودهای اپتیکی محقق شود [۶۳] [۴۹]. آزمایش‌ها می‌توانند از ابعاد روی میز تا پیاده‌سازی‌های با برد متوسط در فیبر و یا فضای آزاد محقق شوند و پتانسیل ترکیب با حافظه‌های کوانتومی را نیز دارند. فواصل بلندتر ولی با نرخ پایین‌تر ممکن است با رهیافت ترکیبی [۷۲] یا با توسعه تکرارگرهای کوانتومی بر مبنای عملگرهای غیر گوسی محقق شوند. [۷۷] برای فواصل طولانی (بزرگتر از ۱۰۰ کیلومتر) کیوبیت‌های قطبیت (به دلیل اتلاف پایین و پایداری بیشتر در برابر ناهمدوسی کانال) بهترین حامل‌ها بر روی فیبرهای طولانی و یا لینک‌های فضای آزاد هستند اما به دلیل عدم امکان تمایز قطعی بین حالات Bell، مخابره از راه دور را احتمالاتی می‌کنند. در حالیکه مخابره از راه دور کوانتومی و جایجایی در هم تنیدگی برای مواردی از قبیل تغلیظ در هم تنیدگی و رمزنگاری کوانتومی قابل قبول هستند اما وضعیت برای مخابرات کوانتومی که اطلاعات کوانتومی لازم است کامل حفظ شود فرق می‌کند. با پذیرش طبیعت احتمالاتی، پیاده‌سازی‌های مبتنی بر ماهواره قابل تحقق در شرایط فعلی است [۶۴].

استفاده از مخابره کوانتومی به‌عنوان واحد سازنده یک شبکه کوانتومی مقیاس‌پذیر شدیداً به یکپارچگی آن با حافظه کوانتومی بستگی دارد. توسعه حافظه کوانتومی نه تنها منجر به توزیع در هم‌تنیدگی در یک شبکه و مخابره کوانتومی از طریق مخابره از راه دور کوانتومی می‌شود بلکه همچنین امکان پردازش همدوس اطلاعات کوانتومی ذخیره شده را نیز فراهم می‌کند.

از این زاویه دید، بسته‌های اتمی برای تبدیل کارآمد نور به ماده شان و زمان ذخیره‌سازی چند میلی ثانیه آنها جذاب هستند [۷۸]. زمان ذخیره‌سازی آنها، می‌تواند به ۱۰۰ میلی ثانیه ارسال نور که در ابعاد جهانی لازم است برسد. پیشرفت‌های نویدبخش امروزه مربوط به حالات جامد است که حافظه‌های کوانتومی مجموعه اسپین‌ها یکپارچگی مستقیم با ساختار مقیاس‌پذیر مدار QED دارد. اینترنت کوانتومی احتمالاً بر مبنای مخابرات اپتیکی کوانتومی فاصله بلند که با گره‌های حالت جامد برای پردازش اطلاعات کوانتومی ترکیب شده است خواهد بود. دست‌آوردهای قابل حصول با زیرساخت‌های و فناوری‌های موجود برای مخابره از راه دور کوانتومی در جدول (۱) خلاصه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی یکی از مهم‌ترین پروتکل‌های مخابرات کوانتومی است. در این پروتکل حالت یک ذره کوانتومی، بدون پیمایش فاصله فیزیکی به کمک در هم‌تنیدگی توزیع شده و مخابره اطلاعات کلاسیک منتقل می‌شود. پس از ارائه نخستین پروتکل مخابره از راه دور کوانتومی که در آن حالت یک ذره تک کیوبیتی به کمک کانال دو کیوبیتی EPR مخابره می‌گردد پروتکل‌های مخابره از راه دور کوانتومی متنوعی بر مبنای کانال به اشتراک گذاشته شده، تعداد کیوبیت حالت منتقل شده، کنترلی

جدول ۱: انواع فناوری‌های کوانتومی برای تحقق مخابره از راه دور کوانتومی و ویژگی‌های آنها

فاصله	فیدلیتی	بازدهی	فناوری کوانتومی
143 km	۸۳٪	$\leq 50\%$	قطبیت [79] [57] [80]
1400km	۸۰٪	۳۲٪	قطبیت [64]
6km فیبر	۸۱٪	۲۵٪	Time-bins [69] [81] [82]
بر روی تراشه	۸۹٪	۱/۲۷	Dual-rails on chip [83]
بر روی میز	۵۷٪	۱/۳۲	Spin-orbital qubits [84]
یک آنگستروم	۹۰٪	۱۰۰٪	[70]
12m	۸۳٪	۱۰۰٪	متغیر پیوسته
بر روی میز	۸۰٪	۱۰۰٪	هایبرید [۷۲]
بر روی میز	۵۸٪	۱۰۰٪	نور به ماده متغیر پیوسته (داغ) [۵۱]
0.5m	۵۵٪	۱۰۰٪	ماده به ماده متغیر پیوسته (داغ) [۶۰]
7m فیبر	۷۸٪	۵۰٪	نور به ماده متغیر گسسته (سرد) [۸۵]
150m فیبر	۸۸٪	۵۰٪	ماده به ماده متغیر گسسته (سرد) [۸۶]
5μm	۸۳٪	۱۰۰٪	یون‌های به تله افتاده [۷۶]
1m	۹۰٪	۲۵٪	یون‌های به تله افتاده و حامل‌های فوتونی [۸۷]
21m فیبر	۸۸٪	۲۵٪	اتم‌های خنثی در کاواک نوری [۶۱]
5m	۷۸٪	۲۵٪	فرکانس کیوبیت به نقطه کوانتومی [۷۴]
24.8m فیبر	۸۹٪	۲۵٪	کیوبیت قطبیت به کریستال [۸۸]
بر روی تراشه 6mm	۷۷٪	۱۰۰٪	کیوبیت‌های ابررسانا بر روی تراشه [۷۵]
3m	۸۸٪	۱۰۰٪	مراکز خالی نیتروژن در الماس [۸۹]

- 4 Distributed Computation
- 5 Quantum teleportation
- 6 Entanglement Swapping
- 7 Entanglement Distillation
- 8 Repeater
- 9 Qubit
- 10 Superposition
- 11 Bennet et al.
- 12 Zha et al.
- 13 Entanglement Swapping
- 14 Wang and Shu

بودن یا نبودن، یک‌طرفه یا دوطرفه بودن پروتکل و ... پیشنهاد شده‌است. همچنین این پروتکل در فناوری‌های متفاوت از قبیل و محقق شده‌است. در پژوهش انجام شده مروری بر انواع پروتکل‌ها و پیاده‌سازی‌های آنها داشته و نقط ضعف و قوت هر کدام ارائه شده‌است.

پی‌نوشت‌ها

- 1 Gordon Moore
- 2 Richard Feynman
- 3 Entanglement

- Physics 50.10 (2011): 3225.
- [15] Karlsson, Anders, and Mohamed Bourennane. "Quantum teleportation using three-particle entanglement." *Physical Review A* 58.6 (1998): 4394.
- [16] Tsai, Chia-Wei, and Tzonelih Hwang. "Teleportation of a pure EPR state via GHZ-like state." *International Journal of Theoretical Physics* 49.8 (2010): 1969-1975.
- [17] Nandi, Kaushik, and Chandan Mazumdar. "Quantum teleportation of a two qubit state using GHZ-like state." *International Journal of Theoretical Physics* 53.4 (2014): 1322-1324.
- [18] K. Yang, L. Huang, W. Yang, F. Song, "Quantum teleportation via GHZ-like state" *Int. J. Theor. Phys.* 48 (2009) 516.
- [19] Muralidharan, Sreraman, and Prasanta K. Panigrahi. "Perfect teleportation, quantum-state sharing, and superdense coding through a genuinely entangled five-qubit state." *Physical Review A* 77.3 (2008): 032321.
- [20] G. Rigolin, "Quantum teleportation of an arbitrary two-qubit state and its relation to multipartite entanglement", *Phys. Rev.A* 71 (2005) 032303.
- [21] S. Q. Tang, C. J. Shan, X. X. Zhang, "Quantum teleportation of an unknown two-atom entangled state using four-atom cluster state" *Int. J. Theor. Phys.* 49 (2010) 1899.
- [22] D. Tian, Y. Tao, M. Qin, "Teleportation of an arbitrary two-qudit state based on the non-maximally four-qudit cluster state" *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*. 51 (2008) 1523.
- [23] W. B. Cardoso, "Teleportation of GHZ-states in QED-cavities without the explicit Bell-state measurement", *Int. J. Theor. Phys.* 47 (2008) 977.
- [24] Yang, Chui-Ping, and Siyuan Han. "A scheme for the teleportation of multiqubit quantum information via the control of many agents in a network." *Physics Letters A* 343.4 (2005): 267-273.
- [25] Deng, Fu-Guo, et al. "Symmetric multiparty-controlled teleportation of an arbitrary two-particle entanglement." *Physical Review A* 72.2 (2005): 022338.
- [26] Wang, Ya-Hong, and He-Shan Song. "Preparation of partially entangled W state and deterministic multi-controlled teleportation." *Optics Communications* 281.3 (2008): 489-493.
- [27] Wang, Xin-Wen, Yu-Huan Su, and Guo-Jian Yang. "Controlled teleportation against uncooperation of part of supervisors." *Quantum Information Processing* 8.4 (2009): 319-330.
- [28] Tian-Yin, Wang, and Wen Qiao-Yan. "Controlled quantum teleportation with Bell states." *Chinese Physics B* 20.4 (2011): 040307.
- [29] Song-Song, Li, et al. "Controlled teleportation using four-particle cluster state." *Communications in Theoretical Physics* 50.3 (2008): 633.
- [30] Xin-Wei, Zha, Song Hai-Yang, and Ma Gang-Long. "Bidirectional swapping quantum controlled teleportation based on maximally entangled five-qubit state." *arXiv preprint arXiv:1006.0052* (2010).
- [31] Yan, An. "Bidirectional controlled teleportation via six-qubit cluster state." *International Journal of Theoretical Physics* 52.11 (2013): 3870-3873.
- [32] Sun, X. M., and X. W. Zha. "A scheme of bidirectional quantum controlled teleportation via six-qubit maximally entangled state." *Acta Photonica Sin* 48 (2013): 1052-1056.
- [33] Duan, Ya-Jun, and Xin-Wei Zha. "Bidirectional quantum controlled teleportation via a six-qubit entangled state." *International Journal of Theoretical Physics* 53.11 (2014): 3780-3786.
- [34] Chen, Yan. "Bidirectional quantum controlled teleportation by using a genuine six-qubit entangled state." *International Journal of Theoretical Physics* 54.1 (2015): 269-272.
- [33] Zha, Xin-Wei, et al. "Bidirectional quantum controlled teleportation via five-qubit cluster state." *International Journal of Theoretical Physics* 52.6 (2013): 1740-1744.
- [34] Li, Yuan-hua, and Li-ping Nie. "Bidirectional controlled teleportation by using a five-qubit composite GHZ-Bell state." *International Journal of Theoretical Physics* 52.5 (2013): 1630-1634.
- [35] Shukla, Chitra, Anindita Banerjee, and Anirban Pathak. "Bidirectional controlled teleportation by using 5-qubit states: a generalized view." *International Journal of Theoretical Physics* 52.10 (2013): 3790-3796.
- [36] Li, Yuan-Hua, et al. "Bidirectional controlled quantum teleportation and secure direct communication using five-qubit entangled state." *Quantum information processing* 12.12 (2013): 3835-3844.
- [37] Sh. Hassanpour, M. Houshmand, "Bidirectional quantum controlled teleportation by using EPR states and entanglement swapping", In 23th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), (2015).
- 15 Sang
16 Hong
17 Zha et al.
18 Entanglement Swapping
19 Wang and Shu
20 Sang
21 Li et al.
22 Quantum State Tomography
23 Measure-prepare
24 Active Feed-Forward
25 Post Processing
26 Tomographic
27 Ultra-low-noise Single-photon Detector
28 Entanglement-assisted Clock Synchronization
29 Superconducting Nanowire Single-photon Detectors
30 Active Stabilization
31 Photonic Qubit
32 Nuclear Magnetic Field
33 Optical Modes
34 Atomic Ensembles
35 Trapped Atomic Qubit
36 Solid State System
37 Linear Optics
38 Photonic Detection
39 Beam Splitter
40 Coherent
41 Fixed Energy Phase-modulated Coherent States
42 Hybrid Formulation
43 Broad-Band
44 Electro-optical Modulator
45 Quantum Dot
46 Quantum Electrodynamics

مراجع

- [1] Nielsen, Michael A., and Isaac Chuang. "Quantum computation and quantum information." 558-559 (2002).
- [2] Spiller, Timothy P., et al. "An introduction to quantum information processing: applications and realizations." *Contemporary Physics* 40.7-436 (2005) 46.6
- [3] Yurke, Bernard, and John S. Denker. "Quantum network theory." *Physical Review A* 14.19 (1984) 29.3
- [4] Kimble, H. Jeff. "The quantum internet." *Nature* (2008) 453.7198 .1023
- [5] Wootters, William K., and Wojciech H. Zurek. "A single quantum cannot be cloned." *Nature* 802-803 (1982) 299.5886
- [6] Gisin, Nicolas, et al. "Quantum cryptography." *Reviews of modern physics* 145 (2002) 74.1
- [7] Zukowski, Marek, et al. "Event-ready-detectors "Bell experiment via entanglement swapping". *Physical Review Letters* (1993) 71 .4287-4290
- [8] Briegel, H-J, et al. "Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication." *Physical Review Letters* 59.32 (1998) 81.26
- [9] Pirandola, Stefano, et al. "Advances in quantum teleportation." *Nature photonics* 6.41 (2015) 9.10
- [10] Deutsch, David; Hayden, Patrick 16) March. (2017) *How Quantum Teleportation Actually Works*. "Proceedings of the Royal Society of London, Series A." 1759 (1999) 456.
- [11] C. H. Bennet, G. Brassard, C. Crepeau, R. Jozsa, A. Peres, W. K. Wootters, "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels" *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 1895.
- [12] Agrawal, Pankaj, and Arun Pati. "Perfect teleportation and superdense coding with W states." *Physical Review A* 74.6 (2006): 062320.
- [13] B. S. Shi, A. Tomita, "Teleportation of an unknown state by W state" *Phys. Lett. A* 296 (2002).
- [14] Nie, Yi-you, et al. "Perfect teleportation of an arbitrary three-qubit state by using W-class states." *International Journal of Theoretical*

- tion." *Nature* 549.7670 (2017): 70.
- [65] Sun, Qi-Chao, et al. "Quantum teleportation with independent sources and prior entanglement distribution over a network." *Nature Photonics* 10.10 (2016): 671.
- [66] Braunstein, Samuel L., and A. Mann. "Measurement of the Bell operator and quantum teleportation." *Physical Review A* 51.3 (1995): R1727.
- [67] Weinfurter, Harald. "Experimental Bell-state analysis." *EPL (Europhysics Letters)* 25.8 (1994): 559.
- [68] Calsamiglia, John, and Norbert Lütkenhaus. "Maximum efficiency of a linear-optical Bell-state analyzer." *Applied Physics B* 72.1 (2001): 67-71.
- [69] Marcikic, I., De Riedmatten, H., Tittel, W., Zbinden, H. & Gisin, N. Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths. *Nature* 421, 509–513 (2003).
- [70] Nielsen, Michael A., Emanuel Knill, and Raymond Laflamme. "Complete quantum teleportation using nuclear magnetic resonance." *Nature* 396.6706 (1998): 52.
- [71] Yukawa, M., Benichi, H. & Furusawa, A. High-fidelity continuous-variable quantum teleportation toward multistep quantum operations. *Phys. Rev. A* 77, 022314 (2008).
- [72] Takeda, Shuntaro, et al. "Deterministic quantum teleportation of photonic quantum bits by a hybrid technique." *Nature* 500.7462 (2013): 315.
- [73] Chen, Yu-Ao, et al. "Memory-buil-in quantum teleportation with photonic and atomic qubits." *Nature Physics* 4.2 (2008): 103.
- [74] Gao, W. B., et al. Quantum teleportation from a propagating photon to a solid-state spin qubit. *Nature Comm.* 4, 1 (2013).
- [75] L. Steffen, L., et al. Deterministic quantum teleportation with feed-forward in a solid state system. *Nature* 500, 319 (2013).
- [76] Barrett, M. D., et al. Deterministic quantum teleportation of atomic qubits. *Nature*.(2004) 737, 429
- [77] Eisert, J., Browne, D. E., Scheel, S & Plenio, M. B. Distillation of continuous-variable entanglement with optical means. *Annals of Physics*.(2004) 431-458, 311
- [78] Simon, C., et al. Quantum memories. A review based on the European Integrated Project "Qubit Applications" QAP. (*Eur.Phys.J.D* (2010) 1, 58
- [79] Bouwmeester, Dik, et al. Experimental quantum teleportation. *Nature* 575 : (1997) 390.6660
- [80] Yin, Juan, et al. Quantum teleportation and entanglement distribution over-100 kilometre free-space channels. *Nature* 488.7410 :185 : (2012)
- [81] De Riedmatten, Hugues, et al. Long distance quantum teleportation in a quantum relay configuration. *Physical Review Letters* 92.4 :047904 : (2004)
- [82] Landry, Olivier, et al. Quantum teleportation over the Swisscom telecommunication network. *JOSA B* 398-403 : (2007) 24.2
- [83] Metcalf, Benjamin J., et al. Quantum teleportation on a photonic chip. *Nature Photonics* 770 : (2014) 8.10
- [84] Wang, Xi-Lin, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon. *Nature* 518.7540 (2015): 516.
- [85] Chen, Y.-A., et al. Memory-buil-in quantum teleportation with photonic and atomic qubits. *Nature Phys.* 4, 103 (2008).
- [86] Bao, Xiao-Hui, et al. "Quantum teleportation between remote atomic-ensemble quantum memories." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109.50 (2012): 20347-20351.
- [87] Olmschenk, S., et al. Quantum teleportation between distant matter qubits. *Science* 323, 486 (2009).
- [88] Bussi eres, F., et al. Quantum teleportation from a telecomwavelength photon to a solid-state quantum memory. *Nature Photonics* 8, 775–778 (2014).
- [89] Pfaff, W., et al. Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits. *Science* 345, 532 (2014).
- [90] Xia, Xiu-Xiu, et al. "Long distance quantum teleportation." *Quantum Sci. Technol* 3 (2018): 014012.
- [91] Huo, Meiru, et al. "Deterministic quantum teleportation through fiber channels." *Science Advances* 4.10 (2018): eaas9401.
- [92] Chou, Kevin S., et al. "Deterministic teleportation of a quantum gate between two logical qubits." *Nature* 561.7723 (2018): 368.
- [38] Wang, Jin-Wei, and Lan Shu. "Bidirectional quantum controlled teleportation of qudit state via partially entangled GHZ-type states." *International Journal of Modern Physics B* 29.18 (2015): 1550122
- [39] Zhang, Da, et al. "Bidirectional and asymmetric quantum controlled teleportation via maximally eight-qubit entangled state." *Quantum Information Processing* 14.10 (2015): 3835-3844.
- [40] Sang, Ming-huang. "Bidirectional quantum controlled teleportation by using a seven-qubit entangled state." *International Journal of Theoretical Physics* 55.1 (2016): 380-383.
- [41] Li, Yuan-hua, et al. "Asymmetric bidirectional controlled teleportation by using six-qubit cluster state." *International Journal of Theoretical Physics* 55.6 (2016): 3008-3016.
- [42] Hassanpour, Shima, and Monireh Houshmand. "Bidirectional teleportation of a pure EPR state by using GHZ states." *Quantum Information Processing* 15.2 (2016): 905-912.
- [43] Li, Yuan-Hua, and Xian-Min Jin. "Bidirectional controlled teleportation by using nine-qubit entangled state in noisy environments." *Quantum Information Processing* 15.2 (2016): 929-945.
- [44] Ishizaka, Satoshi, and Tohya Hiroshima. "Quantum teleportation scheme by selecting one of multiple output ports." *Physical Review A* 79.4 (2009): 042306.
- [45] Yu, Yan, Xin Wei Zha, and Wei Li. "Quantum broadcast scheme and multi-output quantum teleportation via four-qubit cluster state." *Quantum Information Processing* 16.2 (2017): 41.
- [46] Zadeh, Mohammad Sadegh Sadeghi, Monireh Houshmand, and Hossein Aghababa. "Bidirectional Quantum Teleportation of a Class of n-Qubit States by Using (2 n+ 2)-Qubit Entangled States as Quantum Channel." *International Journal of Theoretical Physics* 57.1 (2018): 175-183.
- [47] Sadeghi-Zadeh, Mohammad Sadegh, et al. "Bidirectional quantum teleportation of an arbitrary number of qubits over noisy channel." *Quantum Information Processing* 18.11 (2019): 1-19.
- [48] Zheng, Tao, Yan Chang, and Shi-Bin Zhang. "Arbitrated quantum signature scheme with quantum teleportation by using two three-qubit GHZ states." *Quantum Information Processing* 19.5 (2020): 1-15.
- [49] Verma, Vikram. "Bidirectional quantum teleportation of two-qubit entangled state by using G-state as a quantum channel." *Physica Scripta* 95.11 (2020): 115101.
- [50] Cao, Zhengwen, et al. "Quantum teleportation protocol of arbitrary quantum states by using quantum Fourier transform." *International Journal of Theoretical Physics* 59.10 (2020): 3174-3183.
- [51] Verma, Vikram. "Bidirectional quantum teleportation by using two GHZ-states as the quantum channel." *IEEE Communications Letters* 25.3 (2020): 936-939.
- [52] Yuan, Hao, and Zhanjun Zhang. "Optimizing the scheme of bidirectional controlled quantum teleportation with a genuine five-qubit entangled state." *Modern Physics Letters A* 35.36 (2020): 2050301.
- [53] Bolokian, Mohammad, et al. "Multi-Party Quantum Teleportation with Selective Receiver." *International Journal of Theoretical Physics* 60.3 (2021): 828-837.
- [54] Huo, Guangwen, et al. "Controlled asymmetric bidirectional quantum teleportation of two-and three-qubit states." *Quantum Information Processing* 20.1 (2021): 1-11.
- [55] Popescu, Sandu. "Bell's inequalities versus teleportation: What is nonlocality?." *Physical review letters* 72.6 (1994): 797.
- [56] Boschi, Danilo, et al. "Experimental realization of teleporting an unknown pure quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels." *Physical Review Letters* (1998).
- [57] Ursin, Rupert, et al. "Communications: Quantum teleportation across the Danube." *Nature* 430.7002 (2004): 849.
- [58] Jin, Xian-Min, et al. "Experimental free-space quantum teleportation." *Nature Photonics* 4.6 (2010): 376.
- [59] Ma, Xiao-Song, et al. "Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward." *Nature* 489.7415 (2012): 269.
- [60] Krauter, H., et al. "Deterministic quantum teleportation between distant atomic objects." *Nature Physics* 9.7 (2013): 400.
- [61] Takesue, Hiroki, et al. "Quantum teleportation over 100 km of fiber using highly efficient superconducting nanowire single-photon detectors." *Optica* 2.10 (2015): 832-835.
- [62] Nölleke, Christian, et al. "Efficient teleportation between remote single-atom quantum memories." *Physical review letters* 110.14 (2013): 140403.
- [63] Lee, Noriyuki, et al. "Teleportation of nonclassical wave packets of light." *Science* 332.6027 (2011): 330-333.
- [64] Ren, Ji-Gang, et al. "Ground-to-satellite quantum teleporta-
