

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6181434号  
(P6181434)

(45) 発行日 平成29年8月16日(2017.8.16)

(24) 登録日 平成29年7月28日(2017.7.28)

(51) Int. Cl. F I  
 HO4L 9/12 (2006.01) HO4L 9/00 631  
 HO4B 10/70 (2013.01) HO4B 10/70

請求項の数 3 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2013-122792 (P2013-122792)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成25年6月11日(2013.6.11)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2014-241481 (P2014-241481A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43) 公開日	平成26年12月25日(2014.12.25)	(74) 代理人	100127535
審査請求日	平成27年8月26日(2015.8.26)		弁理士 豊田 義元
前置審査		(74) 代理人	100159190
			弁理士 渡部 比呂志
		(72) 発明者	東 浩司
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日 本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	玉木 潔
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日 本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子中継ネットワークシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

送信中継器と受信中継器とを介して送受信装置間で量子通信を行うための量子中継ネットワークシステムであって、

前記送受信装置の送信器は、伝送先の受信中継器に単一光子群を送信する手段を含み、  
 前記送信中継器は、伝送先の受信中継器に対応付けられた、複数の単一光子からなる単一光子群を連結量子もつれ状態に準備する手段と、連結量子もつれ状態に準備された単一光子群の各々と量子もつれ状態にある単一光子からなる単一光子群を、前記連結量子もつれ状態に準備された単一光子群とともに対応付けられた受信中継器に伝送する手段とを含み、

前記受信中継器は、通信する送信中継器および通信する送受信装置から伝送される単一光子群を受け取る手段と、受け取った単一光子に対して測定を行うための測定器と、測定結果を送受信装置に伝送する手段とを含むことを特徴とする量子中継ネットワークシステム。

【請求項2】

送信中継器と受信中継器とを介して送受信装置間で量子通信を行うための量子中継ネットワークシステムであって、

前記送受信装置の受信器は、通信する送信中継器から伝送される単一光子群を受け取る手段と、受け取った単一光子に対して測定を行うための測定器と、測定結果を記録する手段とを含み、

前記送信中継器は、伝送先の送受信装置および受信継器に対応付けられた、複数の単一光子からなる単一光子群を連結量子もつれ状態に準備する手段と、連結量子もつれ状態に準備された単一光子群の各々と量子もつれ状態にある単一光子からなる単一光子群を、前記連結量子もつれ状態に準備された単一光子群とともに対応付けられた送受信装置および受信継器に伝送する手段とを含み、

前記受信継器は、通信する送信中継器から伝送される単一光子群を受け取る手段と、受け取った単一光子に対して測定を行うための測定器と、測定結果を送受信装置に伝える手段とを含むことを特徴とする量子中継ネットワークシステム。

#### 【請求項3】

送信中継器と受信継器とを介して送受信装置間で量子通信を行うための量子中継ネットワークシステムであって、

前記送受信装置の送信器は、伝送先の受信継器に単一光子群を送信する手段を含み、前記送信中継器は、伝送先の受信継器に対応付けられた複数の物質量子ビットからなる物質量子ビット群を連結量子もつれ状態に準備する手段と、連結量子もつれ状態に準備された物質量子ビット群の各々と量子もつれ状態にある単一光子からなる単一光子群を、対応付けられた受信継器に伝送する手段と、前記伝送先の受信継器から受け取る測定結果に応じて、前記連結量子もつれ状態に準備された物質量子ビットに対して測定を行うための測定器と、測定結果を送受信装置に伝える手段とを含み、

前記受信継器は、通信する送信中継器および通信する送受信装置から伝送される単一光子群を受け取る手段と、受け取った単一光子に対して測定を行うための測定器と、測定結果に応じて送信元の送信中継器に対して物理量子ビットへの測定を行うように実行指令を伝送する手段とを含むことを特徴とする量子中継ネットワークシステム。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

本発明は、量子中継ネットワークシステムに関し、より詳細には、中継器を利用することにより、ネットワーク上の送受信装置の間の距離に依らず、効率的に量子通信を行うための量子中継ネットワークシステムに関する。

#### 【背景技術】

#### 【0002】

量子通信は、物理法則によって安全性が保障される量子暗号、未知の状態を転送する量子テレポーテーションなどの基盤技術である。現状の量子通信は、送受信装置間における光パルスの直接伝送に基づき、送受信装置間の通信経路中で生じる光損失が通信路に対し指数関数的に増大するために、通信のリソースが指数関数的に増大してしまう。具体的には、光損失の指数関数的増大が、同じ容量の情報伝送に対し、通信時間の指数関数的増大、または光損失を補償するための付加装置数の指数関数的増大を招くことになる。そのため、光の直接伝送に基づく量子通信は、通信可能距離に限界を有する。例えば、現状の光ファイバー伝送を用いた量子通信では、通信可能距離が高々数百キロメートル程度に留まる。

#### 【0003】

他方で、距離に対して多項式程度のリソース増大により、通信可能距離を延長する方法として、量子中継方式が知られている（例えば、非特許文献1及び2参照）。量子中継方式は、送受信装置間に設置された中継器を利用することによって、送受信装置間に量子もつれを供給することを可能としている。

#### 【0004】

図1は、従来の量子中継方式の概念図である。図1(a)に示したように、送受信者の下に設置された送受信装置101, 102の間に、送信中継器103, 104と受信継器105~107とが交互に配置されている。最初に、(ステップ1)送信中継器は、中継器自身が有する量子系とパイパータイト量子もつれ状態にある光パルスを準備し、光パルスを隣接する受信継器に伝送する。ただし、この時点において、中継器自身が有する

10

20

30

40

50

量子系間は、分離可能状態であることに注意されたい。例えば、送信中継器 C 1 0 3 は、量子系  $c_1$  と量子もつれ状態にある光パルスを受信中継器  $D_1$  1 0 5 に、量子系  $c_2$  と量子もつれ状態にある光パルスを受信中継器  $D_2$  1 0 6 に伝送する（図 1 ( a ) 参照）。ここで、量子系  $c_1$  と量子系  $c_2$  は、量子もつれ状態ではなく、分離可能状態にある。

【 0 0 0 5 】

他方で、（ステップ 2）受信中継器は、隣接する送信中継器や送受信装置の送信器から伝送される光パルスを受信し、それらに対して一括測定（例えばベル測定）を行い（図 1 ( b ) 参照）、送信元の量子系を量子もつれ状態にする（図 1 ( c ) 参照）ことを試みる。もし、この測定が成功すれば、次のステップ 3 に移行し、失敗した場合にはステップ 1 に戻る。例えば、受信中継器  $D_1$  1 1 5 は、送信中継器 C 1 1 3 から量子系  $c_1$  と量子もつれ状態にある光パルスを、送信器（送信者）1 1 1 が有する量子系と量子もつれ状態にある光パルスを受け取り、受け取った光パルスに対して一括測定（ベル測定）を行う（図 1 ( b ) 参照）。

【 0 0 0 6 】

次に、（ステップ 3）送信中継器は、自身が有する量子系の各々が他の送信中継器の量子系と量子もつれ状態にあることを確認した上で、自身が有する量子系に対して一括測定（ベル測定）を行う。例えば、送信中継器 C 1 2 3 は、隣接する受信中継器  $D_1$  1 1 5 と受信中継器  $D_2$  1 1 6 における一括測定の双方が成功すれば（図 1 ( b ) 参照）、自身が有する量子系  $c_1$  は送信器（送信者）1 2 1 が有する量子系と量子もつれ状態に、自身が有する量子系  $c_2$  は送信中継器 1 2 4 が有する量子系と量子もつれ状態となるから、残された量子系  $c_1$ 、 $c_2$  に対し一括測定を行う（図 1 ( c ) 参照）。このステップ 3 を、送信中継器が順次行い、全ての送信中継器がこれを完了することにより、送受信装置 1 3 1、1 3 2 の間に量子もつれが供給される（図 1 ( d ) ）。

【 0 0 0 7 】

このような量子中継方式を実現するためには、典型的には、非特許文献 1 ~ 1 0 に記載されているように、送信中継器には、上記の例における量子系  $c_1$  と  $c_2$  のような、光パルスと相互作用が可能であり（要請 1）、かつ量子情報の長時間の保持が可能（要請 2、すなわち量子情報の保持機能を有した）物質量子ビットの存在が必要とされる。他方で、非特許文献 1 1 においては、高効率の単一光子源が利用可能であり（要請 3）、上記の要請 1 として、物質量子ビットと単一光子間の CZ ゲートが高い成功確率で実装可能であれば、上記の要請 2 の量子メモリー機能は必要ないことが主張されている。しかしながら、既存のいずれの量子中継方式においても、高機能な物質量子ビットが必須の構成要素となっている。

【 先行技術文献 】

【 非特許文献 】

【 0 0 0 8 】

【 非特許文献 1 】 H. J. Briegel et al., Phys. Rev. Lett. 81, 5932 (1998).

【 非特許文献 2 】 L.-M. Duan, M. D. Lukin, J. I. Cirac, and P. Zoller, Nature 414, 413 (2001).

【 非特許文献 3 】 N. Sangouard et al., Rev. Mod. Phys. 83, 33 (2011).

【 非特許文献 4 】 L. Childress et al., Phys. Rev. Lett. 96, 070504 (2006).

【 非特許文献 5 】 P. van Loock et al., Phys. Rev. Lett. 96, 240501 (2006).

【 非特許文献 6 】 H. J. Kimble, Nature 453, 1023 (2008).

【 非特許文献 7 】 K. Azuma et al., Phys. Rev. A 85, 062309 (2012).

【 非特許文献 8 】 M. Zwerger, W. Dur and H. J. Briegel, arXiv:1204.2178.

【 非特許文献 9 】 Y. Li, S. D. Barrett, T. M. Stace, and S. C. Benjamin, arXiv:1209.4031.

【 非特許文献 1 0 】 W. J. Munro, K. A. Harrison, A. M. Stephens, S. J. Devitt, and K. Nemoto, Nature photon. 4, 792 (2010).

【 非特許文献 1 1 】 W. J. Munro, A. M. Stephens, S. J. Devitt, K. A. Harrison, and

10

20

30

40

50

K. Nemoto, Nature Photon. 6, 777 (2012).

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の目的は、物質量子ビットを一切必要としない量子中継ネットワークシステム、または低機能な物質量子ビットで構築可能な量子中継ネットワークシステムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明は、このような目的を達成するために、第1の実施態様は、送信中継器と受信中継器とを介して送受信装置間で量子通信を行うための量子中継ネットワークシステムであって、前記送受信装置の送信器は、伝送先の受信中継器に単一光子群を送信する手段を含み、前記送信中継器は、伝送先の受信中継器に対応付けられた複数の単一光子からなる単一光子群を連結量子もつれ状態に準備する手段と、連結量子もつれ状態に準備された単一光子群の各々と量子もつれ状態にある単一光子からなる単一光子群を、前記連結量子もつれ状態に準備された単一光子群とともに対応付けられた受信中継器に伝送する手段とを含み、前記受信中継器は、通信する送信中継器および通信する送受信装置から伝送される単一光子群を受け取る手段と、受け取った単一光子に対して測定を行うための測定器と、測定結果を送受信装置に伝送する手段とを含むことを特徴とする。

10

20

【0011】

第2の実施態様は、送信中継器と受信中継器とを介して送受信装置間で量子通信を行うための量子中継ネットワークシステムであって、前記送受信装置の送信器は、伝送先の受信中継器に単一光子群を送信する手段を含み、前記送信中継器は、伝送先の受信中継器に対応付けられた複数の物質量子ビットからなる物質量子ビット群を連結量子もつれ状態に準備する手段と、連結量子もつれ状態に準備された物質量子ビット群の各々と量子もつれ状態にある単一光子からなる単一光子群を、対応付けられた受信中継器に伝送する手段と、前記伝送先の受信中継器から受け取る測定結果に応じて、前記連結量子もつれ状態に準備された物質量子ビットに対して測定を行うための測定器と、測定結果を送受信装置に伝える手段とを含み、前記受信中継器は、通信する送信中継器および通信する送受信装置から伝送される単一光子群を受け取る手段と、受け取った単一光子に対して測定を行うための測定器と、測定結果に応じて送信元の送信中継器に対して物質量子ビットへの測定を行うように実行指令を伝送する手段とを含むことを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0012】

以上説明したように、本発明の第1の実施態様によれば、送信中継器が、伝送先に対応付けられた量子系を連結された量子もつれ状態に事前に準備することによって、量子系に対する一括測定が不要となり、量子系自体も伝送先に伝送することができる。これによって、物質量子ビットは不要となり、光子だけに基づく量子中継ネットワークを構成することが

40

【0013】

本発明の第2の実施態様によれば、送信中継器が、伝送先に対応付けられた量子系を連結された量子もつれ状態に事前に準備することによって、量子系に対する一括測定が不要となる結果、送信中継器が有する伝送先に対応付けられた量子系として、伝送に不向きだけでなく、一括測定や一括演算が確率的にしか機能しない物質量子ビットを利用する場合においても、物質量子ビットに対する量子情報の保持機能時間を短く設定でき、低機能な物質量子ビットでの量子中継ネットワークの構成が可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

50

【図1】従来の量子中継方式の概念図である。

【図2】本発明の第1の実施形態にかかる送信中継器の構成を示す概念図である。

【図3】本発明の第2の実施形態にかかる送信中継器の構成を示す概念図である。

【図4】送信中継器において連結量子もつれ状態に準備された量子系を示すグラフである。

【図5】実施例1にかかる量子中継方式の概念図である。

【図6】実施例2にかかる量子中継方式の概念図である。

【図7】実施例3にかかる量子中継方式の概念図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、図面を参照しながら本発明の実施形態について詳細に説明する。ユーザーの目的は、自身が有する送受信装置（送信器および受信器） $\{C_j\}_{j \in U}$ と、中継器である受信中継器 $\{C_j\}_{j \in D}$ および送信中継器 $\{C_j\}_{j \in S}$ を利用し、量子通信を行うこととする。ただし、集合Uと集合Dと集合Sとは、互いに素であるとする。ここで各々の中継器 $C_j$ には、直接の通信相手が設定されており、その通信相手の集合を $S(j)$ と表す。

【0016】

従来の方式においては、送信中継器 $C_k$  ( $k \in S$ )は、伝送先 $j \in S(k)$ に対応付けられた量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ を独立に準備し、それら量子系 $c_{j|k}$ の各々と量子もつれ状態にある量子系 $c_{k|j}$ を、伝送先 $j$ に伝送する。受信中継器 $C_l$  ( $l \in D$ )は、 $i \in S(l)$ から伝送される量子系 $\{c_{i|l}\}_{i \in S(l)}$ を受け取り、量子系 $\{c_{i|l}\}_{i \in S(l)}$ に一括測定を行い、測定結果を送信元 $i$ に伝える。そして、最後のステップとして、測定結果を受け取った送信元 $i$ が、測定結果に基づき量子系 $\{c_{l|i}\}_{l \in S(i)}$ に対して一括測定を行うことにより、ユーザーの送受信装置間に量子もつれを供給する。

【0017】

一方、本実施形態において、送信中継器 $C_k$  ( $k \in S$ )は、伝送先 $j \in S(k)$ に対応付けられた量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ を、独立ではなく、連結量子もつれ状態に準備してから、量子中継方式を開始する。つまり、量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ を連結された量子もつれ状態に事前に準備することによって、従来の方式における最後のステップとして必要とされた量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ に対する一括測定が不要となる。その結果、量子系 $c_{j|k}$ 自体も伝送先 $j \in S(k)$ に伝送することが可能となる。

【0018】

この利点は、以下の第1の実施形態にあるように、量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ 自体の伝送を可能とし、物質量子ビットは不要となり、光子だけに基づく量子中継ネットワークを構成することができる。また、以下の第2の実施形態にあるように、量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ が伝送に向かない物質量子ビットで構成され、それらの物質量子ビットに対する一括測定や一括演算が確率的にしか機能しない場合であっても、従来の方法に比べ、物質量子ビットに必要とされる量子情報保持時間が、最近接中継地点間での通信時間程度で留められるという利点を有する。

【0019】

以下、より具体的に、これら2つの実施形態について述べる。

【0020】

（第1の実施形態）

図2に、本発明の第1の実施形態にかかる送信中継器の構成を示す。図2(a)に示したように、送信中継器 $C_k$  ( $k \in S$ ) 201は、伝送先 $j \in S(k)$ に対応付けられた複数の量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ を連結量子もつれ状態に準備し、連結量子もつれ状態に準備された量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$  207の各々と量子もつれ状態にある量子系 $\{c_{k|j}\}_{j \in S(k)}$ を準備し（つまり、 $c_{j|k}$ と $c_{k|j}$ は量子もつれ状態に準備され）、量子系 $c_{k|j}$ だけでなく量子系 $c_{j|k}$ 自体も伝送先 $j$ に伝送する。図2(b)に示したように、受信中継器 $C_l$  ( $l \in D$ )は、 $i \in S(l)$ から伝送される量子系 $\{c_{i|l}\}_{i \in S(l)}$

10

20

30

40

50

$\{c_{i-1}\}_{i \in S(1)}$ と量子系 $\{c_{1|i}\}_{i \in S(1)}$ を受け取り、量子系 $\{c_{i-1}\}_{i \in S(1)}$ に一括測定を行う。測定結果に基づき $\{c_{1|i}\}_{i \in S(1)}$ に対して測定を行うことにより、ユーザーの下に設置された送受信装置間に量子もつれを供給する。

【0021】

(第2の実施形態)

図3に、本発明の第2の実施形態にかかる送信中継器の構成を示す。図3(a)に示したように、送信中継器 $C_k(k \in S)$ 301は、伝送先 $j \in S(k)$ に対応付けられた複数の量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ を連結量子もつれ状態に準備し、連結量子もつれ状態に準備された量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ 307の各々と量子もつれ状態にある量子系 $\{c_{k-j}\}$ を準備し(つまり、 $c_{j|k}$ と $c_{k-j}$ は量子もつれ状態に準備され)、量子系 $c_{k-j}$ を伝送先 $j$ に伝送する。受信中継器 $C_l(l \in D)$ は、 $i \in S(1)$ から伝送される量子系 $\{c_{i-1}\}_{i \in S(1)}$ を受け取り、量子系 $\{c_{i-1}\}_{i \in S(1)}$ に一括測定を行い、測定結果を送信元 $i$ に伝送する。測定結果を受け取った送信元 $i$ は、測定結果に基づき量子系 $\{c_{1|i}\}_{i \in S(i)}$ に対して測定を行うことにより、ユーザーの下に設置された送受信装置間に量子もつれを供給する。例えば、図3(b)では、送信中継器 $C_k(k \in S)$ 311は、伝送先 $j \in S(k)$ 312-316から受け取る測定結果に基づき、量子系 $\{c_{j|k}\}_{j \in S(k)}$ 317に対して測定を行う。

【0022】

以下に、本実施形態の具体例として、物質量子ビットを全く必要とせず、光子だけに基づく量子中継ネットワークを示す。実施例1, 2は第1の実施形態に対応し、実施例3は第2の実施形態に対応する。実施例4は、本発明の応用範囲を明確化するためのものである。

【実施例1】

【0023】

図5に、実施例1にかかる量子中継方式を示す。ここでは、1次元ネットワークに焦点を絞るが、一般のネットワークへの拡張は自明である。図5(a)に示したように、送受信者の下に設置された送受信装置501, 502の間に、送信中継器503, 504と受信中継器505~507とが交互に配置されている。中継器のそれぞれを、送信者側から受信者側に向かって順に $\{C_i\}_{i=1,2,\dots,2n-1}$ と名付ける。具体的には、中継器 $C_{2i}(i=1,2,\dots,n-1)$ は送信中継器に、中継器 $C_{2j+1}(j=0,1,2,\dots,n-1)$ は受信中継器に対応する。送信者は送信器 $C_0$ を、受信者は送信器 $C_{2n}$ を有する。また、以下で登場する量子ビットは、全て単一光子によって構成されていると仮定する。

【0024】

送信中継器 $C_{2i}(i=1,2,\dots,n-1)$ は、単一光子群を、図4に示したようなグラフ形状のクラスター状態 $|G_c^m\rangle$ に準備する。図4のグラフにおいて、円(頂点)は量子ビットに対応し、量子ビット対を結ぶ線(辺)は、それらの量子ビットが

【0025】

【数1】

$$(|0\rangle + |1\rangle) / \sqrt{2}$$

【0026】

に準備され、CZゲートが施されたことを示す。ここで、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ とは計算基底である。 $|G_c^m\rangle$ は、図4に示したように、 $2m(m=1,2,3,\dots)$ 本の腕を有し、各腕は第1量子ビットと第2量子ビットから成る。 $m$ 本の腕からなる左腕の量子ビット群401は、隣接する受信中継器 $C_{2i-1}$ に対応付けられ、 $m$ 本の腕からなる右腕の量子ビット群402は、隣接する受信中継器 $C_{2i+1}$ に対応付けられる。より具体的には、左腕の第1量子ビットが受信中継器 $C_{2i-1}$ に対応付けられ、右腕の第1量子ビットが受信中継器 $C_{2i+1}$ に対応付けられ、それらの第1量子ビットの各々と第2量子ビットとが量子もつれ状態にある。従って、図4のグラフのように、通信する受信中継器に対応付けられた量子系が、送信中継器 $C_{2i}$ によって、事前に連結量子もつれ状態(ここでは

10

20

30

40

50

クラスター状態)に準備されていることがわかる。

【0027】

また、伝送中の光子損失や他の現実的な雑音の影響を除去する目的で、量子ビット群に対し、量子誤り訂正符号に基づく符号化が施される場合もある。その場合には、以下の量子ビットを、符号化された量子ビットとみなすことにより、光子損失と雑音とに耐性がある量子通信方式として機能する。

【0028】

始めに、送信中継器  $C_{2i}$  は、 $|G_c^m\rangle$  に準備された単一光子群の左腕に含まれる光子群を、隣接する受信中継器  $C_{2i-1}$  に伝送し、右腕に含まれる光子群を、隣接する受信中継器  $C_{2i+1}$  に伝送する(図5(a))。同時に、送信者が有する量子系 A と量子もつれ状態にある  $m$  個の単一光子群(量子暗号を行う場合は、送信者の乱数 A に応じて準備される  $m$  個の単一光子群)を、送受信装置 501 の送信器  $C_0$  を用いて受信中継器  $C_{1505}$  に伝送する。かつ、受信者が有する量子系 B と量子もつれ状態にある  $m$  個の単一光子群(量子暗号を行う場合は、受信者の乱数 B に応じて準備される  $m$  個の単一光子群)を、送受信装置 502 の送信器  $C_{2n}$  を用いて受信中継器  $C_{2n-1507}$  に伝送する(図5(a))。

【0029】

受信中継器  $C_{2j+1}$  は、送信中継器  $C_{2j}$  から送られる  $m$  本の右腕(受信中継器  $C_{1515}$  の場合は、送受信装置 511 の送信器  $C_0$  から送られる  $m$  個の単一光子群)と、送信中継器  $C_{2j+2}$  から送られる  $m$  本の左腕(受信中継器  $C_{2n-1517}$  の場合は、送受信装置 512 の送信器  $C_{2n}$  から送られる  $m$  個の単一光子群)とを受け取る。受信中継器  $C_{2j+1}$  は、右腕と左腕を各々対応させ、対応させた右腕の第 2 量子ビット(受信中継器  $C_{1515}$  の場合は単一光子量子ビット)と左腕の第 2 量子ビット(受信中継器  $C_{2n-1517}$  の場合は単一光子量子ビット)との間にベル測定を施す(図5(b))。

【0030】

ただし、ここでのベル測定は、成功した場合に、CZゲートの後に各々の量子ビットに X 基底

【0031】

【数 2】

$$\{|0\rangle \pm |1\rangle\} / \sqrt{2}$$

【0032】

の測定を施す役割をする。もし、ここでのベル測定のうち一組でも成功したら、受信中継器  $C_{2j+1}$  は、正しくベル測定が施された腕を一組選択し、その左右の腕の第 1 量子ビットに対して、X 基底の測定を行う。それ以外の  $m-1$  ペアの左右の腕の第 1 量子ビットに対しては、Z 基底

$$\{|0\rangle, |1\rangle\}$$

の測定を行い、全ての測定結果を送受信者に伝える。もし、第 2 量子ビットに対する全てのベル測定が失敗した場合、または第 1 量子ビットに対する全ての測定が成功しなかった場合には、受信中継器  $C_{2j+1}$  は「失敗」という結果を送受信者に伝える。そして、いずれの受信中継器  $\{C_{2j+1}\}_{j=0,1,\dots,n-1}$  も「失敗」という判断を下さなかった場合に、量子中継が成功となり、送受信者の量子系 AB が量子もつれ状態(量子鍵配送の場合は、乱数 AB がシフト鍵の候補)になる。

【実施例 2】

【0033】

実施例 1 では、送受信者が送信器を利用して、量子通信を行う方法を提示した。ここでは、送受信者が送信器でなく、ある種の受信器を持つ場合でも実施例 1 と同様の方法が機能することを示す。従って、実施例 1 と合わせて、ユーザーが送信器を有するか、受信器を有するかは本質ではなく、送信器を有するユーザーと受信器を有するユーザーがネットワーク上に混在する場合でも、本実施形態は機能する。

10

20

30

40

50

## 【0034】

図6に、実施例2にかかる量子中継方式を示す。実施例1と同様に、送受信者の下に設置された送受信装置601、602の間に、送信中継器603、604と受信中継器605とが交互に配置されている(図6(a))。送信者の送受信装置601は受信器 $C_1$ を有し、受信者の送受信装置602は受信器 $C_{2n+1}$ を有する。送受信者間には、順に中継器 $\{C_i\}_{i=2, \dots, 2n}$ があり、中継器 $C_{2i}$  ( $i=1, \dots, n$ )は送信中継器に、中継器 $C_{2j+1}$  ( $j=1, 2, \dots, n-1$ )は受信中継器に対応する。また、実施例1と同様に、送信中継器 $C_{2i}$ は、単一光子群を、図4に示したグラフ形状のクラスター状態 $|G_c^m\rangle$ に準備する。

## 【0035】

始めに、送信中継器 $C_{2i}$ は、 $|G_c^m\rangle$ に準備された単一光子群の左腕に含まれる光子群を、隣接する受信中継器 $C_{2i-1}$ (送信中継器 $C_{2603}$ の場合は、送信者が有する受信器 $C_1$ )に伝送し、右腕に含まれる光子群を、隣接する受信中継器 $C_{2i+1}$ (送信中継器 $C_{2n}$ の場合は、受信者が有する受信器 $C_{2n+1}$ )に伝送する(図6(a))。送信者の送受信装置601は、送信中継器 $C_{2603}$ から受け取った光子を量子もつれ共有のための量子系Aとして保持(量子暗号を行う場合は、受け取った光子に対して測定し、測定結果をシフト鍵の候補として記録)する。受信者の送受信装置602は、送信中継器 $C_{2n604}$ から受け取った光子を量子もつれ共有のための量子系Bとして保持(量子暗号を行う場合は、受け取った光子に対して測定し、測定結果をシフト鍵の候補として記録)する(図6(a))。

## 【0036】

受信中継器 $C_{2j+1}$ は、送信中継器 $C_{2j}$ から送られるm本の右腕と、送信中継器 $C_{2j+2}$ からm本の左腕とを受け取る。受信中継器 $C_{2j+1}$ は、右腕と左腕を各々対応させ、対応させた右腕の第2量子ビットと左腕の第2量子ビットとの間にベル測定を施す(図6(b))。

## 【0037】

ただし、ここでのベル測定は、成功した場合に、CZゲートの後に各々の量子ビットにX基底の測定を施す役割をする。もし、ここでのベル測定のうち一組でも成功したら、受信中継器 $C_{2j+1}$ は、正しくベル測定が施された腕を一組選択し、その左右の腕の第1量子ビットに対して、X基底の測定を行う。それ以外のm-1ペアの左右の腕の第1量子ビットに対しては、Z基底の測定を行い、全ての測定結果を送受信者に伝える。

## 【0038】

もし、第2量子ビットに対する全てのベル測定が失敗した場合、または第1量子ビットに対する全ての測定が成功しなかった場合には、受信中継器 $C_{2j+1}$ は「失敗」という結果を送受信者に伝える。そして、いずれの受信中継器 $\{C_{2j+1}\}_{j=1, \dots, n-1}$ も「失敗」という判断を下さなかった場合に、量子中継が成功となり、送受信者の量子系ABが量子もつれ状態(量子鍵配送の場合は、乱数ABがシフト鍵の候補)になる。

## 【実施例3】

## 【0039】

実施例1、2では、光子だけに基づく量子中継ネットワークを取り上げた。しかしながら、本実施形態においては、物質量子ビットに基づいて量子中継を行う場合でも、必要とされる物質量子ビットに対する要請を緩和するという長所を有する。そこで、本実施形態に基づいて、物質量子ビットに基づく量子中継ネットワークを提示する。

## 【0040】

図7に、実施例3にかかる量子中継方式を示す。実施例1と同様に、送受信者の下に設置された送受信装置701、702の間に、送信中継器703、704と受信中継器705~707とが交互に配置されている(図7(a))。送信者の送受信装置701は送信器 $C_0$ を有し、受信者の送受信装置702は送信器 $C_{2n}$ を有する。送受信者間には、順に中継器 $\{C_i\}_{i=1, 2, \dots, 2n-1}$ があり、中継器 $C_{2i}$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ )は送信中継器に、中継器 $C_{2j+1}$  ( $j=0, 1, 2, \dots, n-1$ )は受信中継器に対応する。

10

20

30

40

50



## 【0041】

ここでは、簡単のため、ユーザーは、送信器に基づくと仮定するが、実施例2から明らかのように、ユーザーが送信器の代わりに受信器を利用する場合でも、または送信器を持つユーザーと受信器を持つユーザーとが混在する場合でも、本実施形態例は、同様に機能する。ただし、実施例1, 2と異なり、実施例3では、送信中継器  $C_{2i}$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) が準備するクラスター状態  $|G_c^m\rangle$  の構成系として、第1量子ビットが物質量子ビットであり、第2量子ビットが光子であると仮定する。

## 【0042】

始めに、送信中継器  $C_{2i}$  は、 $|G_c^m\rangle$  に準備された物質量子ビット群と光子群のうち、左腕に含まれる第2量子ビット(光子群)を隣接する受信中継器  $C_{2i-1}$  に伝送し、右腕に含まれる第2量子ビット(光子群)を隣接する受信中継器  $C_{2i+1}$  に伝送する(図7(a))。同時に、送信者が有する量子系Aと量子もつれ状態にある  $m$  個の光子群(量子暗号を行う場合は、送信者の乱数Aに応じて準備される  $m$  個の光子群)を、送受信装置701の送信器  $C_0$  を用いて受信中継器  $C_{1705}$  に伝送する。かつ、受信者が有する量子系Bと量子もつれ状態にある  $m$  個の光子群(量子暗号を行う場合は、受信者の乱数Bに応じて準備される  $m$  個の光子群)を、送受信装置702の送信器  $C_{2n}$  を用いて受信中継器  $C_{2n-1707}$  に伝送する(図7(a))。

## 【0043】

受信中継器  $C_{2j+1}$  は、送信中継器  $C_{2j}$  から送られる  $m$  本の右腕の光子群(受信中継器  $C_{1715}$  の場合は、送受信装置711の送信器  $C_0$  から送られる  $m$  個の光子群)と、送信中継器  $C_{2j+2}$  から送られる  $m$  本の左腕の光子群(受信中継器  $C_{2n-1717}$  の場合は、送受信装置712の送信器  $C_{2n}$  から送られる  $m$  個の光子群)を受け取る。受信中継器  $C_{2j+1}$  は、右腕と左腕を各々対応させ、対応させた右腕の第2量子ビット(受信中継器  $C_{1715}$  の場合は単一光子量子ビット)と左腕の第2量子ビット(受信中継器  $C_{2n-1717}$  の場合は単一光子量子ビット)との間にベル測定を施す(図7(b))。

## 【0044】

ただし、ここでのベル測定は、成功した場合に、CZゲートの後に各々の量子ビットにX基底の測定を施す役割をする。もし、ここでのベル測定のうち一組でも成功したら、受信中継器  $C_{2j+1}$  は、正しくベル測定が施された腕を一組選択し、送信中継器  $C_{2j}$  と送信中継器  $C_{2j+2}$  に対して、選択した腕上にある第1量子ビットに対するX基底の測定を行うように実行指令を送信する。それ以外の  $m-1$  ペアの、送信中継器  $C_{2j}$  が有する右腕の第1量子ビットに対して、送信中継器  $C_{2j+2}$  が有する左腕の第1量子ビットに対しては、Z基底の測定を行うように実行指令を送信する。送信中継器  $C_{2j}$  と受信中継器  $C_{2j+2}$  は、測定結果を送受信者に伝える。

## 【0045】

一方で、もし、受信中継器  $C_{2j+1}$  が有する第2量子ビットに対する全てのベル測定が失敗した場合、または送信中継器  $C_{2j}$  と送信中継器  $C_{2j+2}$  とが指示された第1量子ビットに対する全ての測定が成功しなかった場合には、送信中継器  $C_{2j}$  と送信中継器  $C_{2j+2}$  は「失敗」という結果を送受信者に伝える。そして、いずれの送信中継器  $\{C_{2j}\}_{j=1, \dots, n-1}$  も「失敗」という判断を下さなかった場合に、量子中継が成功となり、送受信者の量子系A Bが量子もつれ状態(量子鍵配送の場合は、乱数A Bがシフト鍵の候補)になる。

## 【実施例4】

## 【0046】

実施例1, 2, 3にいずれにおいても、最終的には、送信者は量子系Aを、受信者は量子系Bを有し、量子中継方式が成功した場合に、これらの量子系A, Bは量子もつれ状態となる。この量子系A, Bに供給された量子もつれは、生成直後に送受信者により測定され、利用されることもあれば、送受信者が有する他の量子系との一括演算を通じて後々に利用されることもある。つまり、本実施形態によって得られる量子もつれの利用法は、達成したい応用によって異なり、それに応じて送受信者が有する装置、またはその役割には

10

20

30

40

50

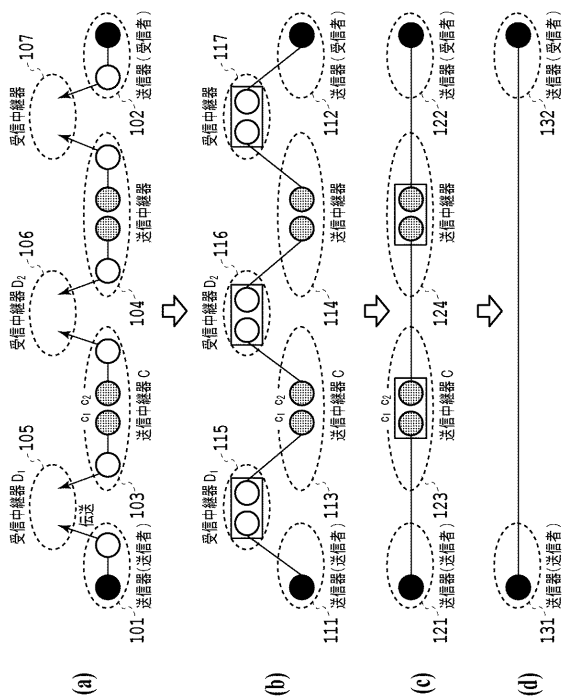
幅がある。しかしながら、本実施形態の本質は、送受信者間に、あらゆる量子通信の種となる量子もつれを効率的に供給することであり、送受信者が有する装置、またはその役割に依らず、本実施形態によって得られる量子もつれに基づくあらゆる量子通信は、本発明の実施例に含まれる。

【符号の説明】

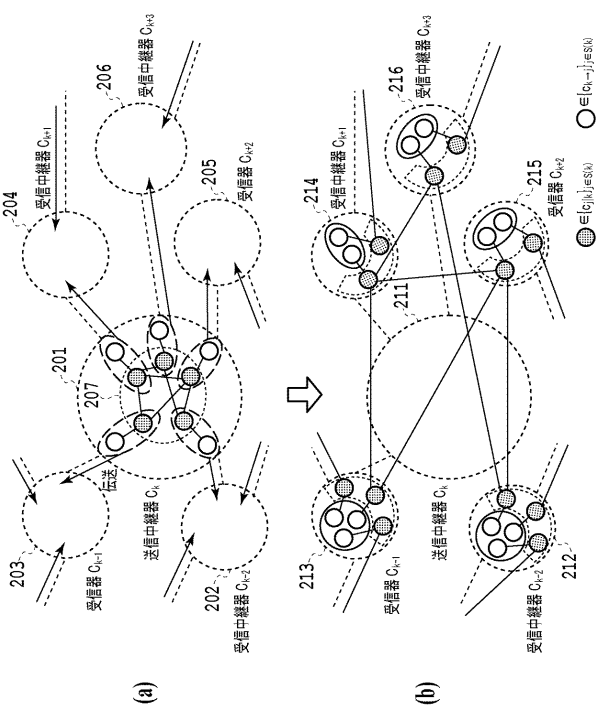
【0047】

- 207, 307 連結量子もつれ状態に準備された量子系
- 317 測定結果に基づき測定を行う量子系
- 401 左腕の量子ビット群
- 402 右腕の量子ビット群

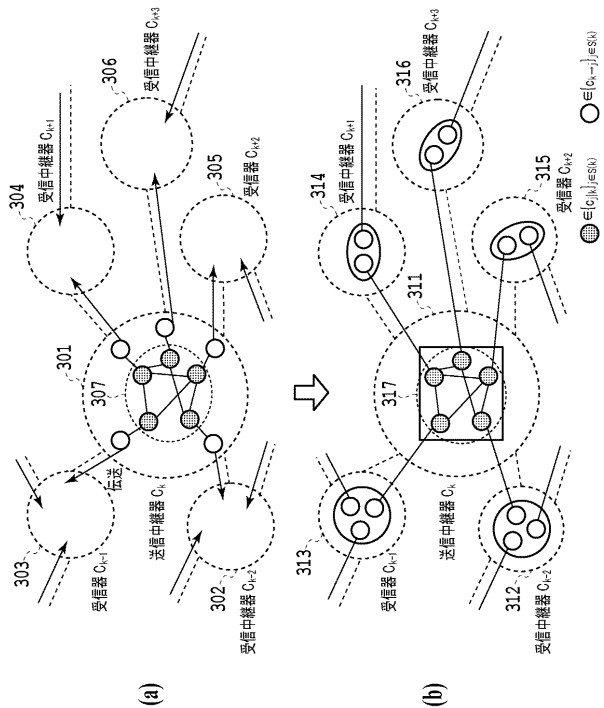
【図1】



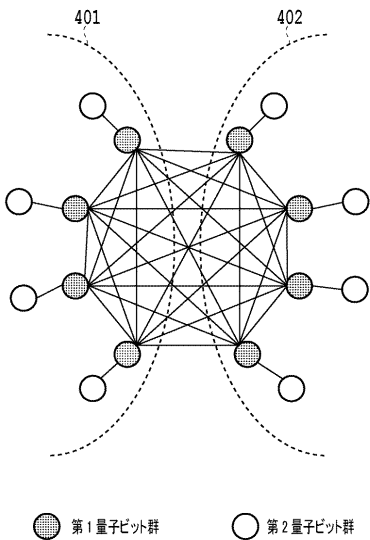
【図2】



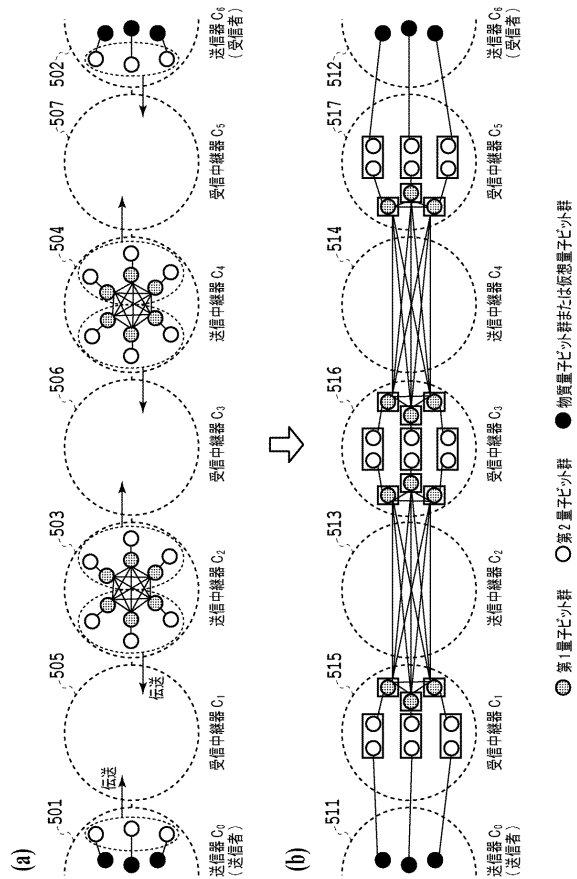
【図3】



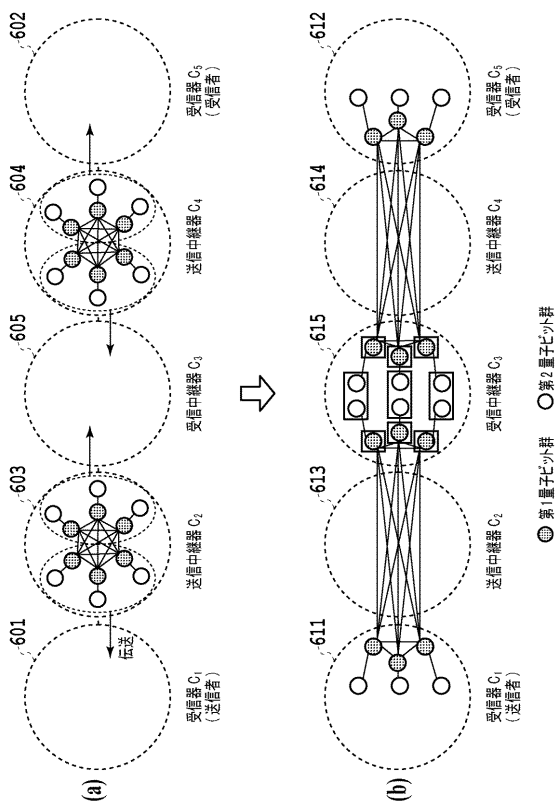
【図4】



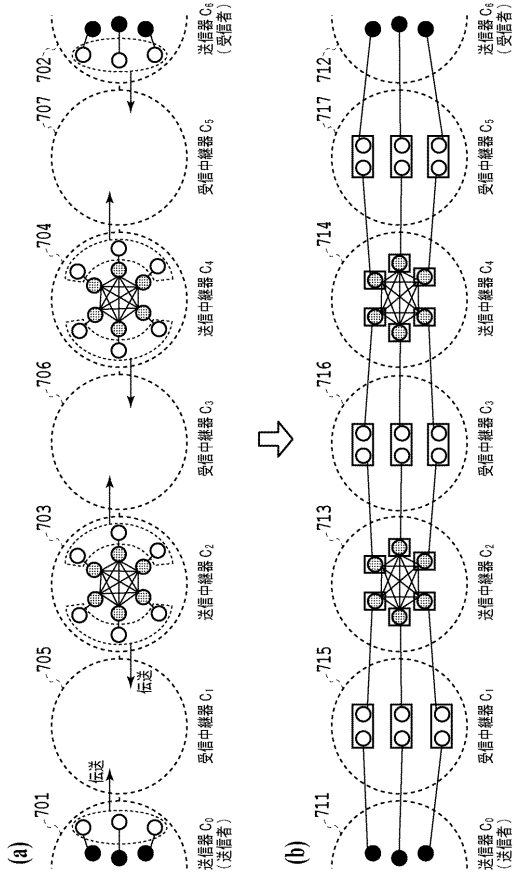
【図5】



【図6】



【 図 7 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 ホイ クォン ロー  
カナダ国 オンタリオ州 トロント市 カールトンストリート45番地 アpartment1215  
号

審査官 中里 裕正

(56)参考文献 特開2007-329865(JP,A)  
特表2009-512238(JP,A)  
特表2012-526430(JP,A)  
特表2012-531874(JP,A)  
特表2012-531875(JP,A)  
特表2012-532475(JP,A)  
特表2013-500530(JP,A)  
米国特許出願公開第2009/0317089(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H04L 9/12  
H04B 10/70  
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)  
IEEE Xplore