

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5414007号
(P5414007)

(45) 発行日 平成26年2月12日 (2014. 2. 12)

(24) 登録日 平成25年11月22日 (2013. 11. 22)

(51) Int. Cl.		F I			
HO4B	10/70	(2013.01)	HO4B	9/00	370
HO4L	9/12	(2006.01)	HO4L	9/00	631

請求項の数 14 (全 49 頁)

(21) 出願番号	特願2012-518764 (P2012-518764)	(73) 特許権者	511076424
(86) (22) 出願日	平成21年10月26日 (2009. 10. 26)		ヒューレット・パカード デベロップメント カンパニー エル. ビー.
(65) 公表番号	特表2012-531874 (P2012-531874A)		Hewlett-Packard Development Company, L. P.
(43) 公表日	平成24年12月10日 (2012. 12. 10)		アメリカ合衆国 テキサス州 77070
(86) 国際出願番号	PCT/EP2009/064069		ヒューストン コンパック センタ ド
(87) 国際公開番号	W02011/000443		ライブ ウェスト 11445
(87) 国際公開日	平成23年1月6日 (2011. 1. 6)	(73) 特許権者	504202472
審査請求日	平成24年3月2日 (2012. 3. 2)		大学共同利用機関法人情報・システム研究機構
(31) 優先権主張番号	0911274.9		東京都立川市緑町10番3号
(32) 優先日	平成21年6月30日 (2009. 6. 30)	(74) 代理人	100087642
(33) 優先権主張国	英国 (GB)		弁理士 古谷 聡

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 量子リピータ、及び、拡張されたエンタングルメントを生成するためのシステム及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ローカルリンク光チャンネル(62、63)を介して左側及び右側の近傍ノードに光学的に結合可能な量子リピータ(100、230)であって、

左側リピータ部(L)及び右側リピータ部(R)を提供する量子物理的ハードウェア(60)と、

左側のLLE制御ユニット(72)及び右側のLLE制御ユニット(73)と、

最上位の制御構成(77、103)

を備え、

前記左側リピータ部(L)と右側リピータ部(R)は、前記ローカルリンク光チャンネル(62、63)を介して伝送される光場によって左側の近傍ノード中の量子ビットと右側の近傍ノード中の量子ビットとそれぞれエンタングルするための左側の量子ビットと右側の量子ビットをそれぞれ支持し、これによって、それぞれのローカルリンクエンタングルメント(LLE)を形成するように構成され、前記量子物理的ハードウェア(60)は、左側の量子ビット及び右側の量子ビットに局所的に作用することによって、該左側の量子ビットと該右側の量子ビットをそれぞれ含む2つのエンタングルメントをマージするように動作し、

前記左側のLLE制御ユニット(72)及び右側のLLE制御ユニット(73)は、左側の近傍ノード及び右側の近傍ノードと協働して左側及び右側のLLEを継続的に生成するように前記量子物理的ハードウェア(60)を制御し、

10

20

前記最上位の制御構成(77、103)は、その近傍のノードと同期して前記リピータの最上位の周期的動作を制御するように動作し、該最上位の制御構成(77、103)は、左側の量子ビットと右側の量子ビットがそれぞれ左側と右側にエンタングルされることが少なくとも予測されるときに、該左側の量子ビットと該右側の量子ビットをそれぞれ伴うエンタングルメントのマージを最上位の動作サイクル毎に1回開始するように構成され、

前記左側のリピータ部(L)及び前記右側のリピータ部(R)の一方のリピータ部(LまたはR)は、複数のフュージリアQ-ブロック(93)を備え、該複数のフュージリアQ-ブロックの各々は、1つのフュージリア量子ビットを支持し、及び、光場を該フュージリア量子ビットを通過させるように構成され、

10

前記一方のリピータ部は、フュージリア量子ビットを通過した光場を対応するローカルリンク光チャンネル(63)に順序正しく結合するための光学的構成体をさらに備え、

前記LLE制御ユニット(73)のうちの対応するLLE制御ユニットは、該一方のリピータ部を制御して、それぞれの光場が前記フュージリア量子ビットを協調して通過するようにし、これによって、前記ローカルリンク光チャンネル(63)において狭い間隔で並んだ光場の出力列(228)が生じるように構成され、

前記左側のリピータ部(L)及び前記右側のリピータ部(R)の他方のリピータ部(RまたはL)は、ターゲットQ-ブロック(94)を備え、該ターゲットQ-ブロック(94)は、ターゲット量子ビットを支持し、及び、該ターゲット量子ビットを通過した光場を測定し、これによって、該ターゲット量子ビットが成功裏にエンタングルしたか否かを判定するように構成され、

20

前記他方のリピータ部は、対応するローカルリンク光チャンネル(62)を前記ターゲットQ-ブロック(94)に結合して、前記ローカルリンク光チャンネル(62)を介して近傍ノードから受け取った光場の入力列(228)中の光場を、前記ターゲット量子ビットを通過させて、該光場を測定できるようにするための光学的構成体をさらに備え、

前記LLE制御ユニット(72)のうちの対応する1つのLLE制御ユニットは、該他方のリピータ部を制御して、前記列(228)中の第1の光場が前記ターゲット量子ビットを通過して該ターゲット量子ビットと相互作用できるようにし、その後、前記ターゲットQ-ブロック(94)が、先行する光場が前記ターゲット量子ビットをエンタングルするのに失敗したことを示したときに、次の光場を該ターゲット量子ビットを通過させて、該光場が該ターゲット量子ビットと相互作用できるようにすべく構成され、該LLE制御ユニットは、前記ターゲットQ-ブロック(94)が、前記ターゲット量子ビットが成功裏にエンタングルしたことを示したのに応答して、前記ターゲット量子ビットを成功裏にエンタングルした前記列中の光場を特定する情報を前記列の送信元の近傍ノードに送り、これによって、前記ターゲット量子ビットとエンタングルしたフュージリア量子ビットを特定できるようにすることからなる、量子リピータ。

30

【請求項2】

前記LLE制御ユニット(72、73)は、前記最上位の動作サイクルと同期して、前記左側のLLE及び右側のLLEの周期的な生成を実行するように構成される、請求項1の量子リピータ。

40

【請求項3】

フュージリアQ-ブロックの数 f が、

$$P_{\text{success}} \geq 1 - (1 - s)^f$$

という不等式を満たし、

ここで、

s は、所定の動作環境において1つの光場でエンタングルメントを成功裏に生成する確率であり、

P_{success} は、1つの光場列でターゲット量子ビットを成功裏にエンタングルする望ましい確率であって、少なくとも99%であるように選択される、請求項1または2の量子リピータ。

50

【請求項 4】

前記フューズリアQ - ブロック (9 3) を含む前記量子リピータ部 (R) に関連する前記LLE制御ユニット (7 3) は、最上位の動作サイクル毎に 1 回だけ光場の前記出力列 (2 2 8) の生成を起動するように構成され、前記最上位の制御構成 (7 7) は、最上位の各動作サイクルにおいて、該各動作サイクルで生成された出力列 (2 2 8) の光場の中から近傍ノードのターゲット量子ビットを成功裏にエンタングルした光場を特定する情報を、関与した近傍ノードから前記リピータに返せるようにするのに十分なタイミングで、エンタングルメントの前記マージを開始するように構成される、請求項 1 ~ 3 のいずれか の量子リピータ。

【請求項 5】

最上位の各動作サイクルにおいて、前記最上位の制御構成 (7 7) が、
該各動作サイクルで実行されたエンタングルメントのマージに関するマージパリティ情報、及び、
前記各動作サイクルで実行されたエンタングルメントの局所的なマージの対象である前記量子ビットを伴うLLEに関するパリティ情報
に基づいてパリティ情報を格納するように構成される、請求項 1 ~ 4 のいずれか の量子リピータ。

【請求項 6】

前記最上位の制御構成 (7 7) は、最上位のサイクル毎に 1 回、一方の近傍ノードから所定の前の最上位の動作サイクルに関連する累積パリティ情報を受け取って、該制御構成に格納されている該動作サイクルに関連するパリティ情報を前記受け取った累積パリティ情報と結合して更新された累積パリティ情報を形成し、及び、該更新された累積パリティ情報を他方の近傍ノードに送るように構成される、請求項 5 の量子リピータ。

【請求項 7】

ノードのチェーンの左側の端部ノード (8 1) と右側の端部ノード (8 2) 中の使用可能な量子ビット間にエンドツーエンドエンタングルメント (8 7) を生成するためのシステムであって、

前記ノードのチェーンと、

請求項 1 乃至 6 のいずれかにしたがう量子リピータ (1 0 0 、 2 3 0) によって形成された前記チェーンの中間ノード (8 0) と、

前記チェーンを形成する各々の前記量子リピータの最上位の制御構成
を備え、

前記量子リピータの各々は、ローカルリンク光チャンネル (6 2 、 6 3) によって該量子リピータの近傍ノードに接続され、

前記最上位の制御構成は、それらの最上位の動作サイクルを同期させ、これによって、各サイクルにおいて、各量子リピータにおけるエンタングルメントのマージを結合して、前記エンドツーエンドエンタングルメント (8 7) を生成するように構成されることからなる、システム。

【請求項 8】

端部ノード (1 8 0 、 1 9 0) の各々が、量子ビット (以下、第 1 の量子ビットという) を提供するように構成された出力バッファ (1 8 5 、 1 9 5) を備える、請求項 7 のシステムであって、前記端部ノードの使用可能な量子ビットを解放するために、該使用可能な量子ビットで留められているエンドツーエンドエンタングルメントの端部を前記第 1 の量子ビットに移動させることができるシステム。

【請求項 9】

各リピータの前記最上位の制御構成が同期化構成 (1 0 3) を備え、それらの同期化構成を、一方の端部ノードから前記チェーンに沿って伝送される信号を介して連携させる、請求項 7 または 8 のシステム。

【請求項 10】

各リピータの前記最上位の制御構成が同期化構成 (1 0 3) を備え、それらの同期化構

10

20

30

40

50

成を、共通の外部ソースから各リピータが互いに独立して受け取った信号を介して連携させる、請求項 7 または 8 のシステム。

【請求項 1 1】

光学的に結合されたノードのチェーンの第 1 の端部ノード (8 1) の量子ビットと第 2 の端部ノード (8 2) の量子ビットとの間にエンドツーエンドエンタングルメント (8 7) を生成する方法であって、該チェーンの中間ノード (8 0) は量子リピータ (1 0 0 、 2 3 0) であり、

前記チェーン中の近傍ノードの各対の量子ビット間にローカルリンクエンタングルメント (8 5) (以下、LLE という) を継続的に生成するステップであって、該 LLE (8 5) は、前記量子ビットと前記ノード間を伝送する光場との相互作用によって生成される、ステップと、

前記量子リピータ (1 0 0 、 2 3 0) の同期化された最上位の周期的動作を実行するステップであって、リピータの各々は、該リピータのそれぞれの量子ビットが前記チェーンに沿って前記リピータから逆方向に配置されているノード中の量子ビットとエンタングルすることが少なくとも予測されているときには、最上位の動作サイクル毎に 1 回、該それぞれの量子ビットをそれぞれが含む 2 つのエンタングルメントのマージを開始する、ステップ

を含み、

光チャンネル (9 5) によって結合された近傍ノード (9 1 、 9 2) の少なくとも 1 つの対間に LLE を生成するために、さらに、

それぞれの光場を、前記対の一方のノード (9 1) 中の複数のフュージリア量子ビット (9 3) を通過させて前記光チャンネル (9 5) へと送るステップであって、前記光場は、狭い間隔で並んだ光場の列 (9 8) が前記光チャンネル (9 5) に沿って伝送されるように生成及び編成される、ステップと、

前記対の他方のノード (9 2) において、前記光チャンネル (9 5) を介して前記列 (7 8) の光場を受け取り、ターゲット量子ビット (9 4) がエンタングルしていない間に、光場の各々を、前記ターゲット量子ビット (9 4) を順に通過させて、該ターゲット量子ビット (9 4) と相互作用できるようにし、その後、光場の各々を測定して、前記ターゲット量子ビットがエンタングルしているか否かを判定するステップと、

前記ターゲット量子ビット (9 4) が成功裏にエンタングルすると、列 (9 8) の他の光場と前記ターゲット量子ビットとの相互作用を阻止し、及び、前記ターゲット量子ビットと成功裏にエンタングルした光場を識別し、これによって、前記ターゲット量子ビット (9 4) とエンタングルしたフュージリア量子ビット (9 3) の特定を可能にするステップ

を含む方法。

【請求項 1 2】

LLE (8 5) は、前記量子リピータ (1 0 0 、 2 3 0) の最上位の周期的動作と同期して周期的に生成される、請求項 1 1 の方法。

【請求項 1 3】

最上位の各動作サイクルにおいて、各量子リピータ (1 0 0 、 2 3 0) が、該各動作サイクルで実行されたエンタングルメントのマージに関するマージパリティ情報、及び、

前記各動作サイクルで実行されたエンタングルメントのマージの対象である前記量子ビットを含む LLE に関するパリティ情報に基づいてパリティ情報を格納する、請求項 1 1 または 1 2 の方法。

【請求項 1 4】

各量子リピータ (1 0 0 、 2 3 0) は、最上位のサイクル毎に 1 回だけ、一方の近傍ノードから所定の前の最上位の動作サイクルに関連する累積パリティ情報を受け取り、

該量子リピータに格納されている該サイクルに関連するパリティ情報を前記受け取っ

10

20

30

40

50

た累積パリティ情報と結合して更新された累積パリティ情報を形成し、及び、

前記更新された累積パリティ情報を他方の近傍ノードに送る

ように動作する、請求項 13 の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子リピータ、及び、拡張されたエンタングルメントを生成するためのシステム及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

量子情報システムでは、情報は、量子系の「状態」に保持される。量子系は、典型的には、量子ビットまたは「キュービット」と呼ばれる 1 単位の量子情報を提供する 2 レベル量子系である。離散的である古典的なデジタル状態とは異なり、量子ビットは、離散状態に限定されず、任意の所与の時点において 2 つの状態が重なった状態をとることができる。

【0003】

量子ビットに対して任意の 2 レベル量子系を用いることができ、単一の光子（フォトン）の偏波状態、電子スピンの状態、核スピンの状態、及び、光のコヒーレント状態に基づく物理的実装を含むいくつかの物理的実装が実現されている。

【0004】

量子ネットワーク接続は、離れたところにある端部ノード間の量子情報の通信を提供する。そのような接続を、量子コンピュータのネットワークキング、並びに、量子チャンネル（チャンネルはチャネルともいう。以下同じ）、及び認証された（しかし必ずしも秘密にはされない）保全性の古典的チャンネルが、秘密でランダムな共有された古典的ビットを生成するために使用される「量子鍵配送」（QKD）などに使用することが可能である。一般に、量子ネットワーク接続を介して量子情報を伝送するために使用されるプロセスの性能は、伝送距離が長くなるにつれて劣化するため、端点間（の距離）に上限が課される。通常、量子状態を複製することはできないので、古典的な意味におけるリピータ（中継器）を使用することによっては、端部ノード間の距離を長くすることはできない。

【0005】

2 つの隔置された場所間で量子情報を伝送する 1 つの方法は、「量子テレポーテーション」として知られている技術を使用する。これは、隔置された場所のそれぞれにあるベル対（Bell pair）として知られている 2 つのエンタングルした（すなわち、量子もつれを生じた）量子ビットを使用する。本明細書では、「エンタングルメント」という用語を、2 つのエンタングルした量子ビットを意味するものとしても使用している。かかる分散したベル対の生成は、一般に、光チャンネル（たとえば、光ファイバなどの光導波路）を介して送られる光子によって媒介される。このプロセスには距離の制限があるが、2 つの別個のベル対からのそれぞれの量子ビットが同じ場所に配置されている場合には、それらの同じ場所に配置されている量子ビット間で実行される局所的な量子操作（または量子演算）によってベル対を結合する（すなわち「マージ」する）ことが可能である。このプロセスは、「エンタングルメントスワッピング」として知られており、ベル対の同じ場所に配置されていない 2 つの量子ビット間のエンタングルメントを生じる一方で、同じ場所に配置されている量子ビットは全くエンタングルしない。

【0006】

同じ場所に配置されている量子ビットを収容（または支持）して、ベル対を結合する（ベル対をマージするともいう。以下同じ）ための局所的な量子操作（または量子演算）を実行する装置は「量子リピータ」と呼ばれる。量子リピータの基本的な役割は、2 つの近接する隔置されたノードの各々でそれぞれのベル対を生成して、それらのベル対を結合することである。多数の量子リピータを鎖状に連結する（すなわち、リピータのチェーンを生成する）ことによって、任意の距離だけ離れた端部ノード間にエンドツーエンド（すな

10

20

30

40

50

わち、両端間)のエンタングルメントを生成することができ、これによって、任意の間隔で隔置された端点間で量子情報を伝送することが可能になる。

【0007】

QKDはエンタングルした状態(エンタングルメント状態)を直接必要とはしないが、量子リピータを使用することによる長距離間のベル対の生成によって長距離のQKDが容易になることを指摘しておく。さらに、分散型量子計算のほとんどの他の用途は、分散したベル対を使用する。

【0008】

本発明は、離れた端点間のエンタングルメントの生成を容易にするための、隔置された量子ビット間のエンタングルメントの生成、並びに、量子リピータの形成、管理、及び相互作用に関する。

10

【0009】

本発明によれば、請求項1に記載されているような量子リピータが提供される。該量子リピータは、(鎖状に連結された)一連のノード中の中間ノードとして使用可能であって、該一連のノードの(2つの)端部ノードにおける量子ビット間のエンドツーエンド(すなわち、両端間)エンタングルメントを可能にする。

【0010】

一連のノードの(2つの)端部ノードにおける量子ビット間のエンドツーエンドエンタングルメントを生成する方法も提供され、この場合、該一連のノード中の中間ノードは量子リピータであり、該方法は請求項13に記載されている。

20

【0011】

以下、添付の図面を参照して、本発明の実施形態を説明するが、それらの実施形態は本発明を限定するものではない。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1A】2つの量子ビットをエンタングルするための既知の操作を示す図である。

【図1B】既存のエンタングルメントを拡張して、元々はエンタングルしていた量子ビットの1つと新しい量子ビットとを含む新しいエンタングルメントを生成するための延長操作を示す図である。

【図1C】既存のエンタングルメントを別のエンタングルメントと結合して元のエンタングルメントの各々からの1つの量子ビットを含む新しいエンタングルメントを生成することによって、該既存のエンタングルメントを拡張するためのマージ操作(結合操作)を示す図である。

30

【図2】隔置されたそれぞれのノードに配置された2つの量子ビット間でエンタングルメント操作を実行するためのエンタングルメント生成サブシステムを示す図である。

【図3A】図1Aのエンタングルメント操作を単独で用いた場合に可能な距離よりも長い距離離れた2つの量子ビット間でエンタングルメントを生成するために、量子リピータをどのように使用できるかを示す図である。

【図3B】任意の間隔で隔置されたノード対間で拡張されたエンタングルメントを生成するために、一連の量子リピータをどのように使用できるかを示す図である。

40

【図4】種々の量子相互作用を実行するための(本明細書では「Qブロック」と呼ぶ)基本的な量子物理的ハードウェアブロックの3種類の形態を示す図である。

【図5】Qブロックを用いた図2のエンタングルメント生成サブシステムの1実施例を示す図である。

【図6】量子リピータの量子物理的ハードウェアの一般的な図である。

【図7】本発明の量子リピータの実施形態の一般的な形態を示す図である。

【図8】5つのノードが光学的に結合された一連のノード(ノードチェーン)の端部ノード間にエンドツーエンドエンタングルメントを生成するための本発明を具現化するプロセス(処理)の連続する4つの動作サイクルを示し、該一連のノードの中間ノードは図7の形態の量子リピータである。

50

【図 9】図 7 の形態の量子リピータで使用するためのローカルリンクエンタングルメント生成サブシステムを示す図である。

【図 10】第 1 の量子リピータの実施形態を示す図であり、この実施形態のローカルリンクエンタングルメント生成は図 9 の形態のサブシステムに基づく。

【図 11】2 つの LLE 生成サブシステムを形成するために、図 10 の量子リピータが近傍のノードとどのように連携するかを示す図である。

【図 12】近傍のリピータ間に LLE 生成サブシステムを提供するために、図 10 の量子リピータをどのように光学的に直列に結合することができるかを示す図である。

【図 13 A】図 10 の量子リピータの実施形態の量子物理的ハードウェアの第 1 の実施例を示す図である。

10

【図 13 B】図 10 の量子リピータの実施形態の量子物理的ハードウェアの第 2 の実施例を示す図である。

【図 14】図 10 の量子リピータの動作を説明する際に本明細書で使用されるタイミング表記法をグラフ表示したものである。

【図 15】図 10 の量子リピータの連続するそれぞれの 1 / 4 動作サイクルの 1 / 4 の期間中に、図 9 の形態の LLE 生成サブシステムで生じることを示す図である。

【図 16】図 10 の形態の一連のリピータ（リピータチェーン）について、失敗及びパリティ情報を累積するためのメッセージング配列（messaging arrangement）の 1 例を示すメッセージフロー図である。

【図 17】図 10 の形態の一連のリピータについて、失敗及びパリティ情報を累積するためのメッセージング配列の第 2 の例を示すメッセージフロー図である。

20

【図 18】図 10 の量子リピータによって形成された中間ノードを有する一連のノードの右側の端部ノードの 1 実施例を示す図である。

【図 19】図 10 の量子リピータによって形成された中間ノードを有する一連のノードの左側の端部ノードの 1 実施例を示す図である。

【図 20】一連のリピータ（リピータチェーン）を形成するために、図 10 の実施形態に基づいて 2 つの相補的なタイプのリピータをどのように結合することができるかを示す図である。

【図 21】代替的なローカルリンクエンタングルメント生成サブシステムを示す図であり、図 10 の形態の量子リピータは該サブシステムに基づくことができる。

30

【図 22】一連の量子リピータノードのセグメント化の 1 例を示す図である。

【図 23】量子リピータの第 2 の実施形態を示す図であり、該実施形態では、4 つの並列ローカルリンクエンタングルメント生成サブシステムが、その近傍の各々のノードと共に形成されている。

【図 24】図 23 のリピータと 1 つの近傍ノード間に存在する並列ローカルリンクエンタングルメント生成サブシステムの交互動作を示す、図 15 に類似の図である。

【図 25】図 23 の形態の一連のリピータについて、失敗及びパリティ情報を累積するためのメッセージング配列の 1 例を示すメッセージフロー図である。

【発明を実施するための形態】

【0013】

40

基本的なエンタングルメント生成及び拡張操作

エンタングルメント操作（図 1 A）

図 1 A は、大まかに言えば、2 つの量子ビット qb1、qb2（参照番号 1 で示されている）をエンタングルしてベル対を生成するための既知のプロセス（本明細書では「エンタングルメント操作」という）を示している。図 1 A は、エンタングルメント操作中に取得されたスナップショット（a）～（g）を時系列で示している。この例では、量子ビット qb1、qb2 は、数ミリメートルよりも長い距離だけ分離されており、ベル対の生成は、自由空間または光ファイバー 4 などの導波路を介して送ることができる光子によって媒介される。非常に大まかに言えば、ベル対生成プロセスを、非常に少ない量の光（単一の光子、光子の対、または、光子が極めて少ないレーザーパルス）を用いるプロセスと、レーザーな

50

どのコヒーレント源からの多くの光子からなるパルスを用いるプロセスに分けることができる。当業者には理解されるように、光子を生成し、エンタングルメント操作を実行し、及び、測定を行う方法の細部は、非常に少ない量の光と多くの光子からなるレーザーパルスとのどちらを使用するかに依存して異なる。しかしながら、そのような任意のアプローチを用いて本発明を実施することができるので、以下の説明は、ベル対を生成する（及び、その後、拡張する）ために使用される「光場（light field）」という用語で（それらの光子乃至パルスを）簡単に表現している。

【 0 0 1 4 】

図 1 A をより詳細に検討すると、放射源 2 から放射された光場 5（スナップショット（a））は、予め準備されている非古典的状態（たとえば、0、+1）にある物理ビット（physical qubit。または物理的量子ビット）qb1を通過する（スナップショット（b））。典型的には、この物理ビットは電子スピンとして実現され、この場合、電子は、光場が通過する直前に所定の状態になる。光場 5 と量子ビット qb1 が相互作用して、光場 5 は、量子ビット qb1 の量子状態を有効に「捕捉」する。光場 5 は次に、光ファイバー 4 を伝送して（スナップショット（c）及び（d））、量子ビット qb2 と相互作用し（スナップショット（e））、その後、検出器 3 で測定される（スナップショット（f））。これらが成功すると、量子ビット qb1 から量子ビット qb2 に量子状態が「移行」して、これらの量子ビットがエンタングルされる（図 1 A では、このエンタングルメントは、弧状の両矢印 8 によって表されており、この表現形式は、エンタングルメントを示すために図面全般を通じて使用されている）。検出器 3 によって測定された光場 5 の特性によって、エンタングルメント操作が成功したか否かを判定することができる。エンタングルメント操作の成功または失敗が、古典的（非量子）メッセージ 9 によってファイバー 4 の qb1 端へと戻される（スナップショット（g））。このメッセージは非常に簡単な形態もの（たとえば、単一パルスの有無）とすることができる。本明細書で使用される「メッセージ」という用語には、そのような簡単な形態のものも、任意の複雑さを持つ（処理時間の制約を受ける）構造化メッセージも含まれる。メッセージ 9 が、いくつかの量子ビットの中から特定の量子ビットを特定し、かつ、エンタングルメント操作の成功または失敗を特定する必要がある実施形態でも、該メッセージは、単一パルスの有無という形態を依然としてとることができる。その場合、単一パルス無しのタイミングを用いて対象としている量子ビットを特定することができる。エンタングルメント操作の成功 / 失敗に関する情報をファイバー 4 の qb1 端に戻す必要がある場合（または、関与したまたは含まれている量子ビットを特定する必要がある場合）には、エンタングルメント操作の全経過時間は、エンタングルメント操作が成功した場合でも、少なくともファイバー 4 をたどる往復伝搬時間である。

【 0 0 1 5 】

量子ビット qb2 が既に別の量子ビットとエンタングルされているか否かに関係なく、量子ビット qb1 と qb2 をエンタングルするために、エンタングルメント操作を実行することができる（エンタングルメント操作が qb1 と qb2 との間で実行されるときに、qb2 が既に別の量子ビット qb_j とエンタングルしていた場合には、3 つの量子ビット qb1、qb2、qb_j の全ての状態がエンタングルされることになる）。

【 0 0 1 6 】

エンタングルメント操作が成功した場合には、検出器 3 によって測定された光場 5 の特性によって、qb1 と qb2 のエンタングルされた状態が相互に関連しているか否かの判定を行うこともできる。相互に関連しているか否かは、一般的には、エンタングルメントの「パリティ」として表される（偶数パリティと奇数パリティは、それぞれ、相互に関連している量子ビット状態、相互に関連していない量子ビット状態に対応する）。エンタングルメントのパリティは後で使用され場合があるので、該パリティを知っておくことは通常は重要である。そのため、いずれのパリティ情報も保存する必要があり、または、パリティが最終的には常に同じになることを確保するための手順を取る必要がある（たとえば、奇数パリティであると判定されると、qb2 の状態を反転して偶数パリティを生成することによって、qb1 と qb2 の間のエンタングルメントのパリティを、最終的には常に偶数パリティに

10

20

30

40

50

することができる)。

【0017】

実際には、2つのエンタングルされた量子ビットの相対的なパリティは、しばしば「一般化されたパリティ (generalized parity)」と呼ばれる2次元量であり、量子ビットパリティ値と共役量子ビットパリティ値の両方を含んでいる。図1Aに示す単純なエンタングルメント操作の場合には、共役量子ビットパリティ値情報は、実際には偶数パリティであり、測定する必要はない。「一般化されたパリティ」は、該情報を表すのに2つの古典ビットを必要とする。(QKDなどの)いくつかの用途では、共役量子ビットパリティ値情報についての知識を不要とすることができる。以下では、「一般化されたパリティ」の要素の一方(すなわち、量子ビットパリティ値または共役量子ビットパリティ値)を明示的に参照している場合を除いて、「パリティ」という語の使用は、「一般化されたパリティ」を意味するが、適切な場合には、共役量子ビットパリティ値情報を省くことができることが前提とされている。

10

【0018】

既に述べたように、量子ビットqb1及びqb2は、典型的には、電子スピンとして物理的に実現される。しかしながら、このようにして保存された量子情報の実際の寿命は非常に短く(累計して 10^{-6} 秒のオーダー)、したがって、一般的には、光場5とqb1及びqb2との相互作用の直後に、対象としている量子ビットの量子状態を、はるかに長い実効寿命(典型的には累計して1秒のオーダー)を有する核スピンの移行させる。後続の光場との相互作用のために(たとえば、後述する2つのエンタングルメントのマージを行うために)、量子状態を、後で電子スピンに戻すことができる。

20

【0019】

注目すべき他の実用上の特徴は、物理ビット(物理的量子ビット)qb1及びqb2は、一般に、光場5が通過する場合以外は(シャッターで光を遮るなどによって)光が当たらないようにされるということである。ファイバー4のqb2端部においてこれを容易にするために(及び、量子ビットと光場5との相互作用の直前に、予め準備されている状態への該量子ビットの設定を起動するために)、光場5に先だって「先駆」光パルス6を送ることができる。この光パルスは、ファイバー4のqb2端部で検出されて、量子ビットqb2のプライミングを起動(トリガ)するため、及び、その後の光場5との相互作用のための(たとえば、シャッターを開くことによる)光場の照射(または伝送)を起動(トリガ)するために使用される。この代わりとして、これらのタスクを起動する他の手段を用いることも可能である。

30

【0020】

ベル対を成功裏に生成する確率、それに含まれるまたは関わる量子ビット間の距離、及び生成された対の忠実度の間の関係は複雑である。1例を挙げると、多くの光子からなるレーザーパルスの形態をなす光場を用いる1つの特定の実施例では、量子ビット間の距離が10kmと20kmの場合に、それぞれ、忠実度が0.77、0.638のベル対が生成され、この生成の成功の割合は、試行したうちの38%~40%である。重要な点は、図1Aに示されているエンタングルメント操作の距離は制限されているということである。簡単にするために、以下では、10kmの距離での成功確率が0.25であると想定している。

40

【0021】

LLE生成サブシステム(図2)

エンタングルメント操作を実行するためのコンポーネントのアセンブリ(組立体または集合)を、本明細書では、「エンタングルメント生成サブシステム」という。該アセンブリを、装置のある部分(または部品)内に局所的に実装すること、または、離れて配置された装置の部分(または部品)間に実装することができる(これらの装置を一般的にノードという)。図2は、2つのノード21と22が、光ファイバー23によって光学的に結合される後者の場合の1例を示している。ファイバー23などの光ファイバーは、本明細書で「ローカルリンク」ファイバー(または局所リンクファイバー)と呼ばれるノード間

50

リンクを提供する。図2のノード21、22は、それぞれの量子ビットqb1、qb2を実現するためのコンポーネントを含んでいる（理解を簡単にするために、図2では、図1Aと同じ量子ビットの名称乃至参照を使用している）。量子ビットqb1及びqb2は、qb1に関連付けられている放射源2、qb3に関連付けられている検出器3、ローカルリンクファイバー23、及び、各ノードにあるエンタングルメント - 操作制御ロジック（不図示）と共に、量子ビットqb1とqb2の間にエンタングルメント8を生成するためのエンタングルメント生成サブシステム25を形成する。ノード間のローカルリンクファイバーを通過する光場によって生成されるこのタイプのエンタングルメントを、本明細書では「ローカルリンクエンタングルメント」または「LLE」と呼ぶ。これに対応して、ノード間のエンタングルメント生成サブシステム25を「LLE生成サブシステム」と呼ぶ。

10

【0022】

延長操作（図1B）

図1Aのエンタングルメント操作によって生成されるようなエンタングルメントを「拡張（または延長）」して、元々エンタングルしていた量子ビットのうちの1つと新しい量子ビットを含む新たなエンタングルメントを生成することができる。この場合、後者の新しい量子ビットと元々エンタングルしていた量子ビットの間の距離に関しては、典型的には、元々エンタングルしていた量子ビットのうちの該1つとの間の距離の方が、その元々エンタングルしていた量子ビットのうちの他方との間の距離よりも長い。図1B及び図1Cは、量子ビットqb1とqb2（参照番号1で指示されている）との間の最初のエンタングルメント8を拡張して量子ビットqb1と別の量子ビットとの間にエンタングルメントを形成する2つのやり方を示している。いずれのやり方も、光場を種々の量子ビットを通過させた後、その光場を測定することを含む。しかしながら、簡単にするために、光場自体、及び、該光場を伝送するために典型的に使用される光ファイバーは、図1B及び図1Cからは省かれている。

20

【0023】

図1Bは、本明細書において「延長操作」と呼ぶエンタングルメント拡張プロセスを、時系列に並べたスナップショット（a）～（d）で示している。一般的には、延長操作は、既存の第1のエンタングルメントのうちのある量子ビットを、該第1のエンタングルメントには含まれていない量子ビット（しかし、この量子ビットは、既に別のエンタングルメントに含まれている場合がある）とエンタングルメントして結合された一連のエンタングルメントを形成し、その後、測定によって該一連のエンタングルメントから中間の量子ビット（すなわち、拡張された該第1のエンタングルメントの端部にある量子ビット）を除去して、該第1のエンタングルメントのうちに残りの量子ビットと新たにエンタングルした量子ビットとの間に「拡張された」エンタングルメントを残すことをさらに含む。図1Bは、該第1のエンタングルメントには含まれていない量子ビットがそれ自体まだエンタングルしていない最も単純な場合の延長操作を示している。より具体的には、図1Bのスナップショット（a）に示すように、量子ビットqb1及びqb2（いずれも参照番号1で指示されている）を含む既存のエンタングルメント8の量子ビットqb2は、エンタングルメント操作によって量子ビットqb3（参照番号10で示されている）とさらにエンタングルされる。このエンタングルメント操作は、光場を放射源2によって放射して、量子ビットqb2及びqb3を通過させた後、該光場を検出器3で測定することを含む。スナップショット（b）は、こうして生じたqb2とqb3の間のエンタングルメント11を示している。エンタングルメント8と11は、結合された一連のエンタングルメントを形成し、これは、すなわち、qb1、qb2及びqb3の状態が今や互いにエンタングルしていることを意味する。次に、光場を放射源2から中間にあるqb2まで送り、検出器3で該光場を検出することによって、該量子ビットqb2に対して、本明細書では「X測定」（図1Bでは参照番号12で指示されている）と呼ぶ特定のタイプの測定を実施し、これによって、qb1とqb3とのエンタングルメントを維持したまま、qb1とqb3とのエンタングルメントからqb2を除去する（スナップショット（c）参照）。X測定12の1つの特徴は、該測定が、エンタングルしている量子ビットqb1とqb3の量子状態以外の量子状態に関する情報を提供しないようなやり

30

40

50

方でなされることにある。たとえば、「 $a|000\rangle + b|111\rangle$ 」（ a 、 b は確率振幅）のような量子ビット $qb1$ 、 $qb2$ 、及び $qb3$ 間の結合状態の場合、量子ビット $qb2$ に対する X 測定は、 $qb1$ と $qb3$ の間のエンタングルメントについて、「 $a|00\rangle + b|11\rangle$ 」（ X 測定の結果が $+1$ の場合）、または、「 $a|00\rangle - b|11\rangle$ 」（ X 測定の結果が -1 の場合）のいずれかの状態を与えるであろう。この測定は、 a または b に関する情報を何も与えない。

【0024】

X 測定12を実施してエンタングルメントから $qb2$ を除去した後、拡張されたエンタングルメントが $qb1$ と $qb3$ の間に残される。この拡張されたエンタングルメントは、図1Bのスナップショット(d)に中程度の厚さの線で描かれた弧13として示されている。

【0025】

拡張されたエンタングルメント13のパリティは、エンタングルメント8及び11のパリティと、 X 測定から決定された共役量子ビットパリティ値の組み合わせである（上記の例では、 X 測定は $+1$ または -1 という結果を与えるが、 $+$ 、 $-$ の符号が共役量子ビットパリティ値である）。偶数パリティ及び奇数パリティのそれぞれについて、量子ビットパリティ値情報及び共役量子ビットパリティ値情報の各々が2進値「0」及び「1」によって表される場合には、拡張されたエンタングルメントの量子ビットパリティ値情報及び共役量子ビットパリティ値情報は、対応するコンポーネントパリティ（それぞれのパリティ値情報を構成するパリティ）のそれぞれのXOR（排他的OR）結合である。

【0026】

図1Bの延長操作と機能的に等価な結果を、最初に $qb3$ を $qb2$ とエンタングルさせることによって得ることができるが、これを、媒介する光場を最初に $qb3$ を通過させ、次に、 $qb2$ に対する X 測定を実行することによってエンタングルメントから $qb2$ を除去するようにするエンタングルメント操作を用いて行うことができることに留意されたい。本明細書では、言語上の明瞭化のために、（ X 測定を不可欠のものとして伴う）「延長操作」は、延長操作の一部として実行される最初のエンタングルメントが、拡張されるエンタングルメントの量子ビットを最初に通過する光場によって実施される場合のみを含む。上記の延長操作に機能的に等価なものは、別個のエンタングルメント操作及び X 測定操作として扱われる。

【0027】

かなりの距離だけ隔置された2つの量子ビット間にエンタングルメントを生成することを目的とする場合には、図1Bに関して説明した延長操作はそれだけでは有効ではない。なぜなら、それぞれのエンタングルメント操作（図1Bの(a)参照）が失敗すれば、拡張される既存のエンタングルメント（図1Bのエンタングルメント8）が破壊されてしまうからである。実際には、拡張されたエンタングルメント13が成功裏に生成される確率は、エンタングルメント8及び11のそれぞれを生成するために使用されるそれぞれのエンタングルメント操作の成功確率の積である。既に述べたように、エンタングルメント操作が成功する確率は距離に関係しているため、延長操作だけを用いて長距離にわたってエンタングルメントを成功裏に生成して、最初のエンタングルメントを成功裏に拡張できる可能性は低い。同じ問題は、上記の延長操作の機能的等価物についても存する。

【0028】

マージ操作（図1C）

より良いアプローチは、図1Cに示すマージ操作を用いて、それぞれがかなり長い距離にわたる（複数の）別個に生成されたエンタングルメントを結合することである。このアプローチによれば、そのようなエンタングルメントを生成する試みの1つが失敗しても他のエンタングルメントは破壊されないため、個々のエンタングルメントに関連する成功確率が効果的に分離される。もちろん、個々のエンタングルメントを結合するために使用されるマージ操作は、有効であるためには、それ自体信頼性が高いものでなければならないが、これは、非常に短い距離にわたって該マージ操作を実行することによって達成される。

【0029】

10

20

30

40

50

図1Cは、スナップショット(a)~(e)の時系列を用いて、量子ビットqb1とqb2の間に存在するエンタングルメント8を、量子ビットqb4(参照番号14で指示されている)とqb5(参照番号15で指示されている)の間に存在する別のエンタングルメント16と結合(マージ)することによって「拡張(または延長)」して、qb1とqb5の間に「拡張されたエンタングルメント」(図1Cの中程度の厚さの線で描かれている弧19)を生成するためのマージ操作の実施形態の1例を示す。量子ビットqb2とqb4は互いに近接して(典型的には、互いに数十ミリメートル以内の位置に)配置されている。エンタングルメント8及び16が生成される順番は問題ではない(実際に、それらを同時に生成することができる)。必要なのは、両方のエンタングルメントが同じ時点において使用できる条件で存在するという点だけである。そのような時点において、エンタングルメント8と16は、量子ビットqb2とqb4に対して局所的に実行される量子操作(または量子演算)によって「結合」される。(LLE8、16がそれぞれ生成された直後に量子ビットqb2、qb4の量子状態が電子スピンから核スピンの移行した場合には、マージ操作が実行される前にそれらの状態を電子スピンの戻す必要がある)。この局所的マージ操作は、放射源2によって光場を放出し、続いて、該光場を2つの量子ビットqb2とqb4を通過させ(またはこの逆の順で通過させ)、その後、該光場を測定する(図1Cのスナップショット(b)参照)ことによって実行される図1Aのエンタングルメント操作のプロセスと同種の第1のプロセスを含む。この第1のプロセスは、成功すれば、(図1Cのスナップショット(c)のエンタングルメント17で示されているように)量子ビットqb2とqb4をエンタングルさせ、これによって、量子ビットqb1とqb5を互いにエンタングルするところの結合された一連のエンタングルメントが生成される。次に、1以上のX測定18(図1Cのスナップショット(d)参照)からなる第2の測定プロセスを用いて、エンタングルしている全体構成から中間にある量子ビットqb2及びqb4を除去して、量子ビットqb1とqb5の間の「拡張された」エンタングルメント19を残す。量子ビットqb2及びqb4は最終的には、互いにエンタングルせず、量子ビットqb1、qb5ともエンタングルしない。マージ操作は、2つの同じ(またはほぼ同じ)場所にある量子ビット間の局所的な操作であるため、成功する確率は非常に高い。

【0030】

マージ操作の一部として実施される測定は、結合(マージ)の成功または失敗の指標と、マージ操作の「一般化されたパリティ」の指標の両方を提供する。たとえば、マージ操作の第1のプロセスは量子ビットパリティ値を測定することができ、マージ操作の第2のプロセスは共役量子ビットパリティ値を測定することができる。この場合、該第2のプロセスを、量子ビットqb2とqb4の両方を通過する光場を用いる1つのX測定(この場合は、光場は、該第1のプロセスで使用される値(たとえば0、-1)とは異なる値(たとえば0、+1)を有する)として、または、qb2及びqb4に対して個別に実施され、その後結合される個々のX測定として実施することができる。後者のアプローチが図1Cに示されている。拡張されたエンタングルメント19のパリティは、エンタングルメント8及び15のパリティとマージ操作のパリティの組み合わせである。上記と同様に、偶数パリティ及び奇数パリティのそれぞれについて、量子ビットパリティ値情報と共役量子ビットパリティ値情報の各々が2進値「0」及び「1」によって表される場合には、拡張されたエンタングルメントの量子ビットパリティ値情報及び共役量子ビットパリティ値情報は、対応するコンポーネントパリティ(それぞれのパリティ情報を構成するパリティ)のそれぞれのXOR(排他的OR)結合である。

【0031】

マージ操作の成功もしくは失敗に関する情報は、端部の量子ビット位置へと古典的メッセージで伝送される。そうでなければ、これらの位置は、量子ビットqb1とqb5がエンタングルしているか否かを知らないからである。この代わりとして、マージ操作の失敗確率は通常は非常に低いので、成功したことを想定して、成功/失敗メッセージを送らないようにすることができるが、この場合は、エンタングルメントの不存在の原因となったマージの失敗を検出して補償することは、拡張されたエンタングルメント19を使い果たすもし

10

20

30

40

50

くは消費するアプリケーションに委ねられる。通常は、エンタングルしている量子ビットを利用するために、拡張されたエンタングルメントのパリティを知っておく必要があるので、拡張されたエンタングルメント19のパリティを決定するために必要とされるパリティ情報も、端部の量子ビット位置の一方または他方に伝送される。

【0032】

図1Cに関して上述したマージ操作の形態は、事実上は、エンタングルメントからqb4を除去するためにqb4に対して実施されるX測定と共に、エンタングルメント8を拡張するためにqb2とqb4の間の非常に短い距離にわたって実行される延長操作であることが理解されよう(qb2は、該延長操作の一部として実行されるX測定によってエンタングルメントから除去されている)。もちろん、量子ビットqb3が、該量子ビットqb3へとエンタングルメント8が拡張されるまでは、それ自体エンタングルされない図1Bに例示する延長操作とは異なり、図1Cにおけるこれと等価な量子ビットqb4は第2のエンタングルメント16に既に含まれている。しかしながら、既に述べたように、延長操作にはこの可能性が含まれる。

【0033】

既に述べたように、マージ操作は、非常に短い距離にわたって実行され、それゆえ、高い成功確率を有する(図1Cの量子ビットqb2とqb3の間の)局所的な操作である。マージ操作には、 10^{-9} 秒のオーダー(程度)の時間がかかる。

【0034】

量子リピータ(図3A及び図3B)

実際には、基本的な(すなわちベースとなる)エンタングルメント操作を妥当な成功確率でもって利用できる距離よりも長い距離だけ分離されたそれぞれの端部ノードに配置された2つの量子ビット間に、拡張されたエンタングルメントを生成しようとするときには、それらの端部ノード間の距離に及んでいる基本的なエンタングルメントをマージ(結合)するために、量子リピータと呼ばれる1以上の中間ノードが使用される。量子リピータノードの各々は、図1Cの量子ビットqb2及びqb4に対応し、かつ、他のノードの量子ビットとのそれぞれのエンタングルメントに含まれている(すなわち関わっている)局所的な量子ビットの対に対してマージ操作を効果的に実施する。図3Aは、左側の端部ノード31と右側の端部ノード32によって終端されたチェーン(鎖状)をなす(すなわち一連の)ノード中の1つのノードを形成するそのような量子リピータノード30を示しており、ノード31、32は、それぞれ、エンタングルさせたい(が、それらがあまりに遠く離れているために、1つのエンタングルメント操作を用いて直接エンタングルすることができない)量子ビットqb1、qb5を収容している。この例では、該一連のノード(ノードチェーン)は、左側と右側の端部ノード31、32を含む3つのノードから構成されており、ノード31、32は、また、量子リピータ30の左側と右側の近傍ノードを形成している。量子リピータ30は、左側と右側のローカルリンク光ファイバー33L、33Rによって、それぞれ左側と右側の近傍ノード31、32に接続されている。本明細書を通じて使用されている「左側」及び「右側」という用語は、量子リピータを含む一連のノードの反対側(該一連のノードに沿った方向、該一連のノードのそれぞれの端部など)を識別するための便利なラベルとして単に使用されていることに留意されたい。

【0035】

量子リピータ30は、実際には、各々がそれぞれの量子ビットqb2、qb4(理解を容易にするために、図3Aでは図1Cと同じ量子ビット表記が使用されている)を含む左側部分もしくは左側部、並びに右側部分もしくは右側部(図3Aでは「L」、「R」とそれぞれラベル付けされている)を備える。左側の近傍ノード31の量子ビットqb1及び量子リピータノード30の量子ビットqb2は、それらのノード間に形成されて(図3Aの弧状の破線の矢印8として示されている)、qb1とqb2の間に左側LLE8を生成するように動作するLLE生成サブシステムの一部である。同様に、右側の近傍ノード32の量子ビットqb5と量子リピータノード30のqb4は、それらのノード間に形成されて、qb5とqb4の間に右側LLE16を生成するように動作するLLE生成サブシステムの一部である。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 6 】

各LLEを生成するために使用される光場の伝送方向（左から右または右から左）は重要ではなく、このため、関連する放射源及び検出器を所望に応じて配置することができることに留意されたい。たとえば、LLE 8 及び 1 6 を生成するのに必要な光場をいずれも量子リピータ 3 0 から送り出すようにすることができるが、これは、放射源が量子リピータ 3 0 内に配置され、検出器が左側の近傍ノード 3 1 と右側の近傍ノード 3 2 に配置されることを意味している。しかしながら、同じ形態の量子リピータの鎖状結合（チェーン化）を容易にするために、全ての光場がノードチェーン（すなわち一連のノード）に沿って同じ方向に進むようにするのが便利である。たとえば、全ての光場が左から右へと進むように光場を配置することができ、この場合、量子リピータ 3 0 の左側部 L は、左側LLE 8 を生成するための検出器を含み、右側部 R は、右側LLE 1 6 を生成するための放射源を含むことになる。簡単にするために、特に明示しない限り、以下では、光場はノード間を左から右へと伝送することが想定されている。しなしながら、特許請求の範囲においては、光場の伝送方向は、任意の特定の方向には限定されず、また、異なるリンク間で光場の伝送方向が互いに同じでなければならないという限定もない（但し、そのような限定が、記載されているかまたは暗黙的に要求されている場合を除く）。

10

【 0 0 3 7 】

量子リピータ 3 0 の動作時に、左側LLE 8 と右側LLE 1 6 が任意の順番で生成された後に、量子ビット qb2 及び qb4 を伴う局所的なマージ操作 3 4 が実行され、これによって、左側LLE 8 と右側LLE 1 6 が結合されて、端部ノード 3 1 及び 3 2 のそれぞれの量子ビット qb1 と qb5 の間に拡張されたエンタングルメント 1 9 が形成される。

20

【 0 0 3 8 】

必要であれば、マージ操作の成功または失敗に関する情報及びパリティに関する情報が、古典的メッセージ 3 5 によって量子リピータ 3 0 からノード 3 1、3 2 に送られる。

【 0 0 3 9 】

パリティ情報に関しては、ローカルリンクエンタングルメントのパリティが（必要に応じて量子リピータ状態を反転することによって）統一されている場合には、マージパリティ情報だけを量子リピータによって送るだけでよく、ノード 3 1 または 3 2 はこの情報を利用することができる。しかしながら、LLEパリティ情報が単に格納されている場合には、量子リピータは、自身が持っているパリティ情報を全て送る必要がある。たとえば、左側LLE 8 と右側LLE 1 6 のパリティが、量子リピータ 3 0 とノード 3 2 によってそれぞれ知られている場合には、量子リピータ 3 0 は、LLE 8 に関するパリティ情報とマージパリティ情報の両方を、典型的にはそれら 2 つを結合した後に、ノード 3 2 に送る必要がある。これがされると、ノード 3 2 は、量子リピータ 3 0 から受け取ったパリティ情報とLLE 1 6 に関して既に知っているパリティ情報とを結合することによって、拡張されたエンタングルメントのパリティを決定することができる。

30

【 0 0 4 0 】

上記から、マージ操作自体は非常に速く（ 10^{-9} 秒のオーダーで）行われるが、拡張されたエンタングルメント 1 9 がノード 3 1、3 2 に有効に利用できるようになるまでには、一般的に、ノード 3 1、3 2 のうちの一番遠くにあるノードへのメッセージの伝搬時間に相当する遅延が存在することがわかる。

40

【 0 0 4 1 】

複数の量子リピータをチェーン状に結合することによって、任意の距離で隔置されたノード対間に拡張されたエンタングルメントを生成することができる。図 3 B は、このことを、左側及び右側の端部ノード 3 1 及び 3 2 を含む N 個のノードからなるノードチェーン、並びに、(N - 2) 個の一連の量子リピータ 3 0（量子リピータの各々は、「QR」で表示されており、かつ、簡単にするために、L 及び R の量子ビットを表す 2 つの円を含む矩形で示されている）を含むチェーンをなす（すなわち一連の）N 個のノードについて示している。ノード 3 0 ~ 3 2 は、（不図示の）光ファイバーによってチェーン状に相互接続されており、かつ、左から右へと番号が付けられている。すなわち、各ノードの番号 n は

50

、各ノードの下に付されており、ノード番号「 j 」は、該チェーンに沿った任意のQRノード30を表している。QRノードのノード番号を、ノードを識別するための添え字として使用することができる。したがって、「 QR_j 」は、番号 j の量子リピータノードを指す。このノード表記、番号付け、及び識別法は、本明細書全般を通じて使用されている。

【0042】

図3Bには、3つの既存のエンタングルメント36、37、38が、それぞれのノード対の量子ビット間に示されている。便宜上、一連のノードに沿ったエンタングルメントを高レベルで参照するときには、本明細書では、特定のエンタングルメントは、量子ビット（これらの量子ビットの間にエンタングルメントが存在する）を保持しているノード対を参照することによって識別され、この参照は、2つの構成要素のノード番号からなる組の形態をとる。したがって、 $(N-1)$ と N という番号が付された近傍ノードにある量子ビット間のローカルリンクエンタングルメントLLEであるエンタングルメント38を、ノード番号の組 $\{(N-1), N\}$ によって識別できる。（図3Bで中程度の厚さの線で描かれた弧によって示されている）エンタングルメント36と37は、それぞれ、ノード対 $\{1, j\}$ と $\{j, (N-1)\}$ の量子ビット間に存在する拡張されたエンタングルメントであり、これらのエンタングルメントは、LLEを結合することによって生成されたものである。左側と右側の端部ノード31、32の量子ビット間のエンドツーエンド（本明細書では「E2E」と略記される）のエンタングルメント（図3Bの厚い線で描かれた弧39を参照）を生成するために、まず、エンタングルメント36と37を QR_j によって結合（マージ）し、次に、その結果生じた拡張されたエンタングルメントを $QR_{(N-1)}$ によってLLE38と結合（マージ）することができる。代替的には、まず、エンタングルメント37と38を $QR_{(N-1)}$ によって結合（マージ）し、次に、その結果生じた拡張されたエンタングルメントを QR_j によってエンタングルメント36と結合（マージ）することができる。

【0043】

エンタングルメント構築経路

エンタングルメントの「エンタングルメント構築経路」（EBP）は、拡張されていないエンタングルメントまたは拡張されたエンタングルメントの生成において使用される1つまたは複数の媒介する光場が通る全量子ビット間経路である。複数の経路セグメントがある場合（すなわち、経路が3つ以上の量子ビットを含んでいる場合）には、図3BのE2Eエンタングルメントを構築する方法の検討から明らかのように、光場は、必ずしも、それらのそれぞれのセグメントを順にたどる必要はない（図3Bの例では、エンタングルメント構築経路は、一連の量子リピータの左側と右側の量子ビットを介する、一方の端部ノードから他方の端部ノードまでの経路である）。

【0044】

低レベル量子物理的ハードウェアの表現

量子ビットの物理的実現の特定の形態、並びに、エンタングルメント、延長、及びマージ操作を実行する方法の細部（たとえば、非常に少量の光を使用するか、多くの光子からなるレーザーパルスを使用するか）は、本発明には直接関係しないので、これらについては本明細書ではこれ以上説明しないが、それらの適切な実施例は当業者には既知である。その代わりに、量子操作を実施するための物理的ハードウェア（「量子物理的ハードウェア」）を、本明細書において「Q-ブロック」と呼ぶ基本的なブロックに関して説明する。この量子物理的ハードウェアは、1つの量子ビット及び関連する光学的構成体の実施、並びにそれらとの相互作用を提供する。

【0045】

図4は、それぞれ、40、42、44で参照される3つのタイプのQ-ブロックを示している。

【0046】

Q-ブロック40は、量子ビットを具現化（または明らかに）し、及び、該量子ビットとの図1Aの「捕捉」相互作用を実行する、すなわち、予め準備された（もしくは決められた）状態にある該量子ビットを通過するように光場の伝送を制御するために必要な物理

10

20

30

40

50

的ハードウェアを表している。このタイプのQ - ブロック（本明細書では、「捕捉Q - ブロック」と呼び、図面では「Q - ブロック（C）」と略記されている）は、量子ビット10及び光場放射源12、並びに適切な光学的配管（光導波路など）からなる物理的構成、量子ビットを予め決められた状態にし、及び、光場が入ることを許可されているとき以外は（たとえば、電気光学シャッターを用いて）該量子ビットに光場が当たらないようにする機能、（対象としている量子ビットの実現に適切な場合に）必要に応じて電子スピンから核スピンに（及びこの逆へと）量子ビット状態を移行させる機能、及び、「Fire（始動）」信号41を受信したときに、捕捉Q - ブロックの動作を、その量子ビットを光場が通過するように（及び、該Q - ブロックの外へ送るように）調整する制御機能を備える。

【0047】

Q - ブロック42は、量子ビットを具現化（または明らかに）し、及び、該量子ビットとの図1Aの「移行」相互作用を実行する、すなわち、予め準備された（もしくは決められた）状態にある該量子ビットを通過するように受け取った光場を伝送させた後該光場を測定するために必要な物理的ハードウェアを表している。このタイプのQ - ブロック（本明細書では、「移行Q - ブロック」と呼び、図面では「Q - ブロック（T）」と略記されている）は、量子ビット10及び光場検出器13、並びに適切な光学的配管（光導波路など）からなる物理的構成、（たとえば、先駆光パルス6にตอบสนองして）量子ビットを予め準備された状態にし、及び、光場が入ることを許可されているとき以外は（シャッターなどを用いて）該量子ビットに光場が当たらないようにする機能、（対象としている量子ビットの実現に適切な場合に）必要に応じて電子スピンから核スピンに（及びこの逆へと）量子ビット状態を移行させる機能、及び、移行Q - ブロックの動作を調整し、及び、測定結果43を出力する制御機能を備える。

【0048】

Q - ブロック44は、捕捉Q - ブロック40及び移行Q - ブロック42の両方のタイプの機能を組み込んでいる包括形態のQ - ブロックであり、そのため、捕捉と移行の両方の相互作用を実行するのに使用することができる。便宜上、このタイプのQ - ブロックを、本明細書では、修飾文字が何も付かない「Q - ブロック」として参照し、捕捉Q - ブロック40または移行Q - ブロック42を使用することについて何らかの特定の指摘がされない限り、（実際には、関連する文脈において該Q - ブロックが捕捉と移行の両方の相互作用機能を含んでいる必要はない場合であっても）通常参照されるのはこのタイプのQ - ブロックである。当業者には、このような場合を認識すること、及び、現在の文脈中のQ - ブロックによって要求されているのが捕捉のための相互作用（以下、捕捉相互作用という）機能が移行のための相互作用（以下、移行相互作用という）機能かを識別することに何の困難もないであろう。Q - ブロックが捕捉タイプであるか移行タイプであるかに関してより具体的に指定しない1つの理由は、協働するQ - ブロックが（一方のQ - ブロックのタイプとは異なる）他方のタイプのものである場合には、いずれのタイプも使用できることが多いからである（それらのタイプの間の光場の伝送方向は重要ではない）。

【0049】

タイプに関係なく、全てのQ - ブロックは、X_{meas}（X測定）信号45の受信にตอบสนองしてX測定を実行し、これによって、該Q - ブロックを延長及びマージ操作において使用できるようにする機能を含む。この場合、X測定の結果はResult（結果）信号43で提供される。Q - ブロックが移行相互作用機能を有する場合には、X測定機能は、典型的には、移行相互作用機能に関連付けられている検出器2を使用する。もちろん、X測定機能はエンタングルメント操作には必要ではなく、したがって、X測定機能をそのような操作のためにのみ使用されるQ - ブロックから省くことができる。

【0050】

1つのノードに複数のQ - ブロックがある場合には、Q - ブロック間でいくつかのコンポーネントを共有する機会があることに留意されたい（たとえば、捕捉相互作用機能を有する複数のQ - ブロックがある場合には、共通の光場放射源を、そのような全てのQ - ブロックに使用することができる）。当業者には、そのようなコンポーネントの共有が可能

10

20

30

40

50

である場合が理解されよう。

【 0 0 5 1 】

エンタングルメント操作は、移行相互作用機能を有するQ - ブロック (移行Q - ブロック 4 2 または包括的Q - ブロック 4 4) に光学的に結合された、捕捉相互作用機能を有するQ - ブロック (捕捉Q - ブロック 4 0 または包括的Q - ブロック 4 4) を含み、エンタングルメント操作は、捕捉相互作用機能を有するQ - ブロックにFire信号 4 1 を送ることによって開始され、該操作の成功 / 失敗は、移行相互作用機能を有するQ - ブロックによって出力される結果信号 4 3 で示される。

【 0 0 5 2 】

延長操作が実行される場合には、該延長操作の最初のエンタングルメント操作コンポーネントもまた、捕捉相互作用機能を有するQ - ブロック及び移行相互作用機能を有するQ - ブロックを含む。全てのタイプのQ - ブロックがX測定機能を備えているので、エンタングルメントからの中間にある量子ビットのその後の除去を、この量子ビットを実装 (または実現) しているQ - ブロックにXmeas信号を送信することによって実行することが可能である。この場合、測定結果は、このQ - ブロックによって出力される結果信号 4 3 で提供される。

10

【 0 0 5 3 】

マージ操作が実行される場合にも、捕捉相互作用機能を有するQ - ブロック及び移行相互作用機能を有するQ - ブロックが必要である。この場合も、全てのタイプのQ - ブロックがX測定機能を備えているので、マージ操作に伴うエンタングルメントからの1または複数の量子ビットの除去が可能である。測定結果は、適切なQ - ブロックによって出力される結果信号 4 3 で提供される。

20

【 0 0 5 4 】

図 5 は、それぞれのQ - ブロック 4 4 を用いて実施された図 2 のLLE生成サブシステム 2 5 を示す。それぞれのQ - ブロック 4 4 は、各ノード 2 1 及び 2 2 に設けられており、それらのQ - ブロック 4 4 は、ローカルリンクファイバー 2 3 を介して光学的に結合される。各Q - ブロック 4 4 は、ノード 2 1 のLLE制御ユニット 5 3 及びノード 2 2 のLLE制御ユニット 5 4 によって形成された関連する制御ロジックを有している。図 5 に示されているQ - ブロック 4 4 は包括タイプであるので、エンタングルメントの生成に伴う光場のローカルリンクファイバー 2 3 に沿った伝送方向は固定されていない。したがって、ノード 2 1 のQ - ブロック 4 4 は捕捉Q - ブロックとして、ノード 2 2 のQ - ブロック 4 4 は移行Q - ブロックとして、それぞれ機能することができ、あるいは、ノード 2 1 のQ - ブロック 4 4 は移行Q - ブロックとして、ノード 2 2 のQ - ブロック 4 4 は捕捉Q - ブロックとして、それぞれ機能することができる。

30

【 0 0 5 5 】

図 5 のLLE生成サブシステム 2 5 において、それぞれのQ - ブロック 4 4 は、ローカルリンクファイバー 2 3 に単に直接結合されている。しかしながら、多くの場合、ノードの現在の操作上の要件に依存して、光場を該ノードの1つまたは複数のQ - ブロックへと / 該Q - ブロックから適切に導くために、該ノードに制御可能な光学的構成体 (optical fabric: 光ファブリックともいう) を設ける必要がある。たとえば、同じ外部ファイバーを共有するノードに複数のQ - ブロックがある場合には、光学的構成体は、出ていく光場をその共通のファイバーに結合するか、または、入ってくる光場を該ファイバーから選択されたQ - ブロックに導くことが必要になる場合がある。別の例では、光学的構成体は、 (図 3 A のノード 3 0 などの) 量子リピータノードにおいて、L側のQ - ブロック及びR側のQ - ブロックを、LLEを生成するためのそれぞれの左側及び右側のローカルリンクファイバーとの光学的な接続状態から、局所的なマージ操作のための互いに光学的に接続された状態へと切り替えることが必要になる場合がある。

40

【 0 0 5 6 】

したがって、一般的には、ノードの量子物理的ハードウェア、すなわち、量子ビット、並びに、光場を介した量子ビットの相互作用を実施してサポートする物理的構成要素は、

50

1以上のQ-ブロックだけでなく、1または複数のQ-ブロックが効果的に埋め込まれた光学的構成体を備える。1例として、図6に、量子リピータノードのそのような表現の1つを示す。図6では、量子物理的ハードウェア60は、光場をQ-ブロック44へと/該Q-ブロック44から導くための光学的構成体61を備えるものとして示されており、該Q-ブロック44は、光学的構成体61内に存在するものとして示されており、ローカルリンクファイバー62、63は、該光学的構成体に直接結合されている。1つのL側Q-ブロックと1つのR側Q-ブロックが実線の外形で図示されており、設けることが可能な他のL側Q-ブロック及びR側Q-ブロックが破線の外形でそれぞれ図示されている。

【0057】

本明細書で使用されている、(量子リピータに関して図6に示されている具体例などの)上記の一般化された量子物理的ハードウェア表現の任意の具体例は、含まれるQ-ブロックの数及びタイプ並びにそれらの意図された役割に適した実施例であって、対象とする量子物理的ハードウェアの可能性のある全ての実施例を含むことが意図されている。(図6は、Q-ブロックをQ-ブロック44、すなわち包括タイプのものとして示しているが、これは、単に、全ての可能性のある実施例を含むようにするためであり、量子リピータ中のQ-ブロックが果たす役割の要件ではないことに留意されたい。特定の具体例は、Q-ブロックの役割に応じた適切なQ-ブロックの他のタイプを使用することができる。上記の一般化された量子物理的ハードウェア表現におけるQ-ブロック44をそのように使用することは、量子リピータ用の量子物理的ハードウェアの図6の表現には限定されない)。

【0058】

量子物理的ハードウェアによって実行されることになる量子操作に依存して、該ハードウェアは、種々の制御信号を受信して結果信号を出力するように構成乃至配置される。量子リピータに適した図6の量子物理的ハードウェアブロック60の場合には、該量子物理的ハードウェアは、エンタングルメント生成操作を制御するための「始動制御(firing control)」信号64及び「ターゲット制御」信号65を受信し、マージ操作を制御するための「マージ」信号67を受信し、及び、それらの操作の結果を示す「結果」信号66を出力するように構成乃至配置される。これらの信号64~67を、特定のQ-ブロックを示すようにパラメータ化することができる。後述の説明から明らかになるように、いくつかの量子リピータの実施形態では、ターゲット制御信号は必要ではない。図6の量子物理的ハードウェア60の1実施例では、始動制御信号64は、

- ・捕捉相互作用機能を有する1つ以上のQ-ブロックをローカルリンクファイバーの1つに光学的に結合するように、光学的構成体61を(まだそのように構成されていない場合には)適切に構成するためのセットアップ信号と、

- ・捕捉相互作用機能を有する1つ以上のQ-ブロックによって光場の生成を起動するための上述した1つまたは複数の「Fire(始動)」信号

の両方を含み、ターゲット制御信号65は、

- ・移行相互作用機能を有するQ-ブロックをローカルリンクファイバーの1つに光学的に結合するように、光学的構成体61を(まだそのように構成されていない場合には)適切に構成するためのセットアップ信号

を含む。さらに、この実施例では、マージ信号66は、

- ・量子リピータのL側及びR側のQ-ブロックを要するマージ操作を実行するように、光学的構成体61を(まだそのように構成されていない場合には)適切に構成するためのセットアップ信号、

- ・最初のマージ操作プロセスを起動するための「Fire(始動)」信号、及び、

- ・図1Cのマージ操作の形態が実行される場合には、第2のマージ操作プロセスを形成するX測定を始動させるための1以上のXmeas信号

を含む。

【0059】

延長操作を実行することが意図されている量子物理的ハードウェアの場合は、(延長操

10

20

30

40

50

作のエンタングルメント生成コンポーネントを動作させるための) 始動制御信号を受信するだけでなく、結果信号を出力するようにも構成乃至配列されている該量子物理的ハードウェアは、X測定を始動させるためのXmeas信号を受信するようにさらに構成乃至配列され、これによって、延長操作を遂行することができる。

【0060】

ノードの光学的構成体はデフォルトの構成を有することができる。たとえば、図6の量子物理的ハードウェア60が、L側Q-ブロック及びR側Q-ブロックをそれぞれ1つだけ備えている場合には、光学的構成体61を、デフォルト時には、それらのQ-ブロックをローカルリンクファイバーの各々に光学的に結合するLLE生成構成をなすように構成乃至配列することができる。この場合、マージ信号66は、マージ操作を実行するのに要する時間の間、2つのQ-ブロックをほんの一時的に互いに光学的に結合するように構成される。このような場合には、ターゲット制御信号65を完全に省くことができ、始動制御信号64は、適切なQ-ブロックに送られるFire(始動)信号だけを含む。

10

【0061】

量子リピータの実施形態の一般形態

図7は、以下で説明する量子リピータの実施形態の一般的な形態を示す。

【0062】

より具体的には、量子リピータ70は、図6に関して上述した形態の量子物理的ハードウェア60を備え、かつ、1以上の左側及び右側のQ-ブロック44、それぞれの光インターフェース76L、76Rを介して左側及び右側のローカルリンクファイバー62、63に結合された光学的構成体61を含む。既に述べたように、便宜上及び限定することなく、(特に明示しない限り)LLE生成に関わる光場は、ノード間のローカルリンクファイバーに沿って左から右へと移動するものとみなされ、これによって、図7のリピータ70の(1以上の)右側Q-ブロックは、(右側の近傍ノード(不図示)における(1以上の)左側Q-ブロックと共に右側のLLE生成サブシステム71Rを形成する)LLE生成の間(1以上の)捕捉Q-ブロックとして動作し、リピータ70の(1以上の)左側Q-ブロックは、(左側の近傍ノード(不図示)における(1以上の)右側Q-ブロックと共に左側のLLE生成サブシステム71Rを形成する)LLE生成の間(1以上の)移行Q-ブロックとして動作する。

20

【0063】

右側のLLE(R-LLE)制御ユニット73は、LLE生成に関して(1以上の)右側Q-ブロックの始動を(適切な場合には)選択して、該始動を作動させる始動制御信号を生成する役目がある。左側のLLE(L-LLE)制御ユニット72は、適切な場合には、LLE生成に参加乃至関与する(1以上の)左側Q-ブロックを選択するためのターゲット制御信号を生成する役目があり、L-LLE制御ユニット72はまた、量子物理的ハードウェア60から、左側Q-ブロックを伴うLLE生成操作の成功/失敗を示す結果信号を受信するように構成乃至配置されている。

30

【0064】

したがって、(R-LLE制御ユニット73は、右側のLLEの生成に関わる右側Q-ブロックのためにFire信号を生成する役目があるので)右側のLLE生成は、リピータ70のR-LLE制御ユニット73の制御下で有効に開始されるが、左側のLLE生成は、左側の近傍ノードにおけるR-LLE制御ユニットの制御下で有効に開始されることが理解されよう。

40

【0065】

古典的なLLE制御(「LLEC」)通信チャンネル74によって、L-LLE制御ユニット72と左側の近傍ノードのR-LLECユニット(すなわち、L-LLE制御ユニット72と同じLLE生成サブシステム71Lに関連するR-LLE制御ユニット)は互いに通信することができ、L-LLECユニット72は、LLECチャンネル74を用いて、LLE生成の成功/失敗メッセージ(図1のメッセージ15)を左側の近傍ノードのR-LLE制御ユニットに渡す。

【0066】

古典的なLLE制御(「LLEC」)通信チャンネル75によって、R-LLE制御ユニット73と

50

右側の近傍ノードのL-LLE制御ユニット（すなわち、R-LLE制御ユニット73と同じLLE生成サブシステム71Rに関連するL-LLE制御ユニット）は互いに通信することができ、R-LLE制御ユニット73は、右側の近傍ノードのL-LLE制御ユニットから、LLECチャンネル75を介して、LLE生成の成功/失敗メッセージ（図1のメッセージ15）を受け取る。

【0067】

本明細書では、LLECチャンネル74、75上のメッセージを「LLEC」メッセージと呼ぶ。

【0068】

LLE生成に関わる光場が、ノード間のローカルリンクファイバーに沿って（左から右ではなく）右から左に移動するように作動乃至構成されている場合には、左側LLE制御ユニット72と右側LLE制御ユニット73の役割が逆になることが理解されよう。

10

【0069】

マージ制御（「MC」）ユニット77は、マージすべき局所的なQ-ブロック（ローカルQ-ブロック）を適切な場合には選択して、それらのマージを起動するマージ信号を生成する役目を有する。MCユニット77はまた、量子物理的ハードウェア60から、マージ操作の成功/失敗及びパリティを示す結果信号を受信するように構成されている。

【0070】

古典的なマージ制御（「MC」）通信チャンネル78、79によって、MCユニット77と左側及び右側の近傍ノードの対応するユニットとが互いに通信することができ、これによって、マージ操作に関するパリティ情報、及び、必要な場合には、マージ操作に関する成功/失敗情報を渡すことが可能である。本明細書では、MCチャンネル78、79上のメッセージを「MC」メッセージと呼ぶ。

20

【0071】

LLEC通信チャンネル74、75及びMC通信チャンネル78、79を、任意の適切な高速通信接続（無線通信など）によって提供することができるが、それらは、光ファイバーを介して光信号として伝送されるのが好ましい。より具体的には、LLEC通信チャンネル74、75及びMC通信チャンネル78、79を、それぞれの専用の光ファイバーで伝送することができ、または、同じファイバーで多重伝送することができる（多重伝送するファイバーは、近傍ノード中のQ-ブロックを光学的に結合するローカルリンクに使用されるファイバーとすることができ、たとえば、パリティ情報だけがMC通信チャンネルで送られる場合には特に、MC通信チャンネルを、先駆信号79の強度（もしくは輝度）変調として実施することができる）。より一般的には、LLEC及びMC通信チャンネルを結合して1つの古典的な全二重通信チャンネルにすることができる。

30

【0072】

後述する実施形態では、LLEC通信チャンネル74、75は、ローカルリンクファイバーによって伝送され、MC通信チャンネル78、79は、左-右（「LR」）チャンネル及び右-左（「RL」）チャンネルに分割され、これら2つのMCチャンネルは、該ローカルリンクのために使用される光ファイバーとは異なるそれぞれの光ファイバーによって伝送される。本明細書では、LR MCチャンネル及びRL MCチャンネル上のメッセージをそれぞれ、「LR-MC」メッセージ、「RL-MC」メッセージと呼ぶ。かかるチャンネル及びファイバーの構成は単なる例示であって、他の構成を代わりに使用できることが理解されよう。

40

【0073】

一連の量子リピータによって結合された端部ノードの各々は、近傍の量子リピータの対面する側（右側または左側）と相互に作用するための機能を有することに留意されたい。したがって、左側の端部ノードは、量子リピータの右側の機能に類似する機能を含み、それによって、左側の端部ノードが、近傍のリピータの左側と相互に作用することができるようにしている。また、右側の端部ノードは、量子リピータの左側の機能に類似する機能を含み、これによって、右側の端部ノードが近傍のリピータの右側と相互に作用できるようにしている。

【0074】

50

エンタングルメントパリティに関しては、後述する実施形態では、量子ビットの状態を反転することによってエンタングルメントのパリティを統一乃至標準化するのではなく、各量子リピータにおいて、LLEパリティ情報を格納して、その後、端部ノードへと累積的に伝送するためにマージパリティ情報と結合し、これによって、該端部ノードが、エンドツーエンドのエンタングルメントのパリティを決定することができるようにしている、

【0075】

量子リピータの実施形態の以下の説明では、図7の一般的な図で使用されているのと同じ参照番号が、主な量子リピータの構成要素について使用されているが、それらの構成要素の特定の実施例は一般的に異なることが理解されよう。

【0076】

「同期化された」量子リピータの実施形態

図10及び図23にそれぞれ示す第1、第2の量子リピータの実施形態はいずれも、「同期化」ベースで動作して、一連のノードの左側の端部ノードと右側の端部ノードにおける量子ビット間のエンドツーエンド(E2E)エンタングルメントを構築する。この場合、該一連のノードの中間ノードは量子リピータである。「同期化」ベースでのE2Eエンタングルメントの構築は、一連の量子リピータ中の全てのリピータを時間同期させることを含む(該時間同期は、たとえば、GPS衛星群から取得されたタイミングによって、または、リピータ間で送信される信号によって該リピータ中の位相ロックループ用クロックによって行うことができる)。リピータ間の信頼性のあるLLE生成サブシステムも必要とされる(この文脈では、「信頼性がある」とは、後続の動作期間において高確率で利用できるLLEを生成できることを意味している)。

【0077】

量子リピータの連続する同期化された動作サイクルの各々中に、各リピータは、右側LLEを生成し(または、以前に生成された右側LLEを利用し)、これによって、LLEが全てのリピータ間で有効に利用可能になり、その後、全てのリピータはマージ操作を実行する。この場合、全てのマージが成功したならば、その結果、E2Eエンタングルメントが生成される。

【0078】

図3と同じ表記を使用している図8は、右側及び左側の端部ノード81、82及び3つの量子リピータ80(QR₂、QR₃、QR₄)からなる一連のノードをなす5つの光学的に結合されたノードについて連続する4つの動作サイクルを示している。但し、明瞭化のためにノードを結合する光ファイバーは省略されている。4つの動作サイクルにはそれぞれ $i \sim i+3$ がラベル付けされている。最初の3つのサイクル i 、 $i+1$ 、 $i+2$ については、近傍ノードの対間でLLE(弓形の矢印85)が成功裏に生成され、その後それらのLLEがマージされてE2Eエンタングルメント(弓形の太線の矢印87)が形成される。しかしながら、4番目のサイクル $i+3$ については、第1のノードと第2のノードの対間、第2のノードと第3のノードの対間、第4のノードと第5のノードの対間でそれぞれLLEが成功裏に生成されているが、第3のノードと第4のノード間ではLLEの生成は失敗しており(この失敗は、×印が付いた破線の矢印88で示されている)、これによって、動作サイクル $i+3$ におけるLLEのマージは、E2Eエンタングルメントの生成に失敗している。

【0079】

上記の動作サイクルは、正確には、全体としてはノードチェーンの動作サイクル(以下では「E2E動作サイクル」と呼ぶ)であり、各サイクルは、1つのE2Eエンタングルメントを生成するために近傍ノードの全ての対間に確立されたLLEのマージを含む。各E2E動作サイクルはまた、各リピータの最上位の動作サイクルに時間的に対応しており、そのようなリピータのそれぞれの最上位の動作サイクルは一般的に1つのマージ操作を含んでいる。近傍ノードの各対間に1つのLLE生成サブシステムだけが存在する場合には、かかるLLE生成サブシステムの各々の動作サイクル(「LLE生成サブシステム動作サイクル」)はまた、E2E動作サイクル(及び、リピータの最上位の動作サイクル)に時間的に対応し、こ

10

20

30

40

50

の場合、LLEは、E2Eエンタングルメントと同じレート（速度または割合。以下同じ）で近傍ノードの対間に生成される。

【0080】

しかしながら、第2の量子リピータの実施形態に関連して後述するように、近傍ノードの各対間に複数のLLE生成サブシステムを提供して、ノード間におけるLLE生成のレートを高め、これによって、それに応じて高められたレートでE2Eエンタングルメントを生成して実質的にE2E動作サイクル（及び、リピータの最上位の動作サイクル）を短くすることができる。この場合、LLE生成サブシステム動作サイクルは、典型的には、E2E動作サイクル（及び、リピータの最上位の動作サイクル）よりも長い（及び、通常は、該E2E動作サイクル乃至リピータの最上位の動作サイクルの整数倍である）。このように動作するように構成された量子リピータは、LLE生成サブシステム動作サイクルによって決定されたタイミングにしたがってLLE生成を実行するが、E2E動作サイクルによって決定されたタイミングにしたがってマージ操作を実行する。本明細書では、記号 τ は、常にE2E動作サイクルを意味するものとして使用される。

10

【0081】

量子リピータの（最上位の動作サイクルとは対照的な）全動作サイクル、すなわち、リピータの全ての構成要素について実質的に同じ状態で開始及び終了する動作サイクルは、典型的には、LLE生成サブシステム動作サイクルに時間的に対応乃至合致しており、かつ、複数のE2E動作サイクルを含む場合があるが、以下の説明では、量子リピータの動作サイクル全体を特別に参照することなく、一般的に、E2E動作サイクル及びLLE生成サブシステム動作サイクルの観点で表現されている。

20

【0082】

第1及び第2の量子リピータの実施形態を詳細に説明する前に、「同期化」ベースで動作する量子リピータで使用するのに適したLLE生成サブシステムの形態、すなわち、連続する動作期間において高い成功確率でLLEを生成できる形態について検討しておく。もちろん、複数の始動のための十分に長い動作期間が確保されている場合、及び/または、好適な動作条件（たとえば、ノード間の距離が短い）下にある場合には、図5に示されているような単純なLLE生成サブシステム（または、該形態が複数並列配置されたサブシステム）であっても、高い確率でLLEを生成することができ、かつ、そのような環境において「同期化」ベースで動作する量子リピータで使用できるであろう。しかしながら、ノード間の距離が数キロメートルにも及び、かつ、動作期間が 10^{-6} 秒のオーダーである場合には、図5に示されている単純なLLE生成サブシステムが適切である可能性は低い。一方、図9を参照して以下で説明するLLE生成サブシステムははるかに高い信頼性を提供する。

30

【0083】

「始動構成部」LLE生成サブシステム

図9は、ローカルリンクファイバー95によって光学的に結合されている2つのノード91、92間に形成されたLLE生成サブシステム90の「始動構成部（firing squad）」の構成を示す。

【0084】

ノード91は、LLE制御ユニット910、捕捉相互作用機能を有する（識別番号1～fがそれぞれ付されている）f個のQ-ブロック93によって形成された量子物理的ハードウェア、及び、光マージユニット96を備える。（本明細書では「フュージリア（fusilier）」Q-ブロックと呼ぶ）Q-ブロック93は全体で、「始動構成部」97を形成する。ノード92は、LLE制御ユニット920、及び、移行相互作用機能を有する1つのQ-ブロック94によって形成された量子物理的ハードウェアを備える。ノード91の始動構成部97のフュージリアQ-ブロック93は、光マージユニット96及びローカルリンク光ファイバー95を介して、ノード92の該1つのターゲットQ-ブロック94に光学的に結合されている。したがって、始動構成部97の全てのQ-ブロック93は、同じターゲットQ-ブロック94を始動させるためのものであることが理解されよう。

40

50

【 0 0 8 5 】

ノード 9 1 の LLE 制御ユニット 9 1 0 が、LLE 生成操作を起動するためにその量子物理的ハードウェアに Fire (始動) 信号を出力すると、始動構成部 9 7 のフュージリア Q - ブロック 9 3 が順次 (連続的に) 始動させ、放出された光場が、マージユニット 9 6 を通って光場列 9 8 としてファイバー 9 5 を進む。フュージリア Q - ブロックの識別番号と、光場が該光場列に現れる順番との間には既知の規則的な関係があることに留意されたい。各光場の前をそれ自体の先駆信号 (または先駆光信号。以下同じ) が進むのではなく、1 つの先駆信号 9 9 が光場列 9 8 の前を進んで、ターゲット Q - ブロック 9 4 に、(該先駆信号の到着後) すぐに列 9 8 が到着することを知らせるようにするのが好ましい。この場合、先駆信号 9 9 は、Fire 信号に応答して、フュージリア Q - ブロック 9 3 が始動する前に、放射源 9 9 0 によって生成される。

10

【 0 0 8 6 】

光場の各々がノード 9 2 のターゲット Q - ブロック 9 4 に順次 (及び連続的に) 到達すると、ターゲット Q - ブロックのシャッターが短時間だけ開いて、光場がターゲット Q - ブロックの量子ビットを通過して、該量子ビットと (潜在的に) 相互作用できる (該量子ビットと相互作用できる可能性を提供する) ようにする。その後、光場を測定して、エンタングルメントが生成されたか否かを判定する。エンタングルメントが生成されていない場合には、ターゲット Q - ブロック 9 4 の量子ビットはリセット (再設定) されて、列 9 8 の次の光場を通過させるのに適したタイミングでシャッターを再度開く。一方、列 9 8 の光場の通過によってエンタングルメントが生成された場合には、ターゲット Q - ブロックの (光場を遮るために) シャッターは閉じたままであり、列 9 8 からの光場はもはやターゲット Q - ブロック 9 4 の量子ビットと相互作用できない。Q - ブロックシャッターの測定結果に依存するかかる制御は、論理的には、ターゲット Q - ブロック 9 4 に関連付けられている LLE 制御ユニット 9 2 0 の一部であるが、実際には、量子物理的ハードウェアに組み込まれた低レベル制御要素によって、該制御を最良に実行することができる。

20

【 0 0 8 7 】

列 9 8 内の光場の間隔は、次の光場が到着する前に、光場によってターゲット量子ビットが成功裏にエンタングルされたか否かを判定し、該ターゲット量子ビットをリセットし、及び、Q - ブロックのシャッターを開くのに十分な時間を確保できるものとすべきであることが理解されよう。

30

【 0 0 8 8 】

実際には、ターゲット量子ビットをエンタングルさせる役目を担う光場に後続する光場のターゲット量子ビットとの破壊的 (たとえば弱め合う) 相互作用を防止するために明示的なシャッターを用いる代わりに、エンタングルメントの直後に量子ビットの状態を電子スピンから核スピンに移行させて、後続の光場の通過が捕捉されたエンタングルした状態を妨害しないようにする (ターゲット量子ビットを光場との相互作用に対して安定化させる) ことによって、同じ効果を達成することが可能である。エンタングルメントの前に入ってくる外部光を排除するためにシャッターを設けることが依然として適切でありうるが、先駆信号が検出されるまでは量子ビットは予め準備された状態には設定されないので、通常はそのようなシャッターを省くことができる。

40

【 0 0 8 9 】

LLE 制御ユニット 9 2 0 はまた、列中のどの光場が Q - ブロック 9 4 のターゲット量子ビットと成功裏にエンタングルしたかを識別し、これによって、ターゲット Q - ブロックの量子ビットとエンタングルしたフュージリア Q - ブロック 9 3 (したがってその量子ビット) を識別できるようにするための機能を有する (上述したように、フュージリア Q - ブロックの識別番号と列中に光場が現れる順番との間には既知の関係がある) 。たとえば、ターゲット Q - ブロックに入った光場を単に数えて、この数を、「成功」形式のメッセージ 9 3 0 で、LLE 制御ユニット 9 2 0 によってノード 9 1 に送り返すことができる。この場合、ノード 9 1 の LLE 制御ユニット 9 1 0 は、この数を成功したフュージリア Q - ブロック 9 3 の識別番号に変換するのに必要な任意の変換処理を実行し、その後、後で参照

50

するために、該識別番号をレジスタ195に格納する（この代わりに、フュージリアQ - ブロックの識別番号をすぐに送るにしてもよい）。もちろん、列98の光場の全てがエンタングルメントの生成に成功しなかった場合には、「失敗」形式のメッセージ930が返されて、対応する指標がレジスタ195に格納される。

【0090】

ターゲット量子ビットの成功したエンタングルメントについての測定結果に含まれているパリティ情報に関しては、このパリティ情報は制御ユニット920に送られ、該制御ユニット920は該パリティ情報を後で使用するために（たとえばレジスタ196に）記憶するか、または、該パリティ情報を、たとえばノード91にメッセージ930で伝えることができる。

10

【0091】

ノード91のフュージリアQ - ブロック93を順次始動させて光場の列98を生成する代わりに、全ての光場を一斉に放出し、異なる長さのファイバーを用いて各フュージリアQ - ブロックを光マージユニット96に接続し、これによって、異なる遅延を導入して光場列98を生成することにより、同等の結果を達成することができる。

【0092】

始動構成部97中のフュージリアQ - ブロック93の数は、始動構成部のそれぞれの始動において、ターゲットQ - ブロック94を成功裏にエンタングルする確率が非常に高くなるように（たとえば99%以上になるように）選択されるのが好ましい。より具体的には、1つのフュージリアQ - ブロックの1つの始動でエンタングルメントを成功裏に生成する確率を s とすると、 f 個のフュージリアQ - ブロックからなる始動構成部についての成功確率は、

20

$$\text{始動構成部成功確率} = 1 - (1 - s)^f$$

であり、したがって、 $s = 0.25$ で、フュージリアQ - ブロックが16個の場合の成功率は99%であり、フュージリアQ - ブロックが32個の場合の成功率は99.99%になる。典型的には、1つの始動（すなわち1つの光場列）でターゲット量子ビットを成功裏にエンタングルする望ましい確率 P_{success} から始めて、次に、次の不等式にしたがってフュージリア量子ビットの必要な数 f を決定する。

$$P_{\text{success}} \geq 1 - (1 - s)^f$$

【0093】

列98内の隣接する光場間の時間間隔は、後の光場が到着する前に、それより（時間的に）前の光場を測定し、ターゲット量子ビットをリセットし、そのシャッターを開くのに十分な時間を確保しつつできるだけ短くするのが有利である。1例としては、光場の時間間隔は1~10ナノ秒である。

30

【0094】

図9のLLE生成サブシステム90の形態の場合には、ターゲットQ - ブロック94は1つしかないので、実際には、最後に生成されたエンタングルメントが使い果たされるかまたはタイムアウトする（または使用を停止することによってサブシステム全体が解放されるまで、始動構成部97を再起動することはできないことが理解されよう。したがって、始動構成部97の起動間の最短時間は、ノード間のラウンドトリップタイム（すなわち、（光場列98がノード92に到達するのに要する時間）+（メッセージ930をノード91に返すのに要する時間）の最短時間）に、（たとえばマージ操作において）エンタングルメントを使い果たすのに要する時間を加えたものである。

40

【0095】

第1の「同期化された」量子リピータの実施形態（図10）

以下、図10を参照して第1の「同期化された」量子リピータの実施形態を説明するが、該量子リピータは、E2Eエンタングルメントが生成されることになる左側端部ノードと右側端部ノードの間の（ $N = 5$ の場合に図8に示されているように）一連の N 個のノードの中間ノードであるという状況で動作することが理解されよう。

【0096】

50

図10の量子リピータの一般的な形態は、図7に示す量子リピータの形態に対応しており、量子物理的ハードウェア60、光インターフェース76L、76Rを介して接続される左側ローカルリンクファイバー62と右側ローカルリンクファイバー63、左側LLE制御ユニット72及び右側LLE制御ユニット73、並びに、マージ制御ユニット77を備える。

【0097】

(図6に関して一般的に説明した)量子物理的ハードウェア60は、左側のLLE生成サブシステム71Lの一部を構成するL側(すなわち左側)ターゲットQ-ブロック94、

右側のLLE生成サブシステム71Rの始動構成部97を構成する複数のR側(すなわち右側)フュージリアQ-ブロック93、及び、

左側のローカルリンクファイバー62と右側のローカルリンクファイバー63に結合された光学的構成体61

を備える。

【0098】

左側及び右側のLLE生成サブシステム71L、71Rは、図9に示すLLE生成サブシステム90の形態と実質的に同様である。図11に図示しているように、左側のLLE生成サブシステム71Lは、

(a)リピータ100における、量子物理的ハードウェア60の上記L側要素(具体的には、図11において文字「Tg」を囲んでいるボックスによって示されているターゲットQ-ブロック94)、及び、パリティレジスタ196を有する左側のLLE(L-LLE)制御ユニット72

(b)左側のローカルリンクファイバー62、及び、

(c)左側の近傍ノード110Lにおける、フュージリアQ-ブロック93の始動構成部(図11において、文字「FS」を囲んでいるボックスによって示されている)、並びに、関連する光学的構成体及びLLE制御ユニット

を備える。右側のLLE生成サブシステム71Rは、

(a)リピータ100における、量子物理的ハードウェア60の上記R側要素(具体的には、図11においてボックス「FS」で示されている始動構成部97)、及び、フュージリアID(識別子)レジスタ195を有する右側のLLE(R-LLE)制御ユニット73、

(b)右側のローカルリンクファイバー63、及び、

(c)右側の近傍ノード110Rにおける、ターゲットQ-ブロック(「Tg」を囲んでいるボックス)、並びに、関連する光学的構成体及びLLE制御ユニット

を備える。

【0099】

図9のLLE生成サブシステム90のものと相補関係にある始動構成部及びターゲット部のかかる配列により、図12に示すように、複数の量子リピータ100(図12では、量子リピータj-1、j、j+1)を、近傍のリピータの全ての対の間に1つのLLE生成サブシステムが形成されるように光学的に直列に結合することができる(図12の量子リピータjは、左側近傍のリピータj-1と共にLLE生成サブシステム71Lを形成し、及び、右側近傍のリピータj+1と共にLLE生成サブシステム71Rを形成する)。

【0100】

近傍のノードの各対間にはLLE生成サブシステムが1つだけ存在するので、E2E動作サイクル及び最上位のリピータ動作サイクルはいずれも、時間の点では、LLE生成サブシステム動作サイクルに対応乃至合致する。したがって、図10の実施形態の説明の便宜上、「動作サイクル」という用語は、そのような限定(たとえば、「E2E」もしくは「LLE生成サブシステム」)が理解に役立つ場合以外は、限定なく使用される。また、記号は、E2E動作サイクルを具体的に指すものであると上記したが、図10の実施形態については、記号は、LLE生成サブシステム動作サイクルのインジケータ(指標)でもあると理解することができる。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 1 】

量子リピータ 1 0 0 の光学的構成体 6 1 は、LLE生成のために左側のローカルリンクファイバー 6 2 と右側のローカルリンクファイバー 6 3 にそれぞれ、L側 Q - ブロック 9 4 とR側 Q - ブロック 9 3 を結合するだけでなく、L側ターゲット Q - ブロック 9 4 をR側フュージリア Q - ブロック 9 3 のうちの選択された 1 つに選択的に光学的に結合し、これによって、それらの Q - ブロックの量子ビットに対して局所的なマージ操作を実施できるようにしている。

【 0 1 0 2 】

LLE生成の間、量子物理的ハードウェア 6 0 は、R側要素を制御するため（具体的には、始動構成部 9 7 を始動させるため）に、R-LLE制御ユニット 7 3 から始動制御信号を受信し、及び、L側ターゲット Q - ブロック 9 4 からL-LLE制御ユニット 7 2 へと結果信号（成功 / 失敗、パリティ、フュージリア識別情報）を出力する。局所的なマージ操作の場合は、量子物理的ハードウェア 6 0 は、マージ制御ユニット 7 7 からマージ制御信号（これらの信号は、マージに関与するフュージリア Q - ブロック 9 3 を選択し、及び、マージ自体を起動するためのものである）を受信し、マージ操作の結果に関する結果信号（成功 / 失敗、パリティ）をユニット 7 7 へと出力して戻す。

【 0 1 0 3 】

図 1 3 A 及び図 1 3 B は、Q - ブロック 9 3 及び 9 4 の特性に依存する光学的構成体 6 1 の 2 つの可能性のある実施例を示している。

【 0 1 0 4 】

図 1 3 A の光学的構成体の実施例は、フュージリア Q - ブロック 9 3 及びターゲット Q - ブロック 9 4 が包括的 Q - ブロック 4 4 （図 4 参照）である場合に適用できる。その場合には、左側のローカルリンクファイバー 6 2 は、包括的ターゲット Q - ブロック 9 4 の光入力部に直接接続され、この包括的 Q - ブロックの光出力部は、中間の光ファイバー 1 3 1 に光学的に結合される。能動性の光スイッチ 1 3 2 は、該中間の光ファイバー 1 3 1 を包括的フュージリア Q - ブロック 9 3 の入力に接続し、受動性の光マージユニット 1 3 3 は、フュージリア Q - ブロック 9 3 の出力を右側のローカルリンクファイバー 6 3 に渡す。LLE生成操作中は、ターゲット Q - ブロック 9 4 は移行相互作用用にセットアップされ（すなわち、設定乃至構成され）、左側のリンクファイバー 6 2 を介して入ってくる光場は、該ターゲット Q - ブロックへと送られ、フュージリア Q - ブロック 9 3 は捕捉相互作用用にセットアップされ、光マージユニット 1 3 3 はフュージリア Q - ブロック 9 3 を右側のローカルリンクファイバー 6 3 に結合する。マージ操作の場合は、ターゲット Q - ブロック 9 4 は捕捉相互作用用にセットアップされ、マージに関与するフュージリア Q - ブロックは移行相互作用用にセットアップされ（マージに関与するフュージリア Q - ブロックは、量子物理的ハードウェア 6 0 に送られるマージセットアップ信号において示されている）、光スイッチ 1 3 2 もまた、マージセットアップ信号によって設定されて、ターゲット Q - ブロック 9 4 をマージに関与するフュージリア Q - ブロック 9 3 に光学的に結合する。

【 0 1 0 5 】

図 1 3 B の光学的構成体の実施例は、ターゲット Q - ブロック 9 4 が移行 Q - ブロック 4 2 （図 4 参照）であり、フュージリア Q - ブロック 9 3 が捕捉 Q - ブロック 4 0 である場合に適用できる。その場合には、受動性の光マージユニット 1 3 5 は、フュージリア捕捉 Q - ブロック 9 4 の出力を 1 つのファイバーに送る。この場合、該 1 つのファイバーは、能動性の光スイッチ 1 3 6 によって、右側のローカルリンクファイバー 6 3 またはループバック光ファイバー 1 3 7 へと切り替えられる。受動性の光マージユニット 1 3 4 は、移行用ターゲット Q - ブロック 9 3 に対面する位置にあって、その入力側において左側のローカルリンクファイバー 6 2 及びループバック光ファイバー 1 3 7 に結合されている。LLE生成操作の場合には、光スイッチ 1 3 5 は、捕捉用フュージリア Q - ブロック 9 3 によって出力された光場を右側のローカルリンクファイバー 6 3 へと送るように設定される。マージ操作の場合には、光スイッチ 1 3 5 は、捕捉用フュージリア Q - ブロック 9 3

10

20

30

40

50

のうちの選択された1つによって出力された光場をループバックファイバー137に送るように設定される(関与するQ-ブロックは、量子物理的ハードウェア60に送られるマージセットアップ信号において示されている)。

【0106】

図10の検討に戻ると、LLE生成サブシステム71LのL側ターゲットQ-ブロック94に関連付けられている左側LLE制御ユニット72は、左側のLLECチャンネル74を介して、同じLLE生成サブシステムの始動構成部に関連付けられているLLE制御ユニット(この制御ユニットは左側の近傍ノードにある)と通信する。本実施形態では、左側のLLECチャンネル74は、光インターフェース76Lを介して左側のローカルリンクファイバー62に接続されて、L-LLE(すなわち左側のLLE)制御ユニット72から左側の近傍ノードのLLE

10

【0107】

同様に、LLE生成サブシステム71Rの始動構成部97のR側(右側)のフェージリアQ-ブロック93に関連付けられている右側LLE制御ユニット73は、右側のLLECチャンネル75を介して、同じLLE生成サブシステムのターゲット部に関連付けられているLLE制御ユニット(この制御ユニットは右側の近傍ノードにある)と通信する。右側のLLECチャンネル75は、光インターフェース76Rを介して右側のローカルリンクファイバー63に接続されて、右側の近傍ノードのLLE制御ユニットからR-LLE(すなわち、右側のLLE)

20

【0108】

マージ制御はマージ制御(MC)ユニット77によって実行され、該MCユニットには、量子物理的ハードウェアと接続して、マージ操作を開始し及び結果信号を返すだけでなく、L-LLE制御ユニット72及びR-LLE制御ユニット73と種々の信号をやりとりし、並びに、左側の光ファイバー78LR及び右側の光ファイバー79LRをそれぞれ伝搬する左-右マージ制御(LR-MC)チャンネル、及び、左側の光ファイバー78RL及び右側の光ファイバー79RLをそれぞれ伝搬する右-左マージ制御(RL-MC)チャンネルを介して送られるメッセージによって、他のノードのマージ制御(MC)ユニットと通信するように構成乃至配置されている。送信(Tx)及び受信(Rx)インターフェース101、102は、フ

30

【0109】

さらに詳細に後述するように、LR-MCチャンネルは、それぞれがE2E動作サイクルの各々に関連する累積的な失敗メッセージ及びパリティメッセージ(以下、それぞれ、累積失敗メッセージ、累積パリティメッセージともいう)を伝送し、RL-MCチャンネルは、それぞれがE2E動作サイクルの各々に関連する累積失敗メッセージを伝送する。マージ制御ユニット77は、局所的なマージ操作の実行を制御するだけでなく、それ自体のパリティ情報及び失敗情報を、LR-MCチャンネル及びRL-MCチャンネル上の適切な累積(的)メッセージに提供する機能を有する。

40

【0110】

図10の形態の地理的に離れた一連の量子リピータの同期動作を可能にするために、量子リピータ100は、他の同様乃至類似のリピータにおいて提供される類似のクロックと同期させることができるクロック103を含む。1組の量子リピータ100に同期クロックを提供する1つの方法は、各リピータから既知の距離にあるソース(発生源)から全てのリピータに共通のタイミング信号を送り、これによって、各リピータが、伝搬遅延を考慮して該タイミング信号を各リピータ自体で調整できるようにすることである。実際に、GPSシステムは、このタイプの非常に便利な同期システムを提供し、クロック103をそのようなシステムに基づくものとすることができる。GPSを使用することにおける1つの欠点は、GPSの信号は水中で利用するのは簡単ではなく、そのため、海底光ファイバーケーブル中に配置された量子リピータでは使用することができないことである。

50

【0111】

そこで、本発明では、量子リピータを含む一連のノードの一方の端部ノードから周期的に送信される同期信号に基づいてリピータのクロックを同期させるという別のアプローチを取る。近傍ノードの各対間の伝搬遅延を決定するために最初の較正が実施されていると想定する。この場合、あるノードの近傍から同期信号を受信する該ノードは、該信号が、(LLEを)開始する側の端部ノードにおける同期サイクルの開始時に該ノードの近傍ノードによって送信されたということに基づいて、次の同期サイクルの開始に対応乃至合致するタイミング(時点)を決定することができる。該ノードは、該ノードからみて(LLEを)開始する側の端部ノードから離れた側にある該ノードの近傍ノードにそのタイミングで同期信号を送るように構成されている。同期信号が一連のノード全体に伝搬するのに十分な数の同期サイクルが経過した後の全体的な結果は、全てのノードが、(LLEを)開始する側の端部ノードにおける各同期サイクルの開始タイミング(開始時刻)で同期信号を送信するということである。各ノードが同期サイクルの開始時刻を決定することができるので、それらは、ノードの内部動作のための共通のタイミングポイントとして使用される。好ましくは、同期化に対するこのアプローチは、受信した同期信号、及び、送信側の近傍ノードから受信した同期信号の伝搬遅延を考慮した位相ロックループ構成を用いて、各ノードの内部クロック103の動作を同期開始時刻に同期させることによって実施される。この場合、各ノードの内部動作は、クロック103ごとに(該クロックに同期して)出力されるタイミング信号を基準として実行され、これによって、何らかの理由で同期信号が失われた場合でも、ノードの内部動作が影響を受けないようになっている。

10

20

【0112】

より詳細に後述するように、本実施形態では、各動作サイクルは、全ての量子リピータ100の始動構成部97が、先駆信号99に後続する光場列98(図9参照)を関与しているLLE生成サブシステムのターゲットQ-ブロック94を含む近傍ノードに向けて送るように、該始動構成部97を起動することから(または該起動と共に)開始する。したがって、クロック同期を達成するための同期信号として先駆信号99を使用することは(必須ではないが)便利である。それゆえ、先駆信号99が関与しているLLE生成サブシステムのターゲット端部で受信されると、該先駆信号を抽出してノードの内部クロック103に渡して、(たとえば、上記の位相ロックループ構成を用いて)該内部クロックが他のノードのクロック103との同期を維持するようにする。したがって、本実施形態では、同期サイクルの周期はLLE生成サブシステム動作サイクルの周期に対応乃至合致する(但し、このことが必須であるわけではない)。さらに、クロック103の周期は、LLE生成サブシステム動作サイクルの周期と同じとされる(但し、この場合も、このことが必須であるわけではなく、たとえば、クロックを、LLE生成サブシステム動作サイクルの周期の1/4の周期で動作させることができる)。

30

【0113】

LLE制御ユニット72、73(したがってまた、量子物理的ハードウェア60)の動作、及び、マージ制御ユニット77の動作は、クロック103からそれらのユニットに送られるタイミング信号を基準に(時間的に)調整される。具体的には、クロック103は、各動作周期の開始時にサイクル開始タイミング信号を出力するように構成されており、このサイクル開始信号によって、R-LLE制御ユニット73によるFire信号(始動信号)の生成が起動されて、始動構成部97が起動され、これによって、先駆信号99が光場列98に先だって送られる。

40

【0114】

図10の実施形態では、動作サイクルの周期は、必然的に、近傍ノードの対間における光速による最大ラウンドトリップタイムと少なくとも同じである。なぜなら、1動作サイクル中、各対をなすノード間で光場列を送ることによって該各対間でLLEを生成しなければならず、及び、結果として生成されたLLEに関与したフェーザQ-ブロックの識別情報を、該光場列を送ったノードに返さなければならないからである。実際に、動作サイクルの周期は、エンタングルメントのマージなどのいくつかの他の動作サイクル処理を実

50

施し、及び、異なるノードにおけるクロック間のある程度の同期エラーを許容できるのに十分な量だけ、光速による最大ラウンドトリップタイムよりも長い必要がある。図10の実施形態の動作の説明を簡単にするために、動作サイクルの周期は、ノード間の光速による最大片道伝搬時間（以下、片道伝搬時間をノード間「移動時間」ともいう）の4倍であることが想定されている。上述したように、図10の実施形態についてより短い動作サイクルの周期が可能であり、たとえば、最大ノード間移動時間の2倍強にすることができる。

【0115】

図14は、図10の量子リピータの動作を説明するのに使用されるタイミング図である。 i 番目の動作サイクルは、 i で示されており、時刻 t_i と t_{i+1} の間にわたっている。説明の便宜上、動作サイクルのそれぞれを、期間Pである4つの等しい部分（4つの $1/4$ 部分）に分割する（及び、この例では、動作サイクルの周期は、最大ノード間移動時間の4倍に設定されているので、動作サイクルの $1/4$ の時間は、最大ノード間移動時間に合致する持続時間Pを有する）。

10

【0116】

個々の $1/4$ 動作サイクル部分は、中括弧内の4つの各 $1/4$ を識別する数字1、2、3、4が後続する動作サイクルの名称によって参照される。したがって、動作サイクル i の2番目の $1/4$ 部分は $i\{2\}$ として参照される。

【0117】

ある動作サイクル i にわたる図10の量子リピータの動作を図15を参照して説明する。図15は、該動作サイクルの各 $1/4$ の部分中において、リピータチェーン（複数の連結されたりピータからなる一連のリピータ）中の2つの近傍の量子リピータ100によって、及び、該2つの量子リピータ100の間に形成されたLLE生成サブシステムの1例であるLLE CSS 150において起こることを示している。LLE生成サブシステムであるLLE CSS 150は、ノードチェーン（複数の連結されたノードからなる一連のノード）における最大移動時間（この時間は、ここでは、クロックの $1/4$ の周期（期間）Pと同じである）に相当する距離だけ隔置されたそれぞれの量子リピータ100内の始動構成部（FS）97及びターゲットQ - ブロック（Tg）94を備えている。

20

【0118】

次に、動作サイクルの各 $1/4$ の期間における動作を説明する。

30

第1の $1/4$ 動作サイクル $i\{1\}$

動作サイクル i の開始時には、LLE CSS 150の始動構成部（FS）97が起動され、これによって、第1の $1/4$ 動作サイクル $i\{1\}$ の途中では、第1の始動構成部によって放出された先駆信号99は、ターゲットQ - ブロック（Tg）94へ向かう途中にあって、光場列98がそれに続いている。図15は、典型的な光場間の時間間隔及び典型的なノード間距離の場合に実際に生じる場合よりも、先駆信号及び光場列の空間的分布を誇張して示していることに留意されたい。いずれにしても、ここでは、始動構成部97は、第1の $1/4$ 動作サイクル $i\{1\}$ の持続時間P内で先駆信号及び光場列を完全に送り出すことが想定されている。

【0119】

40

第2の $1/4$ 動作サイクル $i\{2\}$

光場列は、第2の $1/4$ 動作サイクル $i\{2\}$ の開始時にターゲットQ - ブロック（Tg）に到着し始める。この $1/4$ 期間の途中では、光場列98のほとんどまたは全ては、該ターゲットQ - ブロックを保有しているノードに到着しており、（図15の矢印の付いた破線の弧151で示されているように）おそらくLLEは既に生成されている。

【0120】

第3の $1/4$ 動作サイクル $i\{3\}$

第3の $1/4$ 動作サイクル $i\{3\}$ の途中までには、光場列はターゲットQ - ブロック（Tg）を保有するノードに到着しており、LLEは、（図9に関して説明した要因に依存して）高い確率で（図15の矢印の付いた実線の弧152で示されているように）生成さ

50

れている。ターゲットQ - ブロックで測定されたパリティ情報は、該ターゲットQ - ブロックに関連付けられているL-LLE制御ユニットのレジスタ196に格納されており、(LLEに成功したフュージャリアのインジケータを含む)成功メッセージ930が、始動構成部(FS)に関連付けられているR-LLE制御ユニット73に戻される途上にある。遅くとも第3の1/4動作サイクルの終わりまでには、この制御ユニット73は、そのレジスタ195(図10参照)に(LLEに)成功したフュージャリアのID(識別子)を格納している。LLEの生成が成功しなかった場合には、失敗メッセージ930が返されて、対応する指標がレジスタ195に格納される。

【0121】

第4の1/4動作サイクル $i \{ 4 \}$

第4の動作サイクル $i \{ 4 \}$ の途中段階において、LLE CSS 150を形成する2つの近傍量子リピータ100を含むリピータチェーンの全ての量子リピータの各々が、各々のL側(すなわち左側)の量子ビットと成功したR側(すなわち右側)のフュージャリア量子ビットの間でマージ操作を実行する。図10を参照してより具体的に説明すると、各リピータ100において、クロック(生成部)103から送られたサイクルタイミング信号に依存して動作するマージ始動機能ブロック104は、レジスタ195から成功したR側のフュージャリアQ - ブロックの識別情報を取り出して、その識別情報(ID)を、量子物理的ハードウェア60に送られるマージ制御信号に組み込み、これによって、該リピータのL側の量子ビットと識別されたR側のフュージャリア量子ビットとの間におけるマージを準備して実行する。図15では、LLE CSS 150を形成する2つの量子リピータ100によって実行されたマージは、「M」でラベル付けされた小さなブロック矢印で示されている。

【0122】

LLEが全て近傍ノードの対の間に成功裏に生成されて、全てのマージ操作が成功すると、その結果として、より範囲の狭いエンタングルメントが量子リピータによって実行される個々のマージ操作によってマージされる順番には関係なく、E2Eエンタングルメント153が生成される。

【0123】

いずれかのLLEが成功裏に生成されなかった場合には、レジスタ195の読み出し時にマージ制御ユニット77によってそのことを検出して、該制御ユニットに、マージ操作をスキップさせて(省かせて)、失敗の指標が該マージ結果において返されたかのように処理を続行させるようにするのが好ましい。

【0124】

この例では、マージ操作は、左側及び右側のLLEが存在するという事を見込んで第4の1/4動作サイクル $i \{ 4 \}$ の途中で開始されるが、既知のL側及びR側の量子ビットが、左側及び右側にそれぞれエンタングルしていることが(測定結果から)わかっているか、または、そのようにエンタングルしていることを(信頼性のあるLLE生成が実行されるのに十分な時間が経過したために)少なくとも予測できるときには、実際には、リピータは、動作サイクルのタイムスロット中の任意の時点でマージを開始することが可能である。尚、今の例では、このタイムスロットは、第4の1/4動作サイクル $i \{ 4 \}$ に合致する。

【0125】

各リピータにおいて、マージ結果の測定値がマージ制御ユニット77に送られて格納される。より具体的には、マージパリティ情報は、FIFOパリティキュー(FIFOパリティ待行列)106に格納される前に、レジスタ196から取得したL側のLLEパリティ情報との排他的OR演算によって、該LLEパリティ情報と先ず結合される。マージの成功/失敗情報は、FIFO失敗キュー105に格納される(以下、この成功/失敗情報を、1例として「1」が「失敗」を表す2進値とする。したがって、この情報は「失敗」情報として単に参照される)。したがって、各動作サイクルに関連する失敗情報及びパリティ情報が追加されるので、FIFOキュー105及び106は、各動作サイクルの第4の1/4部分の中間点の経過後すぐに進められ、これによって、各動作サイクルの開始時に、最新のキューの工

10

20

30

40

50

ントリは、直前の動作サイクルに関連付けられる。

【0126】

上記では、1つの動作サイクル中にE2Eエンタングルメントがどのように生成されるかについて説明したが、これで話は終わりではない。なぜなら、全ての量子リピータから収集された少なくとも累積パリティ情報を、少なくとも1つの端部ノードに送る必要があるからである。本実施形態では、累積パリティ情報は、LR-MCメッセージによって右側の端部ノードに送られ、累積失敗情報は、LR-MCメッセージ及びRL-MCメッセージによって両方の端部ノードに送られ、これによって、E2Eエンタングルメントが成功裏に形成されたか否かが示される。

【0127】

大まかに言えば、動作サイクル $i + 1$ の開始時に、左側の端部ノードは、前の動作サイクル i で生成されたばかりのE2Eエンタングルメントについて各量子リピータからの失敗情報及びパリティ情報を累積するために、LR-MCメッセージを送信する。同様に、右側の端部ノードは、該動作サイクル i で生成されたばかりのE2Eエンタングルメントについて各量子リピータからの失敗情報を累積するために、RL-MCメッセージを送信する。これらのメッセージの各々は各量子リピータを横断するので、量子リピータは、該動作サイクル i について、該メッセージ中の累積情報を、関連するキュー105、106からの自身の寄与と組み合わせる。より具体的には、図10の実施形態の実装例では、失敗キュー105からの局所的な失敗情報が、それぞれのOR関数(機能部)109、107を介してLR-MC及びRL-MCメッセージ中の累積失敗情報に結合され、こうして、任意の局所的な失敗により、累積失敗値が「1」すなわち「失敗」に設定される。局所的なパリティ情報は、(2つのパリティビットに対して別個独立に作用する)XOR関数(機能部)108を介してLR-MCメッセージ中の累積パリティ情報に結合され、これによって、任意の不揃いのパリティは対応する累積パリティビット値に切り換えられることになる。もちろん、キュー105、106からの情報の抽出を綿密に制御することによって、抽出された情報が、該抽出された情報が結合されることになる累積情報と同じ動作サイクルに対応する(すなわち該動作サイクルにおけるものである)ことを確保することが必要である。代替的なアプローチは、各リピータが、単にパリティ情報及び失敗情報を動作サイクルのインジケータと共にメモリに記憶するようにすることであり、これは、動作サイクルのインジケータが、LR-MC及びRL-MCメッセージによって伝送される累積情報を伴うことに相当する。

【0128】

LR-MCメッセージは、RL-MCメッセージが動作サイクル i において左側の端部ノードに到達するのと同時に、同じ動作サイクル i において右側の端部ノードに到達し、これによって、これらの両方の端部ノードは、動作サイクル i において生成されたE2Eエンタングルメントの有効性(成功/失敗)を同時に知ることができる。右側の端部ノードはまた、E2Eエンタングルメントの使用に関するパリティ情報を同時に知ることになる。

【0129】

図16は、LR-MC及びRL-MCメッセージが、E2Eエンタングルメントが生成されることになる左側の端部ノードと右側の端部ノードの間の(図8に示すような)5つのノードチェーンに沿って伝送されるときに、それらのメッセージ中の失敗情報及びパリティ情報を累積するためのメッセージング構成の1例に関するメッセージフロー図である。簡単にするために、ノードは全て、移動時間 t に相当する同じ距離だけ隔置されているとする(図示の場合よりもノード間の間隔を短くした場合でも、動作には、メッセージが早く到達する以外の影響はない)。図16は、 $t_i \sim t_{i+5}$ までの時間期間(すなわち、 $i \sim i+4$ までの5つの動作サイクルの時間)をカバーしている。累積される失敗情報及びパリティ情報は、それらの情報が関連する動作サイクルに固有の模様を有するボックスによって表されている。動作サイクル $i-3 \sim i+3$ についての少なくとも部分的な情報も示されている。LR-MCメッセージフローは実線で示されており、動作サイクル i についての失敗情報及びパリティ情報を累積するLR-MCメッセージフローは太い実線160で示

10

20

30

40

50

されている。RL-MCメッセージフローは破線で示されており、動作サイクル i についての失敗情報を累積するRL-MCメッセージフローは太い破線 161 で示されている。

【0130】

図16に示すメッセージング構成の例では、各中間ノード（このノードは量子リピータノードであろう）は、各動作サイクルの開始時に、1つのLR-MC累積失敗及びパリティ情報メッセージ、及び、1つのRL-MC累積失敗情報メッセージを送り出すが、この場合、該中間ノードは、それ自体の局所的な寄与と、前（もしくは直前）の動作サイクル中に受け取った（及び、受信インターフェース102に一時的に格納されている（図10参照））LR-MC及びRL-MCメッセージ中の累積情報とを結合している。リピータノードによって準備されて同時に送信されるLR-MC失敗及びパリティメッセージ並びにRL-MC失敗メッセージは、それらのメッセージが（図16の $n=3$ のノードなどの）チェーンの中間のノードによって処理される場合を除いて、一般的には、互いに同じ動作サイクルには関係しないことに留意されたい。

10

【0131】

量子リピータノード j によって c 番目の動作サイクル c で送られるLR-MCメッセージについては、累積失敗及びパリティ情報は $(c-j)$ 番目の動作サイクルに関係し、関連する局所的な失敗及びパリティ情報は、適切なキューロットをタップする（キュー中の情報を取り出せるように該ロットをあける）ことによってキュー105、106から抽出される（図10に示しているように、この情報は、 $(c-1)$ 番目のサイクルにおけるマージ結果情報の入力後に抽出されることが想定されている）。

20

【0132】

N 個のノードのチェーン中の量子リピータノード j によって c 番目の動作サイクル c で送られるRL-MCメッセージについては、累積失敗情報は $(c-1-(N-j))$ 番目の動作サイクルに関係し、関連する局所的な失敗情報は、適切なキューロットをタップすることによってキュー105から抽出される（図10に示しているように、この場合も、この情報は、 $(c-1)$ 番目のサイクルにおけるマージ結果情報の入力後に抽出される）。

【0133】

動作サイクル i における失敗及びパリティ情報を累積するLR-MCメッセージの流れ（図16の太い実線160）についてより詳しく検討すると、動作サイクル $i+1$ の最初の1/4期間の開始時に、左側の端部ノード ($n=1$) は、その近傍の量子リピータノード ($n=2$) に1つの累積失敗ビット及び2つの累積パリティビットを有するLR-MCメッセージを送る。左側の端部ノードそれ自体はマージ操作を実行しないので、左側の端部ノードとその近傍の量子リピータノードの間にLLEが生成されていない場合（この場合は、失敗ビットは値「1」を有する）以外は、累積失敗ビットは値「0」を有する。累積パリティビットはいずれも偶数パリティを示すように設定される。左側の端部ノードによって送信されたLR-MCメッセージは、（動作サイクル $i+1$ の2番目、3番目、及び4番目の1/4期間中のノード $n=2$ における線160の垂直部分によって示されているように）動作サイクル $i+1$ の2番目の1/4期間の開始時に、その近傍の量子リピータノード ($n=2$) によって受信され、累積失敗ビット及びパリティビットは、受信インターフェース102に一時的に格納される。動作サイクル $i+2$ の最初の1/4期間の開始時に、量子リピータノード ($n=2$) は、動作サイクル i におけるその局所的な失敗及びパリティ情報をインターフェース102に一時的に格納されている累積失敗及びパリティ情報と結合して新たな累積失敗及びパリティ情報にし、該新たな累積失敗及びパリティ情報をLR-MCメッセージでその右側の近傍ノード ($n=3$) に送り、同様の動作を、動作サイクル $i+4$ において右側の端部ノードに到達するまで、ノードチェーンに沿って右側方向にノードからノードへと繰り返す。右側の端部ノードは、動作サイクル i において構築された左側LLEに関する自身の局所的なパリティ情報を加えることによって該プロセスを完了する。

30

40

【0134】

50

動作サイクル i における失敗情報を累積するRL-MCメッセージの流れ（図16の太い破線161）については、動作サイクル $i+1$ の最初の1/4期間の開始時に、右側の端部ノード（ $n=5$ ）は、その近傍の量子リピータノード（ $n=4$ ）に1つの累積失敗ビットを有するRL-MCメッセージを送る。この累積失敗ビットは値「0」を有する。なぜなら、右側の端部ノード自体はマージ操作を実行せず、かつ、右側の端部ノードとその近傍の量子リピータノードの間におけるLLE生成の失敗は該量子リピータノードによって捕捉されるからである。右側の端部ノードによって送られたRL-MCメッセージは、（動作サイクル $i+1$ の2番目、3番目、及び4番目の1/4期間中のノード $n=4$ における線161の垂直部分によって示されているように）動作サイクル $i+1$ の2番目の1/4期間の開始時に、その近傍の量子リピータノード（ $n=4$ ）によって受信され、累積失敗ビットは受信インターフェース102に一時的に格納される。動作サイクル $i+2$ の最初の1/4期間の開始時には、量子リピータノード（ $n=4$ ）は、動作サイクル i におけるその局所的な失敗情報をインターフェース102に一時的に格納されている累積失敗情報と結合して新たな累積失敗情報にし、該新たな累積失敗情報をRL-MCメッセージでその左側の近傍ノード（ $n=3$ ）に送り、同様の動作を、動作サイクル $i+4$ において左側の端部ノードに到達するまで、ノードチェーンに沿って左側方向にノードからノードへと繰り返す。左側の端部ノードは、動作サイクル i において構築されている（はずの）右側LLEに関する自身の局所的な失敗情報を加えることによって該プロセスを完了する。

【0135】

図17は、5つのノードからなるノードチェーン（これらのノードは全て移動時間に相当する同じ距離だけ隔置されている）に沿って伝送されるLR-MC及びRL-MCメッセージ中の失敗情報及びパリティ情報を累積するためのメッセージング構成の第2の例に関するメッセージフローを（メッセージング構成の第1の例に関する図16と類似のやり方で）示す図である。図17は、 $t_i \sim t_{i+3}$ までの時間期間（すなわち、 $i \sim i+2$ までの3つの動作サイクルの時間）をカバーしている。動作サイクル i において失敗及びパリティ情報を累積するLR-MCメッセージフローは太い実線170で示されており、動作サイクル i において失敗情報を累積するRL-MCメッセージフローは太い破線171で示されている。

【0136】

この第2の例のメッセージング構成は、（図16のメッセージフローの線160、161の垂直部分によって表されている）第1の例のメッセージング構成に存在するノードにおけるメッセージ保持時間の大部分を除去することによって累積失敗及びパリティ情報の伝送速度を高める。これは、各ノードが、次の動作サイクルの開始まで待つのではなく、累積失敗及びパリティ情報の受信後の次の1/4期間の開始時にそれらの累積失敗及びパリティ情報を送信するようにすることによってなされる。この効果は、ノード間の移動時間が最大移動時間すなわち動作サイクルの1/4期間Pに相当乃至合致する場合には、累積失敗及びパリティ情報が実質的に連続的に前方に伝送されるというものである（実際には、動作サイクルの1/4の期間Pは、各ノードにおける処理、特に局所的な失敗及びパリティ情報を組み込む処理を可能にするために、よりもわずかに大きくする必要があるので理解されよう）。

【0137】

量子リピータノード j によって c 番目の動作サイクル c において送信されるLR-MCメッセージについては、累積失敗及びパリティ情報は、 $(c-1 - \text{floor}[(j-1)/4])$ 番目の動作サイクルに関連し、及び、動作サイクルの $(1 + [(j-1) \bmod 4])$ 番目の1/4期間の開始時に送信される。関連する局所的な失敗及びパリティ情報は、適切なキューロットをタップすることによってキュー105、106から抽出される（これは、図10に示されているやり方とは異なるが、当業者には容易に理解されよう）。

【0138】

N個のノードチェーン中の量子リピータノード j によって c 番目の動作サイクル c に

10

20

30

40

50

において送信されるRL-MCメッセージについては、累積失敗情報は、 $(c - 1 - \text{floor}[(N - j) / 4])$ 番目の動作サイクルに関連し、及び、動作サイクルの $(1 + [(N - j) \text{ mod } 4])$ 番目の $1 / 4$ 期間の開始時に送信される。関連する局所的な失敗情報は、適切なキューロットをタップすることによってキュー105から抽出される（これも、図10に示されているやり方とは異なるが、当業者には容易に理解されよう）。

【0139】

図17の例では、エンドツーエンドのメッセージ伝送時間は完全な1動作サイクルの時間であるが、これは、この例のチェーンにたまたま5つのノードがあるためであることに留意されたい。

【0140】

左側の端部ノードと右側の端部ノード（これらノードの間にE2Eエンタングルメントが生成される）については、もちろん、それらのノードは、それら自体は量子リピータではないが、それらのノードのそれぞれの近傍の量子リピータを伴うLLE生成サブシステムを生成するための機能、並びに、上記したように、LR-MC累積失敗及びパリティメッセージ及びRL-MC累積失敗メッセージを送信/受信するための機能を有する。始動構成部97がノードチェーンに沿って左から右へと（光場列を）送り出すこの例では、左側の端部ノードはまた、マスタークロックを提供し、及び、その始動構成部によって送出される先駆信号99の形態で同期信号を送信する。

【0141】

左側及び右側の端部ノードはまた、各動作サイクルの終わりに、エンタングルされた端部ノードのLLE生成サブシステムの量子ビット（これらの量子ビットの間にE2Eがたった今形成されたばかりである）を解放するというさらなる機能を果たす。これは、各端部ノードに複数のQ-ブロックから構成される出力バッファを設けて、それらの端部ノードに関連付けられているコンシューマアプリケーション（または消費アプリケーション。以下同じ）によりエンタングルメントが使い果たされる（すなわち消費される）まで、新しく生成された各E2Eエンタングルメントをそれらのバッファの量子ビットへと横断的にシフトすることによってなされる。もちろん、該コンシューマアプリケーションが、各動作サイクルの終わりにE2Eエンタングルメントが利用可能になったときに、該E2Eエンタングルメントを消費するように構成され、かつ、適時にそれらのエンタングルメントが消費されない場合でもそれらのエンタングルメントの損失を許容できる場合には、かかるバッファリングを不要にすることができる。

【0142】

図18及び図19は、右側の端部ノードと左側の端部ノードのそれぞれの実施例を示す。

【0143】

図18に示す右側の端部ノード180は、

- ・左側の近傍の量子リピータノード182と共に形成されたLLE生成サブシステム181のターゲットQ-ブロック94及び関連するLLE制御ユニット920、
- ・LLE生成サブシステム181の先駆信号によって同期化されたクロック（個別には図示されていない）を含む高レベルの右側端部ノード（REN）制御ユニット183であって、RL-MC及びLR-MCチャンネルファイバーとインターフェース（接続）して、（上述したように）各サイクルの開始時にRL-MC累積失敗メッセージを送り、LR-MC累積失敗及びパリティメッセージを受け取る制御ユニット183、及び、
- ・複数のQ-ブロック186から構成される出力バッファ185

を備える。ここで、該複数のQ-ブロックのうちの選択された1つに、ターゲットQ-ブロック94に留められている（定着している）エンタングルメントの端部をシフト（移動）させることができる（これは、関連する動作サイクルの終わりにREN制御ユニット183の制御下でなされる）。

【0144】

右側の端部ノード180はまた、局所的なE2Eエンタングルメントコンシューマアプリ

10

20

30

40

50

ケーション184(破線で示されている)とインターフェース(接続)する。

【0145】

図18は、バッファQ-ブロック186をターゲットQ-ブロック94に結合するために光マージユニット187を用いる特定の光学的構成体の1実施例を示している。バッファQ-ブロック186は捕捉相互作用機能を有し、ターゲットQ-ブロック94は要求された移行相互作用機能をすでに有している。E2Eエンタングルメントの右側端部をターゲットQ-ブロック94から特定のバッファQ-ブロック186に移動させるために、該特定のバッファQ-ブロック186が先ず、エンタングルメント操作によってターゲットQ-ブロック94とエンタングルされるが、これは、関与しているバッファQ-ブロック186に関連付けられている放射源を(REN制御ユニット183の制御下で)選択的に作動させ、これによって、(矢印188で概略的に示されているように)光場が光マージユニット187によってターゲットQ-ブロック94に送られる前に、該光場が該バッファQ-ブロックの量子ビットを通過乃至横切るようにすることによって実行される。その後、ターゲットQ-ブロック94は、X測定操作によってエンタングルメントから解放される。これらの操作は短い距離間で実行されるので、成功確率が高い。

10

【0146】

REN制御ユニット183は、現在エンタングルメントしているバッファQ-ブロック186、及び、関連するE2Eエンタングルメントが生成された動作サイクルを常に把握しておく機能を有する(これによって、受信したLR-MCメッセージ中の累積パリティ情報を適切なバッファQ-ブロック186に関連付けることができる)。

20

【0147】

図19に示す左側の端部ノード190は、
 ・右側近傍の量子リピータノード192と共に形成されたLLE生成サブシステム191のフュージャリアQ-ブロック93を有する始動構成部97、及び、関連するLLE制御ユニット910、
 ・マスタークロック(個別には図示されていない)を含む高レベルの左側端部ノード(LEN)制御ユニット193であって、RL-MC及びLR-MCチャンネルファイバーとインターフェース(接続)して、(上述したように)各サイクルの開始時にLR-MC累積失敗及びパリティメッセージを送り、RL-MC累積失敗メッセージを受け取る制御ユニット193、及び、
 ・m個のQ-ブロック196から構成される出力バッファ195
 を備える。ここで、該m個のQ-ブロックのうちの選択された1つに、フュージャリアQ-ブロック93に留められている(定着している)エンタングルメントの端部をシフト(移動)させることができる(これは、関連する動作サイクルの終わりにLEN制御ユニット193の制御下でなされる)。

30

【0148】

左側の端部ノード190はまた、局所的なE2Eエンタングルメントコンシューマアプリケーション194(破線で示されている)とインターフェース(接続)する。

【0149】

図19は、フュージャリアQ-ブロック93のうちの選択された1つを特定のバッファQ-ブロック196に結合するための特定の光学的構成体の1実施例を示している。図示の光学的構成体の実施例は、図示の光学的構成体の構成をとらない場合には、f個のフュージャリアQ-ブロック93を出力バッファ195のm個のQ-ブロックにインターフェース(接続)するために必要になるf×m個の光スイッチの使用を回避しているが、これは、仲介用Q-ブロック197を提供することによって達成されている。

40

【0150】

より具体的には、図19の実施例において、f個のフュージャリアQ-ブロック93は、光マージユニット199及びローカルリンクファイバー1910を介してリピータノードのチェーンに光学的に結合されている。フュージャリアQ-ブロック93及びバッファQ-ブロック196は全て捕捉相互作用機能を有し、中継用Q-ブロック197は移行相互作用機能を有する。1×2の光スイッチ1900によって、光マージユニット199の出力

50

を、ローカルリンクファイバー 1910 と、光マージユニット 198 の入力を供給するループバックファイバー 1920 との間で切り替えることができる。バッファ Q - ブロックの出力も、光マージユニット 198 への入力として結合される。光マージユニット 198 の出力は中継用 Q - ブロック 197 に結合される。かかる構成乃至配列によって、フュージリア Q - ブロック 93 のうちの任意の選択的に始動された 1 つ、または、出力バッファ Q - ブロック 196 のうちの任意の選択的に始動された 1 つを中継用 Q - ブロック 197 に結合することができる。その結果、フュージリア Q - ブロック 93 の 1 つに留められている E2E エンタングルメントの左側端部を中継用 Q - ブロック 197 へとシフト（移動）させ、そこから、出力バッファ Q - ブロック 196 のうちの選択された 1 つへとシフト（移動）させることができる。これらのシフトはいずれも延長操作（図 1B 参照）によって実行される。代替的には、選択された出力バッファ Q - ブロック 196 を中継用 Q - ブロック 197 と先ずエンタングルさせて、次に、該中継用 Q - ブロック 197 と E2E エンタングルメントを留めているフュージリア Q - ブロック 93 との間でマージ操作を実行することができる。

10

【0151】

LEN 制御ユニット 193 は、E2E エンタングルメントのバッファ 195 への移動に関するフュージリア Q - ブロック及びバッファ Q - ブロックの選択を制御する機能、及び、現在エンタングルメントしているバッファ Q - ブロック 196 を常に把握しておく機能を有する。

【0152】

20

左側の端部ノード及び右側の端部ノードに対して図 18 及び図 19 に示されているものとは異なる光学的構成体の実施が可能であることが理解されよう。たとえば、右側の端部ノードにおける光場の伝送方向 188 を逆にして、能動性の光スイッチを用いて、ターゲット Q - ブロック 94 を選択されたバッファ Q - ブロック 186 に光学的に結合することができる（この場合には、ターゲット Q - ブロック 94 は捕捉相互作用機能を必要とし、バッファ Q - ブロック 186 は移行相互作用機能を必要とするであろう）。

【0153】

1 以上のパリティ測定値が、E2E エンタングルメントをバッファ Q - ブロックに移動させる操作に関連付けられることがさらに理解されよう。測定されたパリティが偶数の場合には、E2E エンタングルメントのパリティは変化しないので追加の措置（操作）は必要ではない。しかしながら、測定されたパリティが奇数の場合には、E2E エンタングルメントを同じに維持するために、関係するバッファの量子ビットが反転される。

30

【0154】

上記の変更に加えてもしくは該変更以外にも、以下に挙げるものを含む種々の変更を図 10 の量子リピータの実施形態に施すことができる。

- ・右から左への LLE 生成：既に述べたように、「左」及び「右」という用語は、ノードチェーンに沿った相対的な方向を示すための便宜上の標示に過ぎない。図 10 の実施形態を、光場列 98 が LLE 生成サブシステムを右から左に通過する場合にも同様に説明することができる（この場合は、LLE 生成のために、リピータの L 側（左側）はフュージリア Q - ブロックを有し、リピータの R 側（右側）はターゲット Q - ブロックである）。

40

- ・LLE パリティ情報を LLE 生成サブシステムの始動構成部側に送る：LLE パリティ情報を、各 LLE 生成サブシステムのターゲット側にある LLE 制御ユニット 920 のレジスタ 196 に保持するのではなく、このパリティ情報をレジスタ 195 に格納するために、該パリティ情報をメッセージ 930 に入れて LLE 生成サブシステムの始動構成側にある LLE 制御ユニット 910 に送ることができる。同じサイクルにおけるマージ操作の後、このパリティ情報とマージパリティ情報が XOR 演算されてパリティキュー 106 に格納される。

- ・累積パリティを左側の端部ノードに送る：累積パリティ情報を、LR-MC メッセージに入れて右側の端部ノードに送るのではなく、RL-MC メッセージに入れて左側の端部ノードに送ることができる。

- ・相補関係にあるリピータタイプ：2 つの相補関係にあるタイプのリピータを有する量子

50

リピータのハイブリッド形態が可能であり、該形態では、LLE生成中の光場列98の伝送方向は、該リピータの左側と右側とで逆である。したがって、図20に示すように、このハイブリッド型リピータの一方のタイプ200では、光場列98は、該リピータタイプ200の左側の始動構成部97及び右側の始動構成部97によって生成され、それぞれ、L側フェージリアQ-ブロック及びR側フェージリアQ-ブロックを通過した後、左側ローカルリンクファイバー及び右側ローカルリンクファイバーを介して左側と右側のそれぞれの近傍ノードに送信される。このハイブリッド型リピータの他方のタイプ205では、光場列98は、左側と右側のそれぞれの近傍ノードから左側ローカルリンクファイバーと右側ローカルリンクファイバーをそれぞれ介して、該リピータタイプ205の左側と右側でそれぞれ受け取られ、L側とR側のターゲットQ-ブロック94をそれぞれ通過した後測定される。上記のハイブリッド形態の量子リピータのチェーンにおいて、LLE生成サブシステムを生成するために2つのタイプのリピータ200、205を交互に配置する必要があることが理解されよう。

【0155】

E2Eエンタングルメントを成功裏に生成するレート（速さもしくは割合）を高めるための変更を行うこともできる。そのようないくつかの変更を下記する（E2Eエンタングルメントの生成のレートを高くするために、それらの変更を単独で使用できることも、組み合わせで使用できることも理解されよう）。

- ・動作サイクルを短くする：上記実施例では、動作サイクルの長さは、最大ノード間移動時間の持続時間の4倍であるが、既に述べたように、動作サイクルの持続時間をの1/2～1/3に大幅に短くする余地がある。

- ・LLE生成の成功レート（成功率）を高める：この種の変形形態の1例については図21を参照して後述する。

- ・ノードチェーンセグメントの並列動作：この種の変形形態の1例については図22を参照して後述する。

- ・並列（もしくは同時）LLE生成：この種の変形形態の1例を、第2の「同期化された」量子リピータの実施形態に関して、及び、図23乃至図26を参照して後述する。

【0156】

LLE生成の成功率を高める（図21）

図21は、図9のLLE生成サブシステム90の変形形態を示しており、2つ以上のターゲットQ-ブロック94が設けられている。より具体的には、図21のLLE生成サブシステム210において、ノード91における量子物理的ハードウェア（始動構成部97及び光マージユニット96）の基本的構成は図9のサブシステムのものと同じである。しかしながら、図21のサブシステムのLLE制御ユニット211は、後述するようにいくつかの点で図9の制御ユニット910とは異なる。図9のサブシステムと図21のサブシステムの主な違いはノード92に見られる。すなわち、（図21の）ノード92において、量子物理的ハードウェアは、それぞれ1～pのIDを有する複数（全部でp個）のターゲットQ-ブロック94、及び、ローカルリンク95を介して受け取った光場をターゲットQ-ブロック94のうちの選択された1つに向けて送るための光スイッチ213を備えている。光スイッチ213は、ノード92のLLE制御ユニット212によって、エンタングルメントが成功裏に生成されるまで、到来する全ての光場（全ての入力光場）を光スイッチ213によって同じターゲットQ-ブロック94に向けて送るよう制御され、かつ、エンタングルメントが成功裏に生成されると、到来する光場を（エンタングルされていない）利用可能な新たなターゲットQ-ブロック94に送るべく切り替えられるよう制御される。したがって、光スイッチは、エンタングルされているターゲット量子ビットを後続の光場から遮って（すなわち、該光場が該ターゲット量子ビットを通過しないようにして）、それらの光場と該量子ビットとの相互作用を阻止する役目を効果的に果たす。成功裏に生成されたエンタングルメントの各々は、「成功」メッセージ930によってノード91に報告される。この場合、該メッセージ930は、（関与したフェージリアQ-ブロック93の識別を可能にする情報及び場合によってはパリティ情報に加えて）関与したターゲッ

トQ - ブロック94のID(識別情報)を含むことができる。

【0157】

もちろん、制御ユニット212は、光スイッチ213が、到来する光場をエンタングルしていない量子ビットを有するターゲットQ - ブロックだけに伝送するようにすることを確保する役目を担っているので、制御ユニット212は、ターゲットQ - ブロック94の各々の利用可能性に関する状態(利用可能性状態)を常に把握していなければならない。この利用可能性状態を、各ターゲットQ - ブロック94のそれぞれのエントリを格納するように構成された状態レジスタ216を用いて、制御ユニット212によって容易に追跡することができる。各レジスタのエントリは、対応するターゲットQ - ブロックの利用可能性を記録するだけでなく、(該Q - ブロックの量子ビットがフュージャリアQ - ブロックの量子ビットとエンタングルしているために)該Q - ブロックが利用できない場合には、関連するパリティ情報がノード91に返されるまで該パリティ情報を記録するためにも使用される。

10

【0158】

こうして動作ノード92は、始動構成部97によって送出された光場の全てがエンタングルメント生成を試みるために使用されるようにして、該光場の効率的な使用を確保する。

【0159】

ノード91の制御ユニット211はまた状態レジスタ215を有し、このレジスタは、各フュージャリアQ - ブロック93のそれぞれのエントリを格納するように構成されている。各レジスタのエントリは対応するフュージャリアQ - ブロック93の利用可能性を記録している。フュージャリアQ - ブロックは、(メッセージ930で示されるように)その量子ビットがターゲットQ - ブロック94の量子ビットとエンタングルしているときから関連するエンタングルメントが消費されるまでの間は「利用不能」である。もちろん、全てのフュージャリアQ - ブロック93は、始動構成部が起動されてから、メッセージがノード92から受信されるまでのラウンドトリップタイムの間は事実上「利用不能」である。なぜなら、どの特定のフュージャリアQ - ブロックがエンタングルメントに関与しており、または、関与しようとしているかが分からないからである。しかしながら、任意の特定のフュージャリアQ - ブロックがエンタングルに関わっているか否かは、始動構成部97の次の始動(すなわち、次の光場の送出)の前に分かるので、そのような「利用不能」を無視することができる。レジスタ215の各エントリはまた、対応するQ - ブロック93の量子ビットがエンタングルしているために該Q - ブロック93が利用不能である場合には、パリティ情報を記憶するために使用され、この場合、かかるパリティ情報は関連するメッセージ930に入れられて提供される。

20

30

【0160】

複数のLLEが始動構成部97の1つの起動によって生成される場合には、生成された1以上のLLEを、同じ動作サイクルで実行されるマージ操作で使用する以外にも多くの用途に使用することができる。したがって、それらの過剰なLLEの1つまたはいくつかまたは全てを(必要なときのために)キューに格納しておき(「蓄えておき」)、LLE生成サブシステム210がその動作サイクルにおけるLLEの生成に失敗した場合には、(キューに格納されている)該LLEを次の動作サイクルでマージされるLLEとしてすぐに利用できるようにすることができる。もちろん、このためには、関連するQ - ブロック93、94をLLE生成に関与できないようにしておくことが必要であるが、これは、状態レジスタ215、216を参照することによって容易に行うことができる。また、蓄えられているLLEを共有するノードは、それらのLLEを同じ順番(たとえば、それらのLLEがメッセージ930で報告された順番)で使用しなければならない。そうでなければ、E2Eエンタングルメントを構築することが意図されているマージされたLLEの列に分裂が生じうる。

40

【0161】

過剰なLLEを、「純粋化(purification)」として知られるプロセスで使用することもできる。純粋化は、局所的な量子演算(もしくは量子操作)及び古典通信によって2つの

50

エンタングルメントを1つのより忠実度の高いペア（対）に組み合わせることによってエンタングルメントの忠実度を高めるものである。

【0162】

量子ビットの状態が、電子スピンから核スピンの遅延なく移行させる場合でも、「蓄えられている」LLEの存続時間は限られており、そのため、蓄えられているLLEに含まれる量子ビットの残りの存続時間を追跡し続けて、存続時間を経過した量子ビットを含むLLEを破棄しなければならないことに留意されたい。

【0163】

ノードチェーンセグメントの並列動作（図22）

ノードのチェーンを、各々のセグメントが左側の端部ノードと右側の端部ノードからなるそれ自体のペア（対）を有する複数のセグメントに分割することによって、拡張されたエンタングルメントの生成を（それぞれのセグメント間で）並列（すなわち同時）に実施することができる。次に、これらのE2Eエンタングルメントのセグメントをマージして最終的なE2Eエンタングルメントを生成することができる。

10

【0164】

かかるセグメント化の1つの特定の構成例を図22に示す。この例では、間にE2Eエンタングルメントを生成することが所望されている最終的な端部ノードは、左側の端部ノード221と右側の端部ノード222である。ノードのチェーン（端部ノード221、222、及び、中間にあるリピータノード）は、第1のセグメント223と第2のセグメント224に分割される。

20

【0165】

第1のセグメント223の端部ノードは、左側の端部ノード221とセグメントスパンニングノード（すなわち、両セグメントにまたがっているノード）229のサブノード225であり、このサブノード225は、第1のセグメントの右側の端部ノードとして機能する。第2のセグメント224の端部ノードは、右側の端部ノード222とセグメントスパンニングノード229のサブノード226であり、このサブノード226は、第2のセグメントの左側の端部ノードとして機能する。

【0166】

セグメントスパンニングノード229はマスタークロックを有している。第1のセグメント223の始動構成部は、（矢印227で示されているように）光場列を右から左へと送出し、第2のセグメント224の始動構成部は、（矢印228で示されているように）光場列を左から右へと送出す。こうして、光場列の先駆信号によって形成される同期信号は、セグメントスパンニングノード229から外部へと伝送される。

30

【0167】

第1及び第2のセグメント223、224は、連携したセグメント動作サイクルで時間的に同時に（もしくは並列に）E2Eエンタングルメントのセグメントを生成する。そのうち、各動作サイクルにおいて、セグメントスパンニングノード229は、両方のセグメントに関して、E2Eエンタングルメントのセグメント生成の成功または失敗を示す累積失敗メッセージを受け取る。E2Eエンタングルメントの両方のセグメントが成功裏に生成されていると仮定すると、セグメントスパンニングノード229は、E2Eエンタングルメントのそれらのセグメントをマージして、ノード221とノード222の間に所望のE2Eエンタングルメントを生成する。したがって、セグメントスパンニングノード229は端部ノードの機能だけでなく、マージ機能も有する。

40

【0168】

第2の「同期化された」量子リピータの実施形態（図23）

第2の「同期化された」量子リピータの実施形態230を図23に示す。量子リピータ230は、E2Eエンタングルメントが生成されることになる左側の端部ノードと右側の端部ノードの間の（図8に示すような）ノードのチェーン中の中間ノードとして動作することが理解されよう。

【0169】

50

図23の第2の量子リピータの実施形態230は、図10の第1の量子リピータの実施形態100に形態及び動作の点で類似しており、両者間で実質的に同じ構成要素については、図23において図10と同じ参照符号が使用されている。これらの第1の実施形態と第2の実施形態との間の主な違いは、第2の量子リピータの実施形態230では、E2E動作サイクル期間（もしくは周期）は1/4に短くされており（すなわち、前の1/4サイクル時間Pになっており）、一方、LLE生成サブシステム動作サイクル時間は4Pのままであるということである。これは、近傍のノードの各ペア（対）の間に（1つだけではなく）4つのLLE生成サブシステムを並列に生成し、この場合に、4つの並列のLLE生成サブシステムの動作をP（の時間分）だけ互いにずらすことによって達成される。この結果、近傍のノードの各ペア間に、実質的に時間期間Pに1つの割合（乃至速度）でLLEが生成され、これによって、E2EエンタングルメントをP毎に1つ生成するようにLLEのマージ操作を実行することが可能になる。

10

【0170】

図23に示すように、より具体的には、量子リピータ230は、

- ・（たとえば、クロックサイクル周期Pを有する）同期化されたクロック103、
- ・時間期間P毎にマージ操作を起動するように構成されたマージ制御ユニット77、
- ・4つの左側LLE生成サブシステム71L1乃至71L4のターゲットQ - ブロックTg1乃至Tg4及び関連するL-LLE制御ユニット（これらのLLE生成サブシステムの始動構成部FSは左側の近傍ノード231Lによって提供される）、
- ・4つの左側LLE生成サブシステム71L1乃至71L4を交互に周期的に連携動作させ、及び、
- ・それらのLLE生成サブシステムのL-LLE制御ユニットをマージ制御ユニット77にインターフェース（接続）するための左側のLLE CCSコーディネーター（調整器）236、
- ・4つの右側LLE生成サブシステム71R1乃至71R4の始動構成部FS1乃至FS4及び関連するR-LLE制御ユニット（これらのLLE生成サブシステムのターゲットQ - ブロックTgは右側の近傍ノード231Rによって提供される）、及び、
- ・4つの右側LLE生成サブシステム71R1乃至71R4を交互に周期的に連携動作させ、及び、
- ・それらのLLE生成サブシステムのR-LLE制御ユニットをマージ制御ユニット77にインターフェース（接続）するための右側のLLE CSSコーディネーター（調整器）237

を備える。

20

【0171】

4つの左側LLE生成サブシステム71L1乃至71L4は同じ左側ローカルリンクファイバー62を共有する。左側の近傍ノード231Lにおけるそれぞれの始動構成部FSからの光場列（光列）は、光マージユニット232を介してファイバー62において結合され、その後、それらの光場列は左側LLE CSSコーディネーター236の制御下で、光スイッチ233によってリピータ230内の適正なターゲットQ - ブロックTg1乃至Tg4に向けて送られる。

30

【0172】

同様に、4つの右側LLE生成サブシステム71R1乃至71R4は同じ右側ローカルリングファイバー63を共有する。リピータ230における始動構成部FS1乃至FS4の交互始動は右側LLE CSSコーディネーター237によって制御され、その結果生成される光場列は、光マージユニット234を介してファイバー63において結合される。その後、これらの光場列は、光スイッチ235によって右側の近傍ノード231R中の適正なターゲットQ - ブロックに向けて送られる。

40

【0173】

1例として図24は、4つの右側LLE生成サブシステム71R1乃至71R4の各々について、LLE生成サブシステム動作サイクルの各1/4期間Pのそれぞれの途中段階で生じることを（図15と同様に）示している。上述したように、この1/4期間Pの各々はE2E動作サイクルに対応しており、したがって、各1/4期間Pは、対応するE2E動作サイクル i 乃至 $i+3$ によって識別される（図24の一番上の行を参照）。図24において、LLE生成サブシステム71R1乃至71R4の始動構成部FS1乃至FS4は、連続するE2E動作サイクル i 乃至 $i+3$ において始動するものとして示されている。LLE生成サブシステム71R1乃

50

至71R4の動作によってエンタングルされた量子ビットを伴うマージ操作は、 $i + 3$ 、 i 、 $i + 1$ 、及び $i + 2$ におけるE2E動作サイクルにおいてそれぞれ生じるものとして図示されており、これらのマージ操作の各々は、各E2E動作サイクルにおいてE2Eエンタングルメントを生成する分散型マージ操作の一部である（図8を参照）。

【0174】

図23のリピータ230において、マージ制御ユニット77によって実行されるマージ操作に関しては、マージ制御ユニット77は、図10の実施形態の場合のようにLLE生成サブシステムのLLE制御ユニットではなく、LLE CSSコーディネーター236及び237とインターフェース（接続）する。右側のLLE CSSコーディネーター237は、マージ制御ユニット77に、右側のLLE生成サブシステムの識別情報及び次にマージされる該サブシステムのフュージリア量子ビットを提供する機能を有し、左側のLLE CSSコーディネーター236は、マージ制御ユニット77に、左側のLLE生成サブシステム（これは、関与している右側のLLE生成サブシステムと動作サイクルが調和乃至同期している左側のLLE生成サブシステムであり、マージ制御ユニットは、左側と右側のLLE生成サブシステムとが適切に調和乃至同期した関係にあることを知っているか、知ることができるということが想定されている）の1つから同じマージに関わるターゲット量子ビットに関するパリティ情報を提供する機能を有する。

【0175】

図25は、図23のリピータの実施形態について、移動時間 T に相当する同じ距離だけ5つの全てのノードが隔置されている該5つのノードのチェーンに沿って伝送するLR-MC及びRL-MCメッセージ中の失敗及びパリティ情報を累積するためのメッセージング構成の一例におけるメッセージフロー図を（図10のリピータの実施形態についての図16及び図17に類似のやり方で）示している。この例の場合には、時間期間（または時間周期） P の値は、この移動時間 T と同じ値に設定され、このため、図23のリピータの実施形態の場合には、ノード間の移動時間は、E2E動作サイクル C のサイクル時間と同じであることが思い出されよう。図25は、時間期間 $t_i \sim t_{i+5}$ （すなわち、3つの動作サイクル $C_i \sim C_{i+4}$ の持続時間）をカバーしている。動作サイクル C_i についての失敗及びパリティ情報を蓄積するLR-MCメッセージフローは太い実線250で示されており、動作サイクル C_i についての失敗情報を累積するRL-MCメッセージフローは太い破線251で示されている。

【0176】

理解されるように、各ノードは、累積失敗及びパリティ情報を受信すると、それらの情報を次のE2Eサイクルの開始時に送信し、これによって、該累積失敗及びパリティ情報が実質的に連続して前方へ送信されることになる（実際には、時間期間 P は、各ノードにおける処理、特に、局所的な失敗及びパリティ情報の組み込みを可能にするために T よりわずかに大きいことが必要とされることが理解されよう）。これは、図10の実施形態についてのメッセージング構成の第2の例に関して図17に示されているメッセージフロー図に似ている。しかしながら、1つのE2E動作サイクル当たりには1つの方向には、累積失敗及びパリティメッセージは1つだけしか送られないので、現在のE2Eサイクルと、ノード位置と、該現在のE2Eサイクルの開始時に送出される累積失敗及びパリティ情報間の関係は、図10の実施形態についてのメッセージング構成の第1の例と同様である。すなわち、

- 量子リピータノード j によって c 番目のE2E動作サイクル C_c において送出されるLR-MCメッセージについては、累積失敗及びパリティ情報は $(c - j)$ 番目のE2E動作サイクルに関連する。

- N 個のノードのチェーン中の量子リピータノード j によって c 番目のE2E動作サイクル C_c において送出されるRL-MCメッセージについては、累積失敗情報は、 $(c - 1 - (N - j))$ 番目のE2E動作サイクルに関連する。

【0177】

図10の量子リピータの実施形態に関連して上述した変更の多くが、図23の量子リピー

10

20

30

40

50

ータの実施形態にも同様に適用できることが理解されよう。

【0178】

さらに、図10及び図23の量子リピータの実施形態のいずれに対してもさらなる変更を行うことができる。たとえば、「蓄えられている」LLEの図21を参照して上述した実現可能性は、現在の平均的な（しかし必ずしも連続的ではない）LLE生成のレートが、少なくともE2E動作サイクルの周波数と同程度である場合には、E2E/リピータの最上位の動作サイクルからLLE生成サブシステム動作サイクルを分離することを可能にする（したがって、2つのリピータ間に形成された図21のLLE生成サブシステムの平均生成レートがその始動構成部の1始動当たり1.5LLEである場合には、LLE生成サブシステム期間（周期）を、E2Eサイクル期間（周期）より長くすることができる）。

10

【0179】

既に述べたように、LLEを高い信頼性でもって生成するためには、LLE生成サブシステムの「始動構成部」構成を使用することが必須であるわけではなく、いくつかの場合には、他のLLE生成サブシステムが適切である。1例として高い信頼性は、図5の並列をなす複数LLE生成サブシステム構成を用いることによって達成することができる。ただし、この場合は、複数のローカルリンクファイバーが必要になる。

【0180】

種々の理由から、上述の量子リピータの実施形態によって最上位サイクルの各々で実行される左側及び右側のエンタングルメントのマージを、関連するリピータのL（右）側及びR（左）側の量子ビットに対して上述した形態の「マージ操作」を実行することによって直接的に実施するのではなく、1以上のローカル（局在している）量子ビットの中間にある量子ビット（「中間量子ビット」）を介して実施するようにするのが望ましい場合がある。たとえば、1つの中間量子ビットが提供されている場合には、左側及び右側のエンタングルメントを、エンタングルされているL側/R側の量子ビット（ただし必要に応じて）並びに該中間量子ビットを伴うそれぞれの延長操作によって該中間量子ビットまで別々に拡張することができ、その後、該中間量子ビットに対してX測定操作を実行することによって該中間量子ビットをエンタングルメントから解放する。リピータの左側及び右側のエンタングルメントの局所的なマージ操作がどのように実施されるかの詳細は、「同期」方式で動作する量子リピータの一般的な操作乃至動作方法にとっては重要ではないことが理解されよう。

20

30

【0181】

図10及び図23の両方の実施形態のLLE制御ユニット72、73及びマージ制御ユニット77、並びに、図23の実施形態のコーディネーター236、237の実現に関しては、説明した機能は、典型的には、プログラム制御式プロセッサまたは対応する専用ハードウェアによって提供されることが理解されよう。さらに、實際上、（特に、LLE制御ユニットの機能が最小限の場合には）LLE制御ユニット、コーディネーター（ただし、存在する場合）、及びマージ制御ユニットの機能を統合することができる。もちろん、制御機能の分割はある程度自由に行うことができる。しかしながら、LLE制御機能を複数のLLE制御ユニットに分割する価値はある。なぜなら、いくつかのリピータの実施形態では、LLE生成は、フリーランニング（自走式）であり、すなわち、マージ制御などのより高いレベルの操作のタイミングとは分離しているからである。LLE制御機能の上位にあるのは、マージ制御及び動作サイクルの同期化に関連する制御機能であり、この後者の制御機能はリピータの最上位の制御を有効に提供し、及び、該後者の制御機能は最上位の制御構成（説明した実施形態では、該構成は、マージ制御ユニット及びクロックによって形成される）によって提供されるとみなすことができる。

40

【0182】

上記では、光場は、光ファイバーを介して、ノード間、及び、リピータの量子物理的ハードウェアの構成要素間の両方を伝送されるものとして一般的に説明したが、光場を任意の適切な光チャンネルを通じて伝送することができ、この場合、該光チャンネルは、（光導波路を用いた）誘導式のものでも無誘導式のもの（直線路）でもよく、また、自由空間

50

中を伝送させるものであっても物理媒体中を伝送させるものであってもよいことが理解されよう。したがって、たとえば、リピータの量子物理的ハードウェアの光学的構成体を、光キャビティ（または光共振器）内に配置されたダイヤモンド格子中の窒素原子によって提供される量子ビットと接続乃至相互作用するシリコンチャンネルから構成することができる。

【 0 1 8 3 】

既に述べたように、当業者は、Q - ブロックの具体的な実現方法を理解しているであろうし、関連する実施例の細部は以下の論文に記載されている。尚、以下の論文は参照により本明細書に組み込まれるものとする。

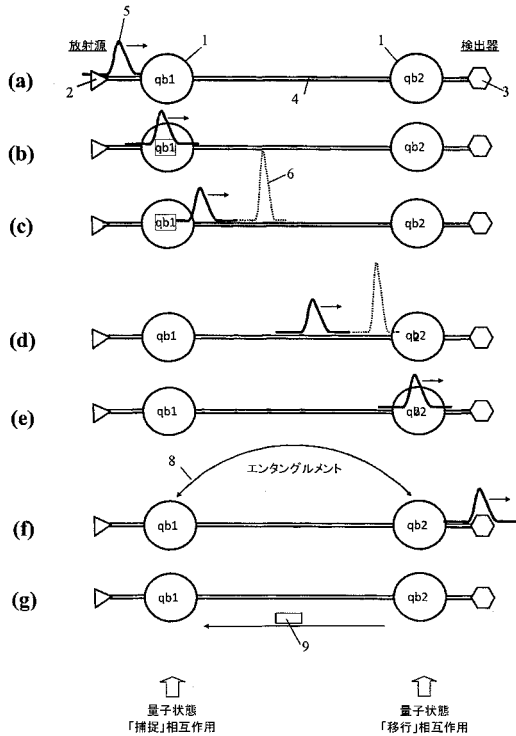
- ・ 「Fault-tolerant quantum repeaters with minimal physical resources, and implementations based on single photon emitters」 L. Childress, J.M.Taylor, A.S.Sorensen, and M.D.Lukin; Physics Review A 72,052330(2005).
- ・ 「Fault-Tolerant Quantum Communication Based on Solid-State Photon Emitters」 L. Childress, J.M.Taylor, A.S.Sorensen, and M.D.Lukin; Physical Review Letters 96,070504(2006).
- ・ 「Hybrid quantum repeater based on dispersive CQED interactions between matter qubits and bright coherent light」 T D Ladd, P van Loock, K Nemoto, WJ Munro, and Y Yamamoto; New Journal of Physics 8(2006)184, Published 8 September 2006.
- ・ 「Hybrid quantum Repeater Using Bright Coherent Light」 P. van Loock, T.D. Ladd, K.Sanaka, F.Yamaguchi, Kae Nemoto, W.J.Munro, and Y. Yamamoto; Physical Review Letters 96, 240501(2006).
- ・ 「Distributed Quantum Computation Based-on Small Quantum Registers」 Liang Jiang, Jacob M. Taylor, Anders S. Sorensen, Mikhail D.Lukin; Physics.Review. A 76, 062323(2007).

10

20

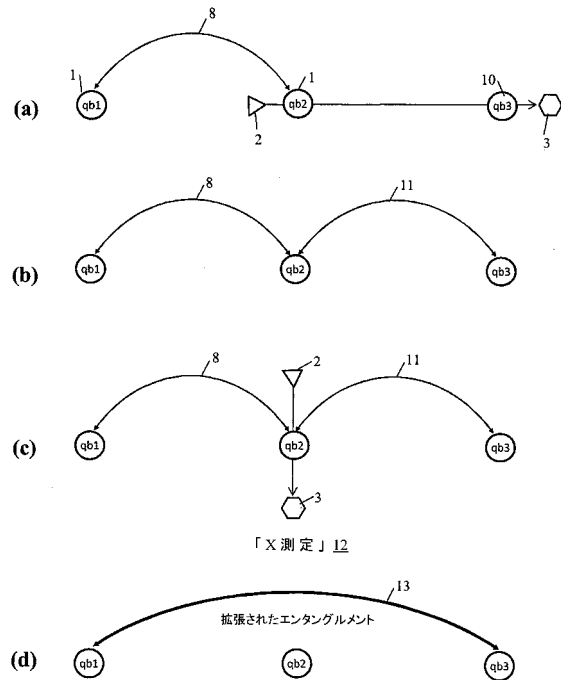
【 図 1 A 】

エンタングルメント操作

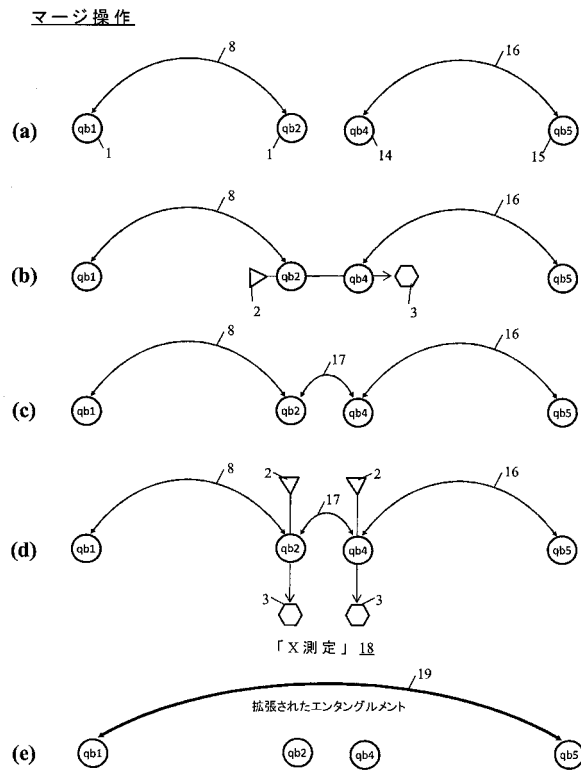


【 図 1 B 】

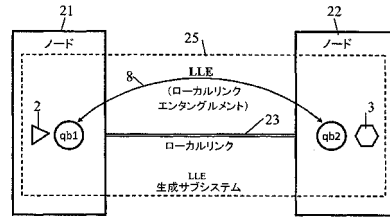
延長操作



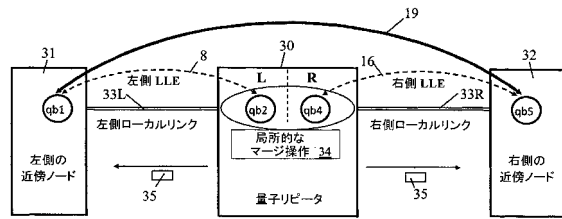
【図1C】



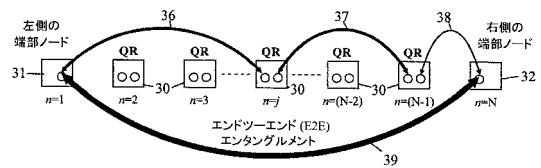
【図2】



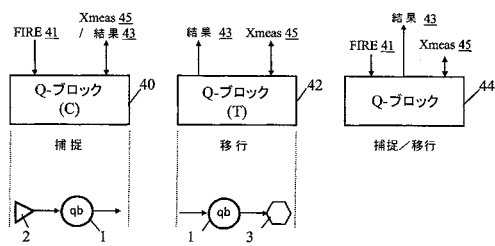
【図3A】



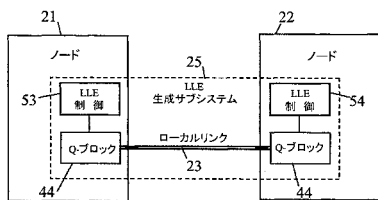
【図3B】



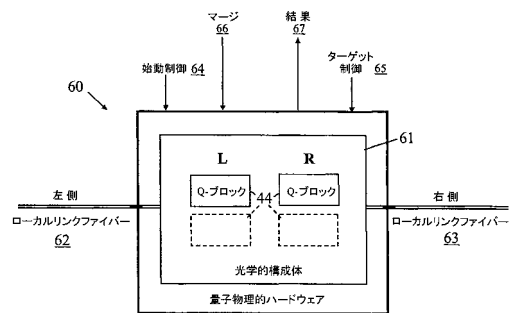
【図4】



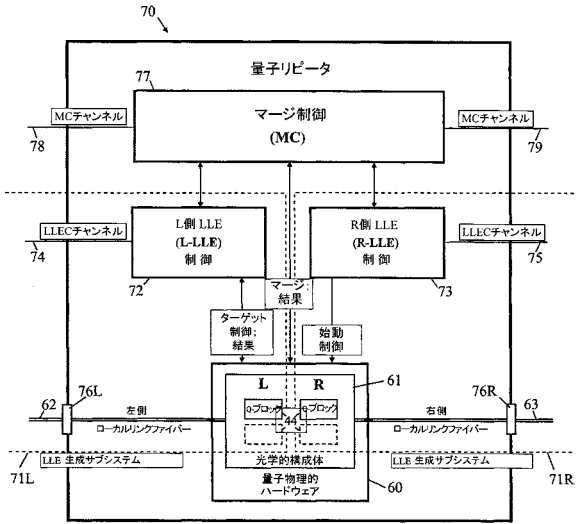
【図5】



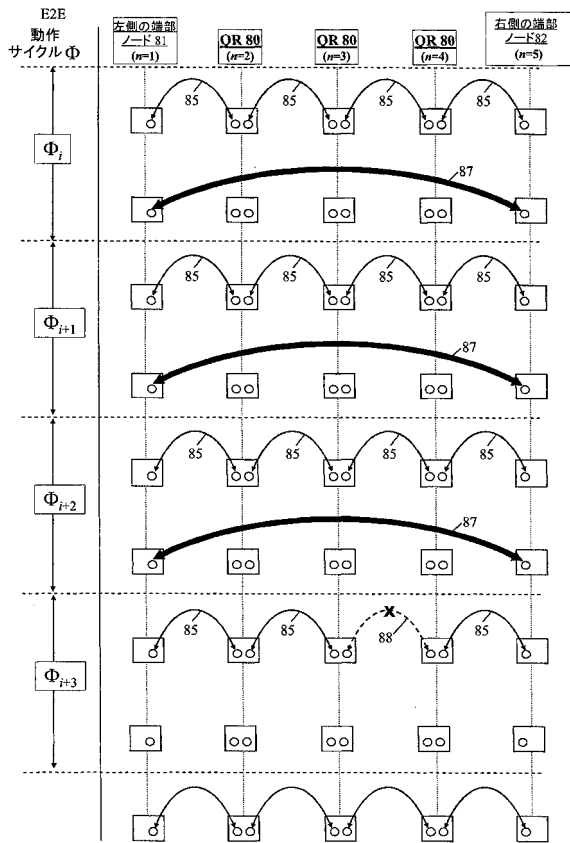
【図6】



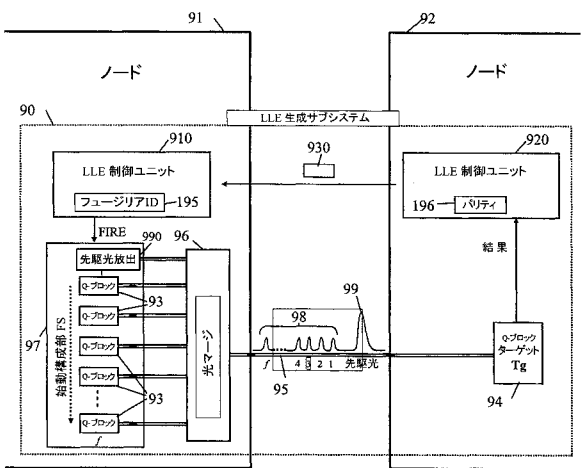
【図7】



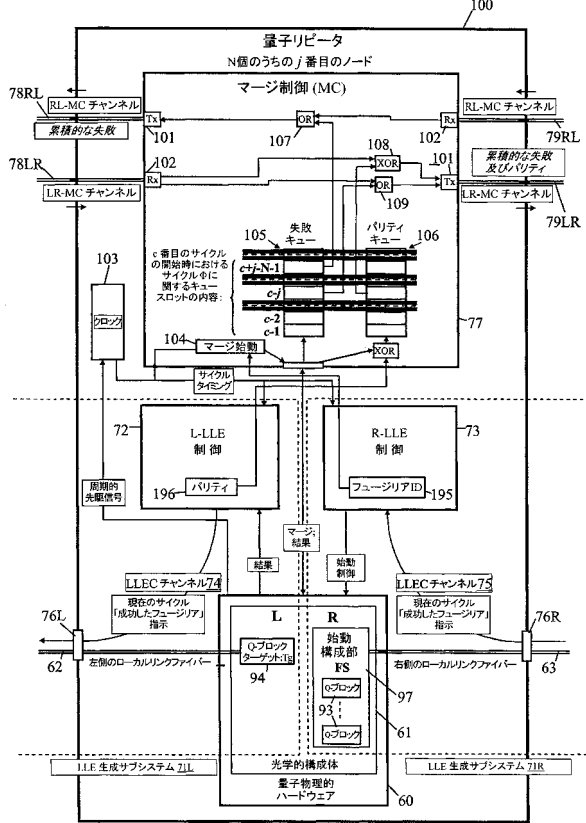
【図8】



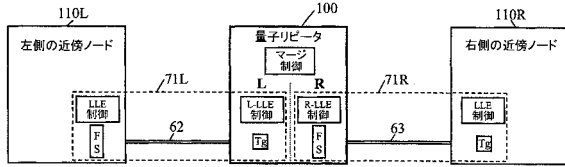
【図9】



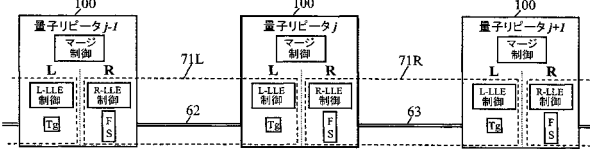
【図10】



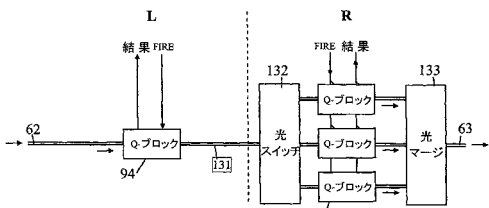
【図11】



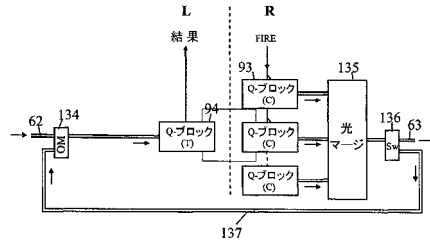
【図12】



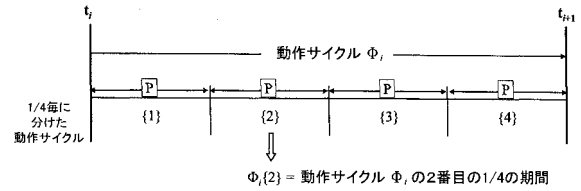
【図13A】



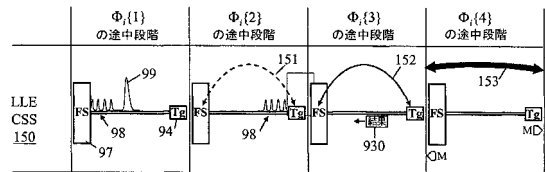
【図13B】



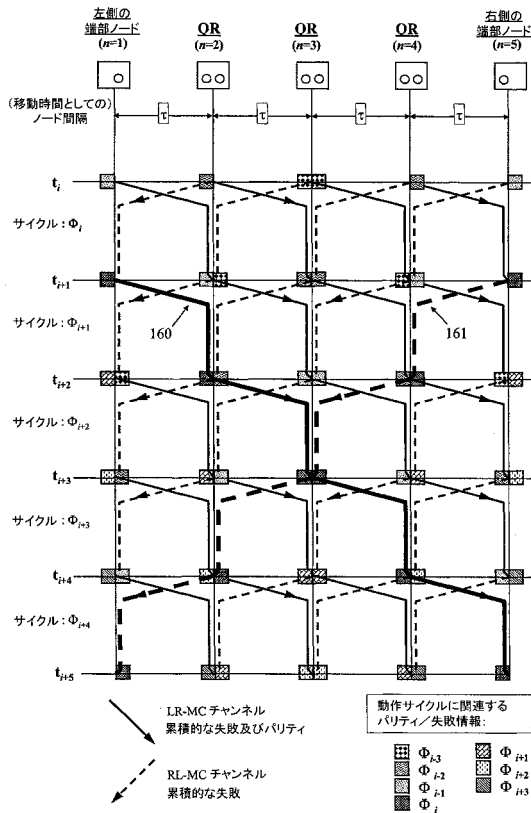
【図14】



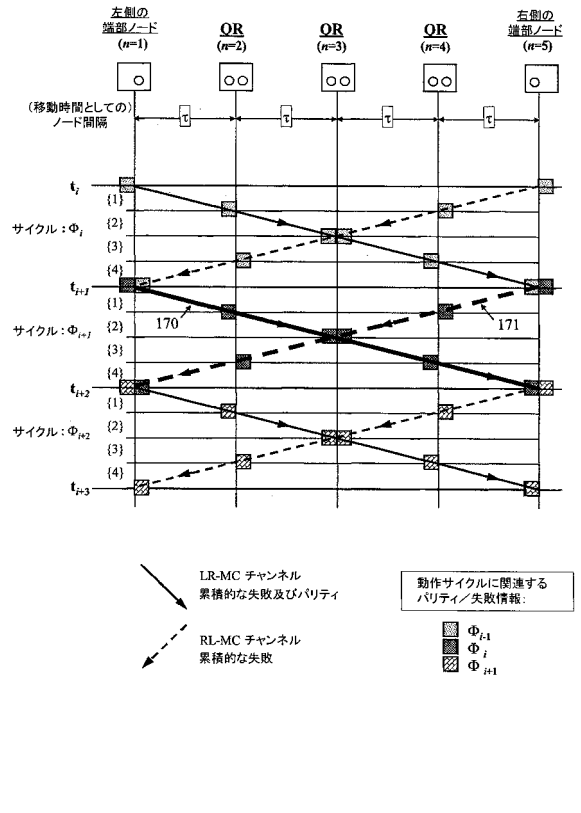
【図15】



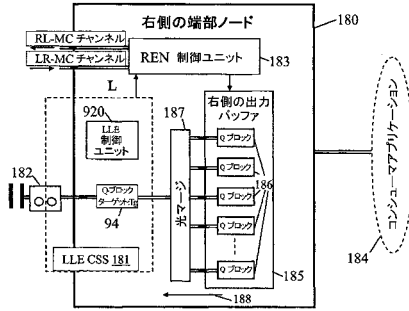
【図16】



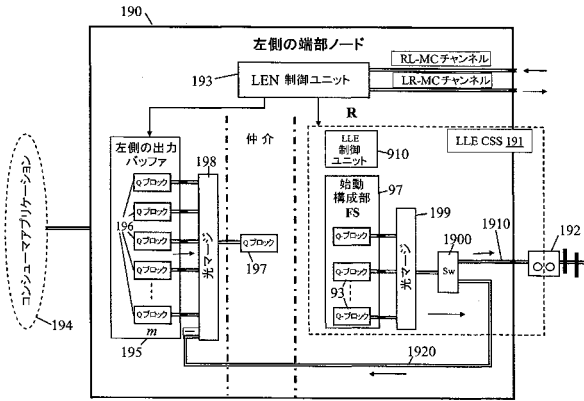
【図17】



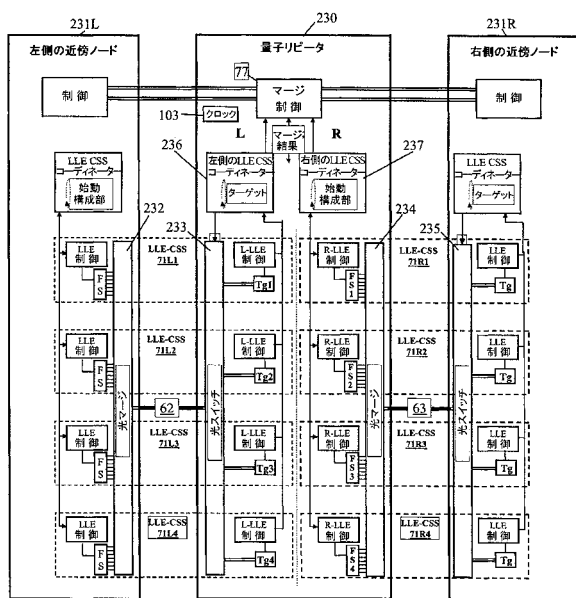
【図18】



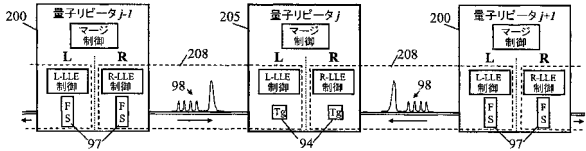
【図19】



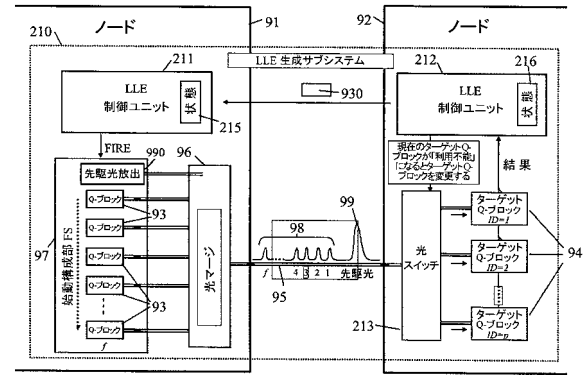
【図23】



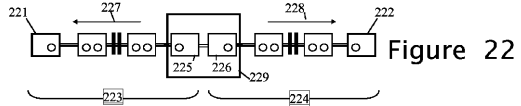
【図20】



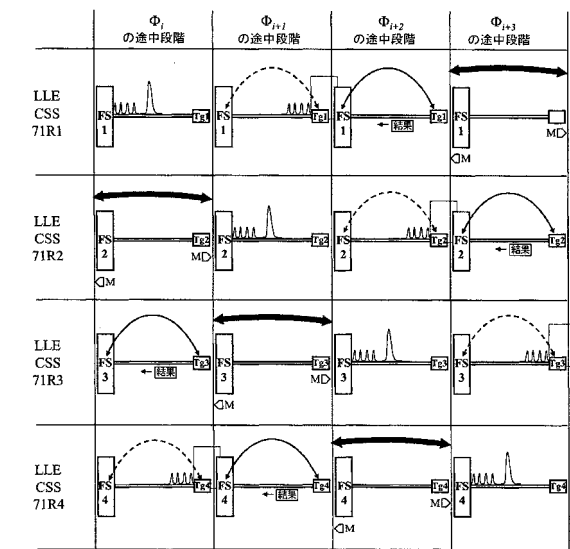
【図21】



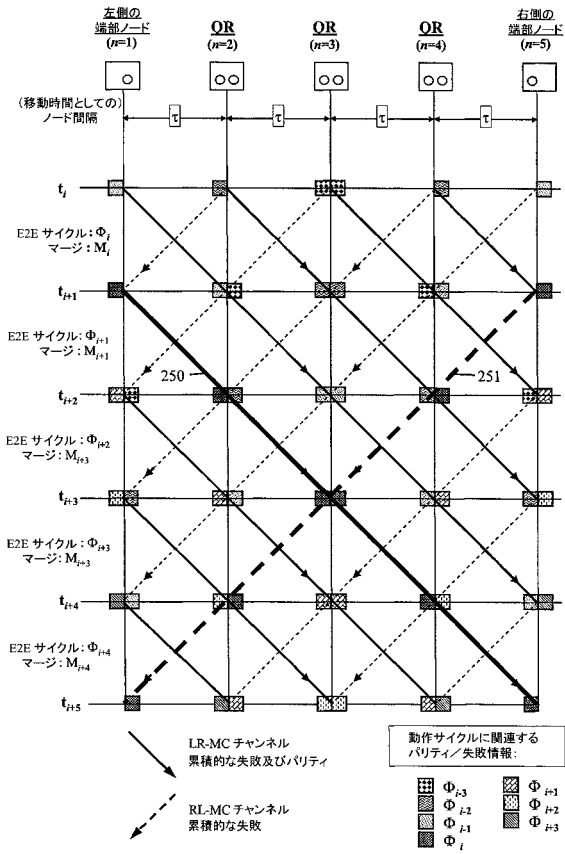
【図22】



【図24】



【 図 25 】



フロントページの続き

(74)代理人 100076680

弁理士 溝部 孝彦

(74)代理人 100121061

弁理士 西山 清春

(72)発明者 ハリソン, キース, アレキサンダー

イギリス国ブリストル・ビーエス34・8キューゼット, ブリストル, ストーク ギフォード,
フィルトン・ロード, ヒューレット・パッカード・リミテッド, ビルディング・3

(72)発明者 マンロー, ウイリアム

イギリス国ブリストル・ビーエス34・8キューゼット, ストーク ギフォード, ロング・ダウン
・アベニュー, ビルディング・3

(72)発明者 根本香絵

東京都港区南麻布4丁目6-7

審査官 木下 直哉

(56)参考文献 国際公開第2007/021945(WO, A2)

特開2007-329865(JP, A)

Rodny Van Meter, Thaddeus D. Ladd, W. J. Munro, Kae Nemoto, SYSTEM DESIGN FOR A LONG-L
INE QUANTUM REPEATER, IEEE / ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 米国, IEEE, 2009年
6月1日, VOL. 17, NO. 3, PAGES 1002-1013

Liang Jiang, J. M. Taylor Kae Nemoto, W. J. Munro, Rodney Van Meter, M. D. Lukin, Quant
um repeater with encoding, Physical review A, 米国, American physical society, 200
9年3月20日, Vol.79, Issue 3, pp.032325-1~032325-10

P. van Loock, T. D. Ladd, K. Sanaka, F. Yamaguchi, Kae Nemoto, W. J. Munro, Y. Yamamot
o, Hybrid Quantum Repeater Using Bright Coherent Light, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 米国
, American Physical Society, 2006年6月23日, Vol.96, pp.240501-1~240501-4

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H04B 10/70

H04L 9/12