

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4748311号
(P4748311)

(45) 発行日 平成23年8月17日(2011.8.17)

(24) 登録日 平成23年5月27日(2011.5.27)

(51) Int.Cl. F I
H O 4 B 10/00 (2006.01) H O 4 B 9/00 B

請求項の数 23 (全 28 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2005-316320 (P2005-316320) (22) 出願日 平成17年10月31日(2005.10.31) (65) 公開番号 特開2007-124484 (P2007-124484A) (43) 公開日 平成19年5月17日(2007.5.17) 審査請求日 平成20年9月19日(2008.9.19)</p> <p>(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願(平成17年度独立行政法人情報通信研究機構における委託研究)は産業再生法第30条の適用を受けるもの</p>	<p>(73) 特許権者 000004237 日本電気株式会社 東京都港区芝五丁目7番1号 (74) 代理人 100097157 弁理士 桂木 雄二 (72) 発明者 前田 和佳子 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 (72) 発明者 田島 章雄 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 (72) 発明者 田中 聡寛 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 微弱光の光パワー測定方法および装置、それを用いた光通信システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光パルス列の光パワーを測定する装置において、
 駆動タイミングに従って光子の到達の有無を検出する光子検出手段と、
 前記光子検出手段により検出された光子の数を計数する計数手段と、
 前記駆動タイミングをシフトさせることで前記計数手段により計数された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する測定手段と、
 を有することを特徴とする光パワー測定装置。

【請求項2】

前記測定手段は、前記駆動タイミングを所定シフト量ずつ所定の位相範囲で順次シフトさせることを特徴とする請求項1に記載の光パワー測定装置。

【請求項3】

前記測定手段は、シフトするそれぞれの駆動タイミングの位相で、複数周期に相当する期間、前記計数手段により光子の数を計数することを特徴とする請求項2に記載の光パワー測定装置。

【請求項4】

前記測定手段は、前記駆動タイミングを連続的にシフトさせ、前記所定の位相範囲のシフトが終了したときに、前記計数手段の光子数から前記光パルス列の光パワーを測定することを特徴とする請求項2に記載の光パワー測定装置。

【請求項5】

10

20

前記測定手段は、前記駆動タイミングを前記所定シフト量ずつ順次シフトさせ、シフトするそれぞれの駆動タイミングでの前記計数手段の光子数をメモリに記録し、前記所定の位相範囲のシフトが終了したときに、前記メモリに記録された光子数の系列から前記光パルス列の光パワーを測定することを特徴とする請求項 2 に記載の光パワー測定装置。

【請求項 6】

光パルス列の光パワーを測定する装置において、
 駆動タイミングに従って光子の到達の有無を検出する光子検出手段と、
 前記駆動タイミングの位相をシフトさせるタイミング制御手段と、
 前記光子検出手段により検出された光子の数を計数する計数手段と、
 前記駆動タイミングの位相を順次シフトさせながら、それぞれの駆動タイミングにおいて前記計数手段により計数された光子数をメモリに格納し、格納された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する測定手段と、
 を有する光パワー測定装置。

10

【請求項 7】

前記メモリには、前記駆動タイミングの位相シフト量とそれに対応する光子数とが順次格納されることを特徴とする請求項 6 に記載の光パワー測定装置。

【請求項 8】

前記光パルス列の光パワーは、前記駆動タイミングの位相シフト量に対応する光子数の所定の位相範囲における総和に対応することを特徴とする請求項 7 に記載の光パワー測定装置。

20

【請求項 9】

前記光子検出手段は、駆動タイミングに従ってバイアス電圧が印加され、バイアス電圧が印加されている間だけ光子入射の有無を検出できる光電変換素子であることを特徴とする請求項 1 - 8 のいずれかに記載の光パワー測定装置。

【請求項 10】

各光パルスは 1 フォトン / パルス以下の微弱光であることを特徴とする請求項 1 - 9 のいずれかに記載の光パワー測定装置。

【請求項 11】

複数の通信チャネルを通して第 1 通信器と第 2 通信器との間で情報伝送を行う光通信システムにおいて、

30

前記第 1 通信器は、

与えられた変調タイミングに従って、送信すべき原情報により光パルス列を変調し、一の通信チャネルを通して送信する変調手段と、

前記変調タイミングを変更可能なタイミング供給手段と、

を含み、

前記第 2 通信器は、

前記一の通信チャネルを通して到達した光パルス列の光子の有無を駆動タイミングに従って検出する光子検出手段と、

前記光子検出手段により検出された光子の数を計数する計数手段と、

前記駆動タイミングをシフトさせることで前記計数手段により計数された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する測定手段と、

40

前記測定手段により測定された光パワーに基づいて前記第 1 通信器の前記変調タイミングを別の通信チャネルを通して制御するタイミング制御手段と、

を含む、

ことを特徴とする光通信システム。

【請求項 12】

前記タイミング制御手段は、前記変調タイミングを時間軸上でずらしながら前記測定手段により測定される光パワーを監視し、所望の光パワーが得られる変調タイミングを検索することを特徴とする請求項 11 に記載の光通信システム。

【請求項 13】

50

複数の通信チャネルを通して光送信器との間で情報伝送を行う光受信器において、
 一の通信チャネルを通して前記光送信器から到達した光パルス列の光子の有無を駆動タイミングに従って検出する光子検出手段と、
 前記光子検出手段により検出された光子の数を計数する計数手段と、
 前記駆動タイミングをシフトさせることで前記計数手段により計数された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する測定手段と、
 前記測定手段により測定された光パワーに基づいて前記光送信器が行う光パルスに対する変調タイミングを別の通信チャネルを通して制御するタイミング制御手段と、
 を有することを特徴とする光受信器。

【請求項 14】

10

前記光子検出手段は第 1 光子検出器と第 2 光子検出器とからなり、
 前記一の通信チャネルを通して前記光送信器から到達した光パルス列の変調状態に応じて前記第 1 光子検出器および前記第 2 光子検出器のいずれか一方に光信号を出力する光変調検出手段を更に有することを特徴とする請求項 13 に記載の光受信器。

【請求項 15】

前記測定手段は前記第 1 光子検出器および前記第 2 光子検出器のそれぞれにおいて測定された光パワーの比を算出し、前記タイミング制御手段は前記光パワーの比に基づいて前記光送信器の変調タイミングを制御することを特徴とする請求項 14 に記載の光受信器。

【請求項 16】

光パルス列の光パワーを測定する方法において、
 光子検出器の駆動タイミングを順次シフトさせ、
 前記駆動タイミングに従って前記光子検出器を駆動することで光子の到達の有無を検出し、
 検出された光子の数を計数し、
 計数された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する、
 ことを特徴とする光パワー測定方法。

20

【請求項 17】

前記駆動タイミングは所定シフト量ずつ所定の位相範囲で順次シフトさせることを特徴とする請求項 16 に記載の光パワー測定方法。

【請求項 18】

30

シフトするそれぞれの駆動タイミングの位相で、複数周期に相当する期間、光子の数を計数することを特徴とする請求項 17 に記載の光パワー測定方法。

【請求項 19】

前記駆動タイミングを連続的にシフトさせ、前記所定の位相範囲のシフトが終了したときに、前記光子数から前記光パルス列の光パワーを測定することを特徴とする請求項 17 に記載の光パワー測定方法。

【請求項 20】

前記駆動タイミングを前記所定シフト量ずつ順次シフトさせ、シフトするそれぞれの駆動タイミングでの前記光子数をメモリに記録し、
 前記所定の位相範囲のシフトが終了したときに、前記メモリに記録された光子数の系列から前記光パルス列の光パワーを測定する、
 ことを特徴とする請求項 17 に記載の光パワー測定方法。

40

【請求項 21】

光パルス列の光パワーを測定する方法において、
 光子検出器の駆動タイミングの位相をシフトさせ、
 前記駆動タイミングに従って前記光子検出器を駆動することで光子の到達の有無を検出し、
 検出された光子の数を計数し、
 それぞれの駆動タイミングにおいて計数された光子数をメモリに格納し、
 格納された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する、

50

を有する光パワー測定方法。

【請求項 2 2】

コンピュータに、光パルス列の光パワーを測定する装置を実装するプログラムにおいて、
光子検出器の駆動タイミングを順次シフトさせるステップと、
前記駆動タイミングに従って前記光子検出器を駆動することで光子の到達の有無を検出するステップと、
検出された光子の数を光子カウンタにより計数するステップと、
光子カウンタの光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定するステップと、
を有することを特徴とする光パワー測定プログラム。

10

【請求項 2 3】

コンピュータに、光パルス列の光パワーを測定する装置を実装するプログラムにおいて、
光子検出器の駆動タイミングの位相をシフトさせるステップと、
前記駆動タイミングに従って前記光子検出器を駆動することで光子の到達の有無を検出するステップと、
検出された光子の数を計数するステップと、
それぞれの駆動タイミングにおいて計数された光子数をメモリに格納するステップと、
格納された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定するステップと、
を有することを特徴とする光パワー測定プログラム。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は微弱光の光パワーを測定する技術に係り、特に微弱光の光パワーを測定する方法および装置ならびに当該測定方法を用いた光通信システムに関する。

【背景技術】

【0002】

光通信の分野において、量子暗号鍵配布システムは伝送路の高秘匿性を実現するものとして近年盛んに研究されており種々の提案がなされている。

【0003】

基本的なものとしては、Bennett, Brassardの論文(非特許文献1)に、2通りの基底を用いて送信器および受信器で量子暗号鍵を共有するシステムが提案されている。この提案によれば、送信器において、量子の状態を表す2通りの基底(D, R)と2値の乱数データ(0, 1)との組み合わせによる計4通りの情報を用いて光子を位相変調し送信する。受信器では、送信器とは独立した基底(D, R)で光子を受信して受信データを保存する。その後、通常のチャネルを用いて送信時と受信時の基底が同じであるか否かを検証し、同じ基底の受信データだけから最終的な共有秘密データを決定する。

30

【0004】

特に、スイスのジュネーブ大学で提案されたPlug & Play方式の量子暗号鍵配布システム(非特許文献2)は、光ファイバ伝送路における偏光の揺らぎを補償することができるため、偏光に敏感な量子暗号鍵配布システムを実用化するための方式として期待されている。Plug & Play方式の概略的構成を図17に示す。

40

【0005】

図17に示すように、Plug & Play方式では、量子暗号鍵を受信する受信器に設けられたレーザーLDが光パルスPを生成する。光パルスPは光コプラにより2分割され、一方の光パルスP1は短いパス(Short Path)を、他方の光パルスP2は長いパス(Long Path)をそれぞれ通ってダブルパルスとして送信器へ送信される。

【0006】

送信器にはファラデーミラーと位相変調器Aが設けられ、受信した光パルスP1およびP2はファラデーミラーで反射することで偏光状態が90度回転して受信器へ返送される

50

。その際、位相変調器 A は光パルス P 2 が通過するタイミングで光パルス P 2 を位相変調し、位相変調された光パルス P 2^a が受信器へ返送される。

【 0 0 0 7 】

受信器の偏光ビームスプリッタ P B S は、送信器から受信した光パルス P 1 および P 2^a の偏光状態が 9 0 度回転していることから、これら受信パルスをそれぞれ送信時とは異なるパスへ導く。すなわち受信した光パルス P 1 は長いパスを通り、位相変調器 B を通過するタイミングで位相変調され、位相変調された光パルス P 1^b が光カプラに到達する。他方、送信器で位相変調された光パルス P 2^a は送信時とは異なる短いパスを通過して同じく光カプラに到達する。したがって、送信器側で位相変調された光パルス P 2^a と受信器側で位相変調された光パルス P 1^b とが干渉し、その結果が光子検出器 A P D 0 または A P D 1 により検出される。なお、光子検出器としてはアバランシェ・フォトダイオード (Avalanche Photo Diode) が用いられ、ゲイテッドガイガーモード (Gated Geiger Mode : GGM) で駆動される。

10

【 0 0 0 8 】

このように、受信器で発生した 1 つの光パルスが 2 分割され、それにより得られたダブルパルス P 1 および P 2 が受信器と送信器との間でそれぞれ変調を受けながら往復し、全体として同じ光パスを通過して干渉する。したがって、光子検出器 A P D 0 または A P D 1 で観測される干渉結果は光ファイバ伝送路の遅延変動が相殺され、送信器での位相変調量と受信器での位相変調量との差に依存するものとなる。

【 0 0 0 9 】

このような構成を有する P l u g & P l a y 方式では次のような同期をとる必要がある。

20

【 0 0 1 0 】

(1) 送信器では、受信器から送られた光パルス P 2 が通過するタイミングに合わせて位相変調器 A に位相変調量に応じた電圧を印加する必要がある。

【 0 0 1 1 】

(2) 受信器では、送信器から反射されてきた光パルス P 1 が通過するタイミングに合わせて位相変調器 B に位相変調量に応じた電圧を印加する必要がある。

【 0 0 1 2 】

(3) さらに、受信器では、戻ってきた光パルスの入射タイミングに合わせて光子検出器 A P D 0 および A P D 1 にバイアスを印加する必要がある (ゲイテッドガイガーモードでの超高感度受信)。

30

【 0 0 1 3 】

このように、量子暗号鍵配布システムにおいて実際に高い干渉特性を実現して量子暗号鍵を安定して生成するためには、送信側の位相変調器 A、受信側の位相変調器 B および光子検出器 A P D を光パルスが到達するタイミングに合わせて駆動するというタイミング制御が不可欠である。

【 0 0 1 4 】

【非特許文献 1】 "QUANTUM CRYPTOGRAPHY, PUBLIC KEY DISTRIBUTION AND COIN TOSSING" IEEE Int. Conf. on Computers, Systems, and Signal Processing, Bangalore, India, pp.175-179, Bennett, Brassard

40

【非特許文献 2】 "Automated 'plug & play' quantum key distribution", Electronics Letters, Vol.34, No.22, p2116-2117, G. Ribordy

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 5 】

上述した量子暗号鍵配布システムのような位相変調を利用して情報を送信するシステムの場合、送信器の位相変調器 A を駆動するタイミングが正しいかどうかは、受信器側の光子検出器 A P D 0 あるいは A P D 1 で観測される干渉結果を参照しない限り判断できない。したがって、上記タイミング制御を正確に実行するためには、受信器における干渉計の

50

干渉消光比（光子検出器 A P D 0 および A P D 1 で観測される光パワーの比）を正しく知っておく必要がある。

【 0 0 1 6 】

しかしながら、ゲイテッドガイガーモード受信の場合、光パルスの到達タイミングに合わせた所定時間間隔だけ光子検出器 A P D にバイアスを印加し、ゲート電圧印加時に光子が到達すれば光子検出器 A P D がブレイクダウンしてゲート電圧の印加が終了するまで増倍電流が流れ続ける。したがって、光子検出器 A P D により検出できるのは、ノイズを除けば、ゲート電圧印加時に光子が到達したか否かだけであり、したがって光子検出の時間平均である干渉消光比を測定することができない。

【 0 0 1 7 】

そこで、従来では、伝送路が変わるごとに、光子検出器 A P D に代えて例えば光パワーメータを用いて干渉消光比を測定し、送信器の位相変調器に電圧を印加するタイミングを決定する必要があった。すなわち、送信器の駆動タイミング決定用の光パワーメータと、量子暗号鍵生成用の光子検出器 A P D との両方を受信側に用意しておく必要があった。

【 0 0 1 8 】

本発明が解決しようとする課題は、光子検出器を用いた微弱光の光パワー測定方法および装置を提供することにある。

【 0 0 1 9 】

さらに、本発明は、上記微弱光パワー測定方法を用いて、送信器におけるタイミングを最適化し、正しいタイミングで安定した情報伝送を可能にする光通信システムを提供する。さらに、送信側の位相変調器を正しいタイミングで駆動して高速で安定した暗号鍵の配布を可能にする光通信システムを提供する。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 2 0 】

本発明によれば、駆動タイミングに従って光子の到達の有無を検出する光子検出手段（光子検出器）を用いて光パルス列の光パワーを測定する。駆動タイミングをシフトさせることで光子カウンタ（計数手段）により計数された光子数に基づいて光パルス列の光パワーを測定する。

【 0 0 2 1 】

本発明による光通信システムにおいて、第 1 通信器は、与えられた変調タイミングに従って送信すべき原情報により光パルス列を変調し一の通信チャンネルを通して送信する変調手段と、前記変調タイミングを変更可能なタイミング供給手段と、を含み、第 2 通信器は、前記一の通信チャンネルを通して到達した光パルス列の光子の有無を駆動タイミングに従って検出する光子検出手段と、前記光子検出手段により検出された光子の数を計数する計数手段と、前記駆動タイミングをシフトさせることで前記計数手段により計数された光子数に基づいて前記光パルス列の光パワーを測定する測定手段と、前記測定手段により測定された光パワーに基づいて前記第 1 通信器の前記変調タイミングを別の通信チャンネルを通して制御するタイミング制御手段と、を含む。

【発明の効果】

【 0 0 2 2 】

以上説明したように、本発明によれば、光子検出器に印加するバイアスのタイミング（駆動タイミング）の位相をシフトし、その間に到達した光子の数を光子カウンタ（計数手段）によりカウントする。光パルスの波長が知られていれば、この光子数から光パルス列の光パワーを求めることができる。したがって、光子検出器を用いて微弱光の光パワーを測定することが可能となる。

【 0 0 2 3 】

光子検出器を用いて光パワーあるいは対応する物理量を測定することができるので、光通信システムにおける送信器のタイミングを最適化し、正しいタイミングで安定した情報伝送が可能となる。さらに、量子暗号鍵配布システムに適用した場合、送信側の位相変調器を正しいタイミングで駆動できるために高速で安定した暗号鍵の配布が可能となる。

10

20

30

40

50

【発明を実施するための最良の形態】

【0024】

図1は本発明の一実施形態による微弱光パワー測定装置の技略的構成を示すブロック図である。光子検出器1は、バイアス電圧印加時に単一光子の入射の有無を検出できる光電変換素子であり、典型的には、アバランシェ・フォトダイオードである。光子検出器1は、バイアス印加回路2からのバイアス電圧により駆動され、バイアス電圧の印加タイミングおよび印加時間はタイミング制御回路3により制御される。すなわち、光子検出器1は、光パルスを検出しようとするときのみバイアス電圧が印加されるゲイテッドガイガーモードで動作し、高感度受信を行うことができる。

【0025】

タイミング制御回路3は、光パワー測定部4からのタイミングシフト制御によりクロック信号CLKの位相を時間軸上で0から $2\pi/n$ まで $2\pi/n$ ずつ自由にシフトさせることができる。ここでは、クロック信号CLKの周期が入射する光パルスの周期とほぼ一致するが、どの位相で光パルスが到達しているのか分からないものとする。なお、一例として、1つの光パルスのパルス幅は約1ナノ秒、光子検出器1に印加されるパルス状バイアス電圧のパルス幅は1~5ナノ秒程度、これらの周期Tは約16ナノ秒である。

【0026】

位相シフトさせたクロック信号のタイミングが光パルスの到達タイミングと同じになれば、光子検出器1は光パルスの光子を検出することができる。光子検出器1により光子が検出されると、光子カウンタ5によりカウントされる。光子カウンタ5は、光パワー測定部4の制御の下で、カウントした光子数をメモリ6に格納する。ただし、実際には、ダークノイズによるカウント値も含まれる。

【0027】

光パワー測定部4は、後述するように、クロック信号CLKの位相を0から $2\pi/n$ まで $2\pi/n$ ずつ順次シフトさせることで、それぞれのクロック位相に対応したタイミングでバイアス電圧を光子検出器1に印加し、その際のクロック位相と検出された光子数とをメモリに格納する。クロック信号CLKの位相が $2\pi/n$ までシフトすると、メモリ6に格納されたデータに基づいて到達光パルス列の光パワーを測定する。クロック信号CLKの周期Tに相当する時間間隔をタイムスロットと呼ぶと、クロック信号CLKの位相を0から $2\pi/n$ までシフトさせることは、バイアス電圧の印加タイミングをタイムスロットの全範囲わたって時間的に移動させることに相当する。

【0028】

なお、光パワー測定部4は、プログラムメモリ7に格納されたパワー測定プログラムをコンピュータあるいはプログラム制御プロセッサ上で実行することにより実装可能である。以下、本実施形態による微弱光パワーの測定方法を詳細に説明する。

【0029】

図2は本実施形態による微弱光パワーの測定方法におけるバイアス印加タイミングの位相シフトの状態を説明するための波形図であり、図3は位相シフト量に対する光子カウントの変化を模式的に示すグラフである。

【0030】

図2に示すように、まず、光パワー測定部4はタイミング制御回路3のクロックCLKのタイミングシフトを0に設定し、次に、タイミング制御回路3のクロックCLKのタイミングを1ステップ($2\pi/n$)だけシフトさせる。この結果、光子検出器1に印加するパルスバイアスのタイミングが $2\pi/n$ ずれる。このタイミングで一定時間(実際には複数タイムスロットに相当する時間)、パルス状のバイアス電圧を光子検出器1に印加する。このバイアス電圧が印加されているときに光子の到達あるいはダークノイズの発生があれば、光子カウンタ5により光子検出としてカウントされ、カウントされた光子数がメモリ6に格納される。

【0031】

光パワー測定部4は、同様にクロックCLKのタイミングを $2\pi/n$ ずつn回シフトさ

10

20

30

40

50

せ、その都度、光子カウンタ 5 でカウントされた光子数が、必要に応じてそのときの位相シフト量とともに、メモリ 6 に格納される。j 回タイミングシフトしたときのクロックのシフト量 τ_j と光子カウント数 c_j とは、図 3 のようにグラフ化できる。

【0032】

図 3 に示すカウント値の変化では、ある位相シフト量付近で 1 つの明確なピークが存在するが、常にピークがあるとは限らない。光子が到達していない場合にはダークカウントしか計数されないので、図 3 のようなピークはなくどの位相でも低いカウント値になる。光子が到達していれば、その到達タイミングの位相のみに図 3 のようなピークが現れる。

【0033】

図 3 に示すように、クロックのタイミングシフト数 n 回の光子カウントの和を P とすると、P は次式で表される。

【0034】

【数 1】

$$P = \sum_{i=1}^n c_i$$

【0035】

この光子カウント総数 P は、図 3 において $\tau = 0$ および $\tau = 2$ と光子カウント数 c_j で囲まれた部分の斜線部の面積を対応する。すなわち、これは平均光パワーを示している。したがって、上述したように光子検出器 1 に印加するバイアスのタイミングを 0 から 2 までシフトして光子検出数をカウントすることにより、光子検出器を用いて微弱光の光パワーを測定することが可能となる。

【0036】

次に、上記パワー測定方法を実際に量子暗号システムにおける干渉測定に適用した実施例について説明する。

【0037】

1. 第 1 実施例

図 4 は本発明の第 1 実施例による温度無依存型 Plug & Play システムの構成を示すブロック図である。ここでは、2 つの通信装置のうち量子通信の送信側を送信器 10、受信側を受信器 20 と呼び、それらが光伝送路 30 により光学的に接続されているシステム構成を例示する。

【0038】

本実施例による Plug & Play 方式の基本的な構成および動作は、図 17 で説明したとおりであるが、送信器 10 においてファラデーミラーの代わりに P B S ループを採用した点が異なっている。

【0039】

送信器 10 の量子ブロック 100 は P B S ループ 104 を有し、P B S ループ 104 は、位相変調器 102 および偏光ビームスプリッタ (P B S) 103 から構成される。

【0040】

位相変調器 102 は、同期ブロック 110 から供給されるクロック信号に従って、通過する光パルス列に対して位相変調を行う。位相変調の深さは、通信制御部 130 により与えられる位相制御信号により決定され、ここでは基底 (+ / ×) および乱数 (0 / 1) の 4 通りの組み合わせにそれぞれ対応する 4 通りの深さ (0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$) となる。位相制御信号は変調の深さに対応した電圧であり、光パルスが位相変調器 102 を通過するタイミングで位相変調器 102 に印加され、当該光パルスの位相変調が行われる。

【0041】

P B S ループ 104 はファラデーミラーと同様の機能を有し、入射光の偏光状態が 90 度回転して送出される。本実施例の P B S ループについては後述する。

【0042】

さらに、送信器 10 には、同期ブロック 110、データ通信部 120 および通信制御部

10

20

30

40

50

130が設けられている。同期ブロック110は、通信制御部130の制御の下で、受信器20との間でクロック信号のやり取りを行い、位相変調器102に対してクロックCLKを供給する。通信制御部130は、データ通信部120を通して受信器20との間で制御信号のやり取りを行い、受信器20からの制御信号に従って量子ブロック100および同期ブロック110の制御を行う。

【0043】

受信器20の量子ブロック200は、図17に示す構成と基本的に同じである。基準となるクロック信号に従ってレーザ201により生成された光パルスPは、光サーキュレータ202により光カプラ203へ導かれ、光カプラ203により2分割される。分割された一方の光パルスP1は短いパス(Short Path)204を通して偏光ビームスプリッタ(PBS)207へ送られる。分割された他方の光パルスP2は長いパス(Long Path)205に設けられた位相変調器206を通してPBS207へ送られる。これら光パルスP1およびP2はPBS207で合波され、ダブルパルスとして波長多重フィルタ40および光伝送路30を通して送信器10へ送信される。送信器10から戻ってきたダブルパルスは、PBS207によってそれぞれ送信時とは異なるパスへ送られ、後述するように光カプラ203で干渉し、その干渉結果が光子検出器208(以下、APD0と記す。)あるいは209(以下、APD1と記す。)により検出される。なお、短いパス(Short Path)204と長いパス(Long Path)205は偏波保存ファイバであり、光サーキュレータ202と光カプラ203は偏波保存型である。

10

【0044】

受信器10には、量子ブロック200に対して位相変調用のクロックCLK1と、光子検出器をゲイテッドガイガーモードで動作させるためクロックCLK2とを供給する同期ブロック210が設けられている。同期ブロック210は、送信器10の同期ブロック110との間で同期クロックのやり取りを行う。さらに、受信器20の通信制御部230は、データ通信部220を通して送信器10との間で制御信号のやり取りを行い、量子ブロック200および同期ブロック210を制御する。

20

【0045】

これらに加えて、本実施例によるシステムの受信器10には、通信制御部230を制御して送信器10および受信器20のタイミングを最適化するタイミング制御部240と、光子検出器APD0およびAPD1を用いて光パワーを測定するためのパワー測定部250とが設けられている。パワー測定部250は、タイミング制御部240、光子カウンタ260およびメモリ270を制御し、光子検出器APD0およびAPD1によりそれぞれ検出された光子の数を光子カウンタ260により計数し、それらカウント値を最適化タイミングの決定および光パワーを測定するための測定データとしてメモリ270に格納する。タイミング制御部240および光パワー測定部250は、プログラムメモリ280に格納されたプログラムをコンピュータあるいはプログラム制御プロセッサ上で実行することにより実現可能である。

30

【0046】

なお、同期ブロック110および210で送受信されるクロック信号と、データ通信部120および220で送受信される制御信号とは、量子ブロック100および200で送受信される光パルスとはそれぞれ別波長の信号であり、波長多重フィルタ40および50によって合波され、光伝送路30中を波長分割多重伝送される。また、送信器10に設けられた同期ブロック110と受信器20に設けられた同期ブロック210とは、クロック信号を送信する光源として波長安定化レーザをそれぞれ有し、量子ブロック100および200にそれぞれ安定したクロック信号を供給することができる。

40

【0047】

次に、受信器20の量子ユニット200から光伝送路30に送出されたダブルパルスP1およびP2の経路およびその間の処理について更に詳細に説明する。

【0048】

送信器10において、伝送路30から波長多重フィルタ50を通して到来したダブルパ

50

ルス P_1 および P_2 は、 $PBS103$ でさらに分離され、時計回りのダブルパルス P_{1CW} および P_{2CW} と反時計回りのダブルパルス P_{1CCW} および P_{2CCW} の4つのパルス、すなわちカルテットパルスとなって位相変調器102をそれぞれ反対方向で通過し、それぞれ出射したポートとは反対の PBS ポートへ入射する。

【0049】

位相変調器102は、後述するように、時計回りのダブルパルスの後方のパルス P_{2CW} を前方のパルス P_{1CW} に対して位相変調するとともに、反時計回りのダブルパルスと時計回りのダブルパルスとの間に の位相差を与える。このように、位相変調器102は、カルテットパルスの各パルスに任意の位相変調を施すようにタイミング制御される必要がある。

10

【0050】

こうして必要に応じて位相変調されたカルテットパルスは $PBS103$ で合波され再びダブルパルスに戻る。上述したように後方のパルスのみが伝送情報により位相変調されたので、出射ダブルパルスを P_1 および P_2^a と記す。このとき PBS ループ入射時に対して出射時は偏波が 90° 回転しているので、結果的にファラデーミラーと同等の効果を得られる。

【0051】

受信器20の偏光ビームスプリッタ $PBS207$ は、送信器10から受信した光パルス P_1 および P_2^a の偏光状態が 90° 度回転していることから、これら受信パルスをそれぞれ送信時とは異なるパスへ導く。すなわち受信した光パルス P_1 は長いパスを通り、位相変調器206を通過するタイミングで指定された基底で位相変調され、位相変調された光パルス P_1^b が光カプラ203に到達し、他方、光パルス P_2^a は送信時とは異なる短いパスを通過して同じく光カプラに到達する。

20

【0052】

こうして送信器側で位相変調された光パルス P_2^a と受信器側で位相変調された光パルス P_1^b とが干渉し、その結果が光子検出器 $APD0$ または $APD1$ により検出される。光子検出器 $APD0$ および $APD1$ は、同期ブロック210から供給されるクロック信号 $CLK2$ に従ってゲイテッドガイガーモードで駆動され、その検出信号は通信制御部230および光子カウンタ260へ出力される。後述するように、タイミング制御部240は、タイミング制御シーケンスにおいて検出された光子検出器 $APD0$ および $APD1$ の検出信号をメモリ270に蓄積し、最適タイミングの決定に利用する。また、光子カウンタ260のカウント値もそのときの位相シフト量とともにメモリ270に格納される。

30

【0053】

- 1.1) PBS ループでの位相変調
以下、 PBS ループの動作を説明する。

【0054】

図5は、送信器の PBS ループの動作を説明するための模式的構成図である。上述したように、入射したダブルパルス P_1 および P_2 は、 $PBS103$ で直交した偏光成分に分離され、カルテットパルス301~304になる。光パルス301および302は光パルス P_1 の一偏光成分およびその直交偏光成分にそれぞれ対応し、光パルス303および304は光パルス P_2 の一偏光成分およびその直交偏光成分にそれぞれ対応する。

40

【0055】

$PBS103$ の2つのループ側ポートは、定偏波光ファイバで位相変調器102の2つの光ポートにそれぞれ接続されているが、その光路長は異なっている。ここでは、光パルス301および303が光パルス302および304よりも時間 T だけ早く位相変調器102に入射するように、光路長が設定されているものとする。この時間差 T は、光パルス幅より長くダブルパルス P_1 と P_2 の間隔より短く設定される。

【0056】

図6は PBS ループを伝播する光パルスの時間順序を示す説明図である。光パルス301および303は光パルス302および304よりも時間 T だけ早く位相変調器102に

50

到達するので、各光パルスは、図6(A)～(F)に示すように異なった時刻 $t_1 \sim t_6$ で位相変調器102を通過する。したがって、パルス間隔に同期して位相変調器102に印加する電圧を変化させることにより各光パルスに異なった位相差を与えることができる。ここでは、各パルスに与える位相差を表1のように設定する。

【0057】

【表1】

基底, 乱数値	光パルス301 の位相	光パルス302 の位相	光パルス303 の位相	光パルス304 の位相
+, 0	0	π	0	π
+, 1	0	π	π	0
×, 0	0	π	$\pi/2$	$3\pi/2$
×, 1	0	π	$3\pi/2$	$\pi/2$

表1に示すように、基底が“+”、乱数値が“0”の場合には光パルス301と303の間に0の位相差、基底が“+”、乱数値が“1”の場合には光パルス301と303の間に π の位相差、基底が“×”、乱数値が“0”の場合には光パルス301と303の間に $\pi/2$ の位相差、基底が“×”、乱数値が“1”の場合には光パルス301と303の間に $3\pi/2$ の位相差をそれぞれ与える。さらに、光パルス301および303と光パルス302および304との間には光パルス301と光パルス303との間と同じ大きさの位相差を与え、同時に光パルス301と光パルス302との間、光パルス303と光パルス304との間には0の位相差を与える。

【0058】

このように量子暗号鍵配布システムでは、ダブルパルスまたはカルテットパルスの各パルスに任意の位相変調を施さなければならない。すなわち、電圧で位相を制御する位相変調器102および206では、各パルスが通り過ぎるタイミングで必要な変調を与えるための電圧を印加する必要がある。位相変調器を駆動するタイミングが正しくないと誤ったパルスを変調してしまう。よって、位相変調器102および206を駆動するクロックのタイミング制御を行い、そのタイミングが正しいことを確認しなければならない。

【0059】

1.2) 干渉消光比の測定

図7は、本発明の第1実施例によるシステムにおける受信器20での干渉消光比の測定手順を含む送信器10のタイミング検索を示すフローチャートである。送信器10の位相変調器102を駆動するクロックCLKのタイミングが正しいことを確認するためには、受信器20において干渉消光比を測定する必要がある。ここで、干渉消光比とは、光子検出器APD0およびAPD1に出力される光パワーの比をいう。

【0060】

しかしながら、既に説明したように、光子検出器APDは光子到達の有無を判定するのみで、光子検出の時間平均である光パワーを直接測定することはできない。そこで、本実施例によれば、光子検出器APDを駆動するクロックCLK2のタイミングを順次シフトさせることで、その都度得られた光子検出結果から間接的に光パワーを求める。

【0061】

図7において、まず、タイミング制御部240は通信制御部230を制御して、4通りの基底および乱数の組み合わせから1つを選択し、選択された基底を受信器20の位相変調器206に設定し、選択された基底および乱数値の組み合わせを送信器10の通信制御部130へ指定する(ステップS401)。これにより、通信制御部130は位相変調器102に対して位相制御信号を出力し、選択された基底および乱数値に対応する変調深さの位相を設定する。

【0062】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の位相変調器102に印加される電圧のタイミングシフトをリセットするように送信器10の通信制御部130へ指示する(ステ

10

20

30

40

50

ップS402)。これによって、同期ブロック110はクロック信号CLKのシフト量を初期値0にリセットする。

【0063】

タイミングシフトが初期化されると、タイミング制御部240は通信制御部130へタイミングシフトを指示し、これによって同期ブロック110は、所定の整数Nを用いて、位相変調器102への電圧印加タイミングを $2/N$ だけシフトさせ、このタイミングで設定された位相変調の電圧が印加される(ステップS403)。これによって、通過するカルテットパルスの各光パルスが上述したように変調され、ダブルパルスとして受信器20へ折り返される。

【0064】

受信器20は、受信したダブルパルスを上述したように指定された基底により位相変調器206で変調し、光カプラ203で干渉させて光子検出器APD0およびAPD1で光子検出を行う。このとき、光子検出器APD0およびAPD1は光子のやってくるタイミングのみバイアス電圧を高く設定して光子を受信する必要がある。すなわち、光子のタイミングに一致したクロックで光子検出器APDを駆動しなければならない。しかしながら、クロックの全位相 2π のうち、どのタイミングに光子があるのかはこの時点ではわからない。

【0065】

そこで、タイミング制御部240は受信器20の光子検出器APD0およびAPD1に印加されるバイアスのタイミングシフトをリセットするように通信制御部230へ指示する。これによって同期ブロック210はクロック信号CLK2のシフト量を初期値0にリセットする(ステップS404)。

【0066】

次に、タイミング制御部240は、同期ブロック210から出力されるクロック信号CLK2のタイミングを1ステップシフトさせるように指示し、同期ブロック210は、所定の整数nを用いて、光子検出器APD0およびAPD1へのバイアス印加タイミングを $2/n$ だけシフトさせる(ステップS405)。これによって、 $2/n$ だけシフトしたタイミングで光子検出器APD0およびAPD1にバイアス電圧が印加され光子の検出が行われる。各光子検出器で光子が検出されるごとに光子カウンタ260によりそれぞれの光子検出器の光子数がカウントされる。バイアス印加タイミングの位相を1ステップ($2/n$)ずつ連続的にシフトさせながら光子数のカウントを行う動作をn回繰り返す(ステップS406)。

【0067】

こうしてシフト量が 2π に到達すると、現在指定されている乱数および基底と送信器10の位相変調タイミングシフト量 ϕ_i ($i = 1 \sim N$)とに関連づけて、それまでに光子カウンタ260でカウントされたそれぞれの光子検出器の光子数をメモリ270に格納する(ステップS407)。ここで、メモリ270に記録された光子カウント数は図3で説明したように $t = 0$ から $t = 2\pi$ で囲まれた領域の面積に相当する。すなわちこれは光パワーを意味する。

【0068】

タイミング制御部240は、位相変調器102への電圧の印加タイミングを $2/N$ ずつシフトさせながら、光子検出器APD0およびAPD1へのバイアス印加タイミングを0から 2π までシフトさせて検出光子数をカウントするというステップS403~S407を、N回繰り返す(ステップS408)。位相変調器102へのすべての電圧印加タイミングについて光子カウント数が測定されるまで上記ステップS403~407を繰り返すと(ステップS408のYES)、次の基底および乱数値を指定して(ステップS401)、上記ステップS402~S408を繰り返す。

【0069】

タイミング制御部240は、以上のステップS401~408を、4通りの基底および乱数の組み合わせすべてについて実行する(ステップS409)。ただし、後述する最適

10

20

30

40

50

点が見出せるならば、4通りの組み合わせ全てについて実行する必要はない。必要な基底および乱数の組み合わせでの測定が終了すると(ステップS409のYES)、タイミング制御部240はメモリ270に記録された光子検出器APD0およびAPD1のそれぞれの光子カウント数に基づいて送信器10の最適タイミングを決定し、受信器20の通信制御部130に通知し同期ブロック110に設定する(ステップS410)。

【0070】

1.3) 送信器10のクロックタイミング検索

図8(a)~(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて送信器のタイミング制御シーケンスを示すハンドシェイク図であり、図9(a)~(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて受信器で測定される有効光子カウントと干渉消光比の変化を示すグラフである。

10

【0071】

a) 基底+, 乱数0(0変調)

まず受信器20のタイミング制御部240は位相変調器206の受信基底を“+”にセットし、さらに送信器10の通信制御部130に対して位相変調器102を基底“+”、乱数“0”に対応する変調の深さに設定するよう指示する。この結果、上述した表1に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器102を通り過ぎる順で記述すると、“0 - - 0 - ”となる。

【0072】

送信器10の位相変調器102は同期ブロック110から供給されるクロックによって駆動されるので、位相変調器102による光パルスの位相変調タイミングはクロックを供給するタイミングによる。受信器20からの指示により、同期ブロック110はクロックのタイミングを0から2まで任意のステップでシフトさせることができる。

20

【0073】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の同期ブロック110のクロックのシフト量をクリアして0にするように指示し、クロックシフト量を2/Nずつシフトさせながら2に達するまで、次のステップS1~S5をN回繰り返す。

【0074】

(S1) 受信器20のタイミング制御部240は、送信器10の通信制御部130に同期ブロック110のクロックCLKを1ステップシフトするよう指示するとともに、受信器20の通信制御部230に同期ブロック210のクロックCLK2のシフト量を0にクリアするように指示する。

30

【0075】

(S2) 送信器10の通信制御部130は同期ブロック110のクロックを1ステップシフトさせる。これによって、送信器10の位相変調器102を駆動するタイミングが1ステップずれる。

【0076】

(S3) 送信器10での1ステップシフトにより、受信器20の光検出器APD0およびAPD1で観測される光パワーがそれぞれ変化する。

【0077】

(S4) 受信器20の通信制御部230は、同期ブロック210のクロックCLK2を0~2まで連続的にシフトさせる。これによって光子検出器APD0およびAPD1を駆動するタイミングが0~2まで連続的に変化し、その間、光子が検出されるごとに光子カウンタ260がインクリメントされる。したがって、クロックCLK2が0~2までシフトした時点で光子カウンタ260には光子カウントの総数が格納されている。位相シフト量と対応づけられないので、処理が高速となり実装が容易であるという利点がある。

40

【0078】

(S5) 光子カウンタ260によりカウントされた光子検出器APD0およびAPD1のそれぞれの光子検出結果をメモリ270に格納する。その際、光子カウンタ260は、ステップS4で同期ブロック210のクロックCLK2がシフトしている間に検出された

50

光子のみをカウントし、有効光子カウントとしてメモリ270に格納する。言い換えれば、有効光子カウントとは、クロックCLK2の位相シフト開始前およびシフト終了後に光子カウンタ260がカウントした数を除外した実質的なカウント値をいう。

【0079】

このようにしてメモリ270に格納された送信器10のタイミングシフト量 τ_1 に対する有効光子カウントの変化を図9(a)に示す。図9(a)の横軸は送信器10のクロックシフト量 τ_1 、縦軸はAPD0の有効光子カウント(実線)およびAPD1の有効光子カウント(破線)である。

【0080】

これより、干渉消光比は、光子検出器APD1の有効光子カウントに対する光子検出器APD0の有効光子カウントの比(P_0/P_1)として求まる(点線)。 P_0/P_1 としたのは、送信器10のクロック位相が正しいときには光子検出器APD0で光パルスが検出され、光子検出器APD1ではほとんど検出されないためである。

10

【0081】

b) 基底+, 乱数1(変調)

受信器20のタイミング制御部240は、受信器20の基底を“+”にしたまま、送信器10の通信制御部130に対して位相変調器102を基底“+”、乱数“1”に対応する変調の深さに設定するように指示する。この結果、上述した表1に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器102を通りすぎる順で記述すると“0 - - - 0”となる。

20

【0082】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の同期ブロック110のクロックCLKのシフト量をクリアして0にするように指示し、送信器10のクロックシフト量を $2/N$ ずつシフトさせながら2に達するまで、上述したステップS1~S5をN回繰り返す。これによって受信器20の光子検出器APD0およびAPD1で観測される光パワーがそれぞれ変化し、受信器20のクロックCLK2を連続的にシフトさせながら有効光子カウントをメモリ270に格納する。

【0083】

このようにしてメモリ270に格納された送信器10のタイミングシフト量 τ_1 に対する有効光子カウントの変化を図9(b)に示す。図9(b)の横軸は送信器のクロックシフト量 τ_1 、縦軸は光子検出器APD0の有効光子カウント(実線)および光子検出器APD1の有効光子カウント(破線)を示す。

30

【0084】

これより、干渉消光比は、光子検出器APD1の有効光子カウントに対する光子検出器APD0の有効光子カウントの比(P_1/P_0)で求まる(点線)。 P_1/P_0 としたのは、送信器のクロック位相が正しいときには光子検出器APD1で光パルスが検出され、光子検出器APD0ではほとんど検出されないためである。

【0085】

c) 基底x, 乱数0($/2$ 変調)

受信器20のタイミング制御部240は位相変調器206の受信基底を“x”にセットし、さらに送信器10の通信制御部130に対して位相変調器102を基底“x”、乱数“0”に対応する変調の深さに設定するよう指示する。この結果、上述した表1に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器102を通りすぎる順で記述すると、“0 - - /2 - 3 /2”となる。

40

【0086】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の同期ブロック110のクロックCLKのシフト量をクリアして0にするように指示し、送信器10のクロックシフト量を $2/N$ ずつシフトさせながら2に達するまで、上記ステップS1~S5をN回繰り返す。これによって受信器20の光子検出器APD0およびAPD1で観測される光パワーがそれぞれ変化し、受信器20のクロックCLK2を連続的にシフトさせながら有効光子カウ

50

トをメモリ270に格納する。

【0087】

このようにしてメモリ250に格納された送信器10のタイミングシフト量 τ_i に対する有効光子カウントの変化を図9(c)に示す。図9(c)の横軸は送信器のクロックシフト量 τ_i 、縦軸はAPD0の有効光子カウント(実線)およびAPD1の有効光子カウント(破線)を示す。

【0088】

これより、干渉消光比は、APD1の有効光子カウントに対するAPD0の有効光子カウントの比(P_0/P_1)で求まる(点線)。 P_0/P_1 としたのは、送信器のクロック位相が正しいときには、APD0で光パルスが検出され、APD1ではほとんど検出されないためである。

10

【0089】

d) 基底 x 、乱数 $1(3/2$ 変調)

受信器20のタイミング制御部240は、受信器20の基底を“ x ”にしたまま、送信器10の通信制御部130に対して位相変調器102を基底“ x ”、乱数“1”に対応する変調深さに設定するよう指示する。この結果、上述した表1に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器102を通りすぎ順で記述すると、“ $0 - 3/2 - /2$ ”となる。

【0090】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の同期ブロック110のクロックCLKのシフト量をクリアして0にするように指示し、送信器10のクロックシフト量を $2/N$ ずつシフトさせながら2に達するまで、上記ステップS1~S5をN回繰り返す。これによって受信器20の光子検出器APD0およびAPD1で観測される光パワーがそれぞれ変化し、受信器20のクロックCLK2を連続的にシフトさせながら有効光子カウントをメモリ270に格納する。

20

【0091】

このようにしてメモリ270に格納された送信器10のタイミングシフト量 τ_i に対する有効光子カウントの変化を図9(d)に示す。図9(d)の横軸は送信器のクロックシフト量 τ_i 、縦軸はAPD0の有効光子カウント(実線)およびAPD1の有効光子カウント(破線)を示す。

30

【0092】

これより、干渉消光比は、APD1の有効光子カウントに対するAPD0の有効光子カウントの比(P_1/P_0)で求まる(点線)。 P_1/P_0 としたのは、送信器のクロック位相が正しいときには、APD1で光パルスが検出され、APD0ではほとんど検出されないためである。

【0093】

1.4) 送信器の最適タイミング決定

図9において、APD0およびAPD1の光パワー比、すなわち干渉消光比は点線で示されている。上述したように、乱数“0”を送信した場合は干渉消光比を P_0/P_1 で表し、乱数“1”を送信した場合は干渉消光比を P_1/P_0 で表す。光子検出器APD0およびAPD1に出力された有効光子カウントとそのときの送信器10のクロックシフト量 τ_i とは、すべて受信器20のメモリ270に記憶されている。タイミング制御部240は、このデータから送信器10のクロックCLKの最適タイミングを決定する。

40

【0094】

図10は、メモリ270に格納されている光子検出器APD0およびAPD1の有効光子カウント比とクロックシフト量とのデータテーブルを模式的に示す図である。すなわち、図9で示す4通りの組み合わせにそれぞれ対応する観測データは、図10のようなテーブル形式で格納されている。これを用いて次の手順で最適タイミングを決定する。

【0095】

(1) 4通りの変調について干渉消光比を計算する： (A_i, B_i, C_i, D_i)

50

(2) 4通りの干渉消光比の積を計算する： $(E_i = A_i * B_i * C_i * D_i)$

(3) E_i が最大となる位相を選択する： $(\theta_i (\text{Max}[E_1, E_2, \dots, E_N]))$

このようにして決定したシフト量 θ_i は、図9に示す最適ラインにより示される θ_{suit} 値であり、このシフト量のクロック信号 CLK が光パルスに同期した最適のタイミングを与える。ただし、既に述べたように、最適ラインを求めることが可能であるならば、図9で示す4通りの組み合わせすべての観測データを使用する必要はない。

【0096】

1.5) 効果

以上説明したように、本実施例によれば、まず受信器20からの制御により、送信器10における位相変調器102のタイミングを1ステップずつシフトさせ、1ステップシフトごとに、受信器20で光子検出器のバイアスを高くするタイミングを0から2まで連続的に推移させながら光子検出結果をメモリ270に格納する。その光子検出結果のうち、バイアスを高くするタイミングが推移している間に検出した光子のみを有効光子カウントとして処理し、この有効光子カウントに基づいて送信器10の位相変調の最適タイミングを決定する。したがって、送信器10の位相変調が正しいタイミングであることを受信器側で光子検出器APDを用いて確認することができる。こうして送信器10での安定した位相変調が可能となり、量子暗号鍵配布システムに適用した場合、高速・安定な鍵生成を実現することができる。

【0097】

2. 第2実施例

図11は本発明の第2実施例による量子暗号システムの送信器のタイミング制御手順を示すフローチャートである。本実施例による量子暗号システムのブロック構成は、第1実施例と同様に図4に示されるとおりであり、送受信される光パルスも第1実施例と同様に図5、図6に基づいて説明したような振る舞いをする。したがって第1実施例と重複する部分の説明は省略し、図4および図11を参照しながら、干渉消光比の測定、送信器のクロックタイミング検索および最適タイミング決定の動作について詳細に説明する。

【0098】

2.1) 干渉消光比の測定

タイミング制御部240は通信制御部230を制御して、4通りの基底および乱数の組み合わせから1つを選択し、選択された基底を受信器20の位相変調器206に設定し、選択された基底および乱数値の組み合わせを送信器10の通信制御部130へ指定する(ステップS501)。これにより、通信制御部130は位相変調器102に対して位相制御信号を出力し、選択された基底および乱数値に対応する変調深さの位相を設定する。

【0099】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の位相変調器102に印加される電圧のタイミングシフトをリセットするように送信器10の通信制御部130へ指示する(ステップS502)。これによって、同期ブロック110はクロック信号CLKのシフト量を初期値0にリセットする。

【0100】

タイミングシフトが初期化されると、タイミング制御部240は通信制御部130へタイミングシフトを指示し、これによって同期ブロック110は、所定の整数Nを用いて、位相変調器102への電圧印加タイミングを $2/N$ だけシフトさせ、このタイミングで設定された位相変調の電圧が印加される(ステップS503)。これによって、通過するカルテットパルスの各光パルスが上述したように変調され、ダブルパルスとして受信器20へ折り返される。

【0101】

受信器20は、受信したダブルパルスを上述したように指定された基底により位相変調器206で変調し、光プラ203で干渉させて光子検出器APD0およびAPD1で光子検出を行う。このとき、光子検出器APD0およびAPD1は光子のやってくるタイミングのみバイアス電圧を高く設定して光子を受信する必要がある。すなわち、光子のタイ

10

20

30

40

50

ミングに一致したクロックで光子検出器 A P D を駆動しなければならない。しかしながら、クロックの全位相 2^n のうち、どのタイミングに光子があるのかはこの時点ではわからない。

【 0 1 0 2 】

そこで、タイミング制御部 2 4 0 は受信器 2 0 の光子検出器 A P D 0 および A P D 1 に印加されるバイアスのタイミングシフトをリセットする (ステップ S 5 0 4)。これによって同期ブロック 2 1 0 はクロック信号 C L K 2 のシフト量を初期値 0 にリセットする。

【 0 1 0 3 】

次に、タイミング制御部 2 4 0 は、光子検出器 A P D 0 および A P D 1 へのバイアス印加タイミングを $2^n / n$ だけシフトさせ (ステップ S 5 0 5)、このバイアス印加時に光子検出器 A P D 0 あるいは A P D 1 により検出された光子をそれぞれ光子カウンタ 2 6 0 によりカウントし、現時点で指定された乱数および基底、送信器 1 0 の設定タイミングシフトシフト量 τ_i ($i = 1 \sim N$) およびクロック信号 C L K 2 の現時点のシフト量 τ_j ($j = 1 \sim n$) に対応づけて、メモリ 2 7 0 に記録する (ステップ S 5 0 6)。

【 0 1 0 4 】

タイミング制御部 2 4 0 は、送信器 1 0 の位相変調器 1 0 2 への電圧の印加タイミングを固定したまま、光子検出器 A P D 0 および A P D 1 へのバイアス印加タイミングを $2^n / n$ ずつシフトさせながら、すべてのバイアス印加タイミングについて光子カウント数をメモリ 2 7 0 に記録するまで上記ステップ S 5 0 5 ~ S 5 0 6 を繰り返す (ステップ S 5 0 7)。

【 0 1 0 5 】

受信器 2 0 のタイミングシフトが終了したら (ステップ S 5 0 7 の Y E S)、タイミング制御部 2 4 0 は、送信器 1 0 の位相変調器 1 0 2 への電圧印加タイミングを $2^n / N$ シフトし (ステップ S 5 0 8、S 5 0 3)、再びステップ S 5 0 5 ~ S 5 0 6 を繰り返す。すべての電圧印加タイミングについて光子カウント数が測定されるまで上記ステップ S 5 0 3 ~ S 5 0 7 を繰り返し、選択された基底および乱数値に対する光子検出および光子カウントを行う (ステップ S 5 0 8)。

【 0 1 0 6 】

タイミング制御部 2 4 0 は、以上のステップ S 5 0 1 ~ S 5 0 8 を、4 通りの基底および乱数の組み合わせすべてについて実行する (ステップ S 5 0 9)。4 通りの基底および乱数の組み合わせでの測定が終了すると (ステップ S 5 0 9 の Y E S)、タイミング制御部 2 4 0 はメモリ 2 7 0 に記録された光子検出器 A P D 0 および A P D 1 の光子カウント数に基づいて送信器 1 0 の最適タイミングを決定し、受信器 2 0 の通信制御部 1 3 0 に通知し同期ブロック 1 1 0 に設定される (ステップ S 5 1 0)。

【 0 1 0 7 】

2 . 2) 送信器のクロックタイミング検索

図 1 2 (a) ~ (d) は 4 通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて送信器のタイミング制御シーケンスを示すハンドシェイク図である。

【 0 1 0 8 】

a) 基底 + , 乱数 0 (0 変調)

まず、受信器 2 0 のタイミング制御部 2 4 0 は位相変調器 2 0 6 の受信基底を “ + ” にセットし、さらに送信器 1 0 の通信制御部 1 3 0 に対して位相変調器 1 0 2 を基底 “ + ”、乱数 “ 0 ” に対応する変調の深さに設定するよう指示する。この結果、上述した表 1 に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器 1 0 2 をとおりすぎる順で記述すると、“ 0 - - 0 - ” となる。

【 0 1 0 9 】

送信器 1 0 の位相変調器 1 0 2 は同期ブロック 1 1 0 から供給されるクロック C L K によって駆動されるので、位相変調器 1 0 2 による光パルスの位相変調タイミングはクロック C L K を供給するタイミングによる。受信器 2 0 からの指示により、同期ブロック 1 1 0 はクロック C L K のタイミングを 0 から 2^n まで任意のステップでシフトさせることが

10

20

30

40

50

できる。

【0110】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の同期ブロック110のクロックCLKのシフト量をクリアして0にするように指示し、クロックシフト量を2/Nずつシフトさせながら2に達するまで、次のステップS1～S5をN回繰り返す。

【0111】

(S1)受信器20のタイミング制御部240は、送信器10の通信制御部130に対して同期ブロック110のクロックCLKを1ステップシフトするよう指示し、受信器20の通信制御部230に対して同期ブロック210のクロックCLK2のシフト量をクリアして0にするよう指示する。

10

【0112】

(S2)送信器10の通信制御部130は同期ブロック110のクロックCLKを1ステップシフトし、これによって送信器10の位相変調器102を駆動するタイミングが1ステップずれる。

【0113】

(S3)送信器10での1ステップシフトにより、受信器20の光子検出器APD0およびAPD1で観測される光パワーがそれぞれ変化する。

【0114】

(S4)受信器20の通信制御部230は同期ブロック210のクロックCLK2を1ステップシフトさせる。1回のクロックシフト量は2/nとする。

20

【0115】

(S5)光子検出器APD0あるいはAPD1により光子が検出されると、光子カウンタ260によりカウントされカウント値がメモリ270に格納される。そして、ステップS4のクロックCLK2のシフト量が2になるまでステップS4～S5がn回繰り返される。

【0116】

従って、送信器10のクロックCLKのシフト量が1ステップ(2/N)シフトするごとに、受信器20のクロックCLK2が1ステップずつ0から2まで順次シフトし、クロックCLK2が1ステップシフトするごとに光子カウンタ260のカウント値がそのときの位相シフト量 ϕ_j と対応づけてメモリ270に格納される。

30

【0117】

b)基底+, 乱数1(変調)

受信器20のタイミング制御部240は、受信器20の基底を“+”にしたまま、送信器10の通信制御部130に対して位相変調器102を基底“+”、乱数“1”に対応する変調の深さに設定するように指示する。この結果、上述した表1に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器102を通りすぎる順で記述すると、“0 - - - 0”となる。

【0118】

続いて、タイミング制御部240は送信器10の同期ブロック110のクロックCLKのシフト量をクリアして0にするように指示し、送信器10のクロックシフト量を2/Nずつシフトさせながら2に達するまで、上記ステップS1～S5をN回繰り返す。従って、送信器10のクロックCLKのシフト量が1ステップ(2/N)シフトするごとに、受信器20のクロックCLK2が1ステップずつ0から2まで順次シフトし、クロックCLK2が1ステップシフトするごとに光子カウンタ260のカウント値がそのときの位相シフト量 ϕ_j と対応づけてメモリ270に格納される。

40

【0119】

c)基底x, 乱数0(1/2変調)

受信器20のタイミング制御部240は位相変調器206の受信基底を“x”にセットし、さらに送信器10の通信制御部130に対して位相変調器102を基底“x”、乱数“0”に対応する変調の深さに設定するよう指示する。この結果、上述した表1に示すよ

50

うに、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器 102 を通りすぎる順で記述すると、" 0 - - / 2 - 3 / 2 " となる。

【 0 1 2 0 】

続いて、タイミング制御部 240 は送信器 10 の同期ブロック 110 のクロック CLK のシフト量をクリアして 0 にするように指示し、送信器 10 のクロックシフト量を $2 / N$ ずつシフトさせながら $2 / N$ に達するまで、上記ステップ S1 ~ S5 を N 回繰り返す。従って、送信器 10 のクロック CLK のシフト量が 1 ステップ ($2 / N$) シフトするごとに、受信器 20 のクロック CLK2 が 1 ステップずつ 0 から $2 / N$ まで順次シフトし、クロック CLK2 が 1 ステップシフトするごとに光子カウンタ 260 のカウント値がそのときの位相シフト量 ϕ_j と対応づけてメモリ 270 に格納される。

10

【 0 1 2 1 】

d) 基底 x , 乱数 1 ($3 / 2$ 変調)

受信器 20 のタイミング制御部 240 は、受信器 20 の基底を " x " にしたまま、送信器 10 の通信制御部 130 に対して位相変調器 102 を基底 " x "、乱数 " 1 " に対応する変調深さに設定するよう指示する。この結果、上述した表 1 に示すように、カルテットパルスの各光パルスに与える位相変調の位相は、位相変調器 102 を通りすぎる順で記述すると、" 0 - - 3 / 2 - / 2 " となる。

【 0 1 2 2 】

続いて、タイミング制御部 240 は送信器 10 の同期ブロック 110 のクロック CLK のシフト量をクリアして 0 にするように指示し、送信器 10 のクロックシフト量を $2 / N$ ずつシフトさせながら $2 / N$ に達するまで、上記ステップ S1 ~ S5 を N 回繰り返す。従って、送信器 10 のクロック CLK のシフト量が 1 ステップ ($2 / N$) シフトするごとに、受信器 20 のクロック CLK2 が 1 ステップずつ 0 から $2 / N$ まで順次シフトし、クロック CLK2 が 1 ステップシフトするごとに光子カウンタ 260 のカウント値がそのときの位相シフト量 ϕ_j と対応づけてメモリ 270 に格納される。

20

【 0 1 2 3 】

2.3) 送信器の最適タイミング決定

まず、光子検出器 APD0 および APD1 の光パワー比、すなわち干渉消光比を求める。そのために、送信器 10 のタイミングシフト量 ϕ_j のときの光子検出器 APD0 および APD1 に出力する光パワーを求めなければならない。送信器 10 のタイミングシフト量 ϕ_j のとき、受信器 20 のバイアス印加タイミングは $2 / n$ ずつ n 回シフトする。j 回目のシフトを行ったときの光子検出器 APD0 および APD1 の光子カウント数をそれぞれ $c_0(i, j)$ 、 $c_1(i, j)$ とすると、送信器のタイミングシフト量 ϕ_j のとき APD0 および APD1 で観測された光パワー $P_0(i)$ 、 $P_1(i)$ はそれぞれ

30

【 0 1 2 4 】

【数 2】

$$P_0(i) = \sum_{j=1}^n c_0(i, j) \quad \dots \quad (1)$$

$$P_1(i) = \sum_{j=1}^n c_1(i, j) \quad \dots \quad (2)$$

40

となる。

【 0 1 2 5 】

このようにして求めた送信器 10 のタイミングシフト量 ϕ_j に対する光パワーの変化は図 9 (a) と同様になる。図 9 の横軸は送信器のクロックシフト量 ϕ_j 、縦軸は APD0 の光パワー (実線) および APD1 の光パワー (破線) を示す。これより、上述したように光子検出器 APD0 および APD1 の光パワー比、すなわち干渉消光比が求まる (点線)。

【 0 1 2 6 】

50

乱数“0”を送信した場合は干渉消光比を P_0/P_1 で表し、乱数“1”を送信した場合は干渉消光比を P_1/P_0 で表す。光子検出器APD0およびAPD1に出力された光パワーとそのときの送信器10のクロックシフト量 τ_i とは、すべて受信器20のメモリ270に記憶されている。このデータから送信器10のクロックCLKの最適タイミングを決定する。決定の仕方は、図10で説明したとおりである。

【0127】

2.4) 効果

上述したように、本発明の第2実施例によれば、送信器10のクロックCLKのシフト量が1ステップ($2/N$)シフトするごとに受信器20のクロックCLK2が1ステップずつ0から2まで順次シフトするので、第1実施例と同様に光パワーを測定することができる。

10

【0128】

更に、本実施例によれば、クロックCLK2が1ステップシフトするごとに光子カウンタ260のカウンタ値がそのときの位相シフト量 τ_i と対応づけてメモリ270に格納される。したがって、クロックCLK2が0から2までシフトする間に光子カウンタがどのように変化するかを記録することができる。たとえば、図3に示す光子カウンタの変化の様子を知ることができる。

【0129】

3. 第3実施例

上述したように、第2実施例におけるメモリ270には、クロックCLK2が1ステップシフトするごとに光子カウンタ260のカウンタ値と、そのときの位相シフト量とが対応づけられて格納されている。本発明の第3実施例によれば、このメモリ270の格納データを利用することで、干渉消光比の測定だけでなく、送信器および受信器におけるそれぞれの最適タイミングを決定することができる。以下、第3実施例について詳細に説明する。

20

【0130】

図13は本発明の第3実施例による量子暗号システムの送信器のタイミング制御手順を示すフローチャートである。本実施例による量子暗号システムのブロック構成は、第1実施例と同様に図4に示されるとおりであり、送受信される光パルスも第1実施例と同様に図5、図6に基づいて説明したような振る舞いをする。

30

【0131】

また、本実施例における送信器タイミング検索動作は、図11で説明したステップS501~S509と同様であるから、同一の参照符号を付して説明は省略し、送信器の最適タイミング決定(ステップS510)および受信器の最適タイミング決定(ステップS511)について説明する。なお、送信器10のタイミング制御はすべて受信器20のタイミング制御部240の指示により行われる。

【0132】

3.1) 送信器の最適タイミング決定

図14(a)~(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて受信器で測定される有効光子カウントと干渉消光比の変化を示すグラフである。横軸は送信器10のタイミングシフト量 τ_i ($i=1\sim N$)であり、縦軸は光子検出器APD0およびAPD1の光パワー(光子カウント数)である。ここでは、光子検出器APD0の光パワーを実線で、光子検出器APD1の光パワーを破線でそれぞれ示す。

40

【0133】

上述したように、送信器10のタイミングシフト量 i のとき、受信器20のバイアス印加タイミングは $2/n$ ずつ n 回シフトする(ステップS505~S507)。 j 回目のシフトを行ったときの光子検出器APD0およびAPD1の光子カウント数をそれぞれ $c_0(i, j)$ 、 $c_1(i, j)$ とすると、送信器10のタイミングシフト量 i のときAPD0およびAPD1で観測された光パワー $P_0(i)$ 、 $P_1(i)$ はそれぞれ上記式(1)および(2)で表すことができる。

50

【 0 1 3 4 】

このようにして求めた送信器 1 0 のタイミングシフト量 τ_j に対する光パワーの変化は、図 1 4 (a) に示すようになる (図 9 (a) と同様) 。これより、上述したように光子検出器 A P D 0 および A P D 1 の光パワー比、すなわち干渉消光比が求まる (点線) 。図 1 4 (b) ~ (d) も図 9 (b) ~ (d) で説明したとおりである。

【 0 1 3 5 】

また、光子検出器 A P D 0 および A P D 1 に出力された光パワーとそのときの送信器 1 0 のクロックシフト量 τ_j とは、すべて受信器 2 0 のメモリ 2 7 0 に記憶されている。この位相シフト量とそのときの光パワー (光子カウント数) のデータ (図 1 6 (A) 参照) から送信器 1 0 のクロック C L K の最適タイミングを決定することができ、決定の仕方は、図 1 0 で説明したとおりである。

10

【 0 1 3 6 】

3 . 2) 受信器の最適タイミング決定

上述したように送信器 1 0 のクロック C L K の最適タイミング τ_{suit} が決定されると (ステップ S 5 1 0) 、続いてメモリ 2 7 0 に格納された測定データを用いて受信器 2 0 の最適タイミングを決定する (ステップ S 5 1 1) 。

【 0 1 3 7 】

図 1 5 (a) ~ (d) は 4 通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて受信器で検出される光子カウントの変化を示すグラフである。基底 + と乱数 0 の組み合わせにおいて、メモリ 2 7 0 に格納された受信器 2 0 のタイミングシフト量 τ_j ($j = 1 \sim n$) に対する観測値の変化を図 1 5 (a) に示す。図 1 5 の横軸は受信器 2 0 のタイミングシフト量 τ_j 、縦軸は A P D 0 の光子検出結果 (実線) および A P D 1 の光子検出結果 (破線) を示す。

20

【 0 1 3 8 】

図 1 5 (a) に示すように、クロック位相が正しいときには、送信器 1 0 から送った乱数の値 0 によって A P D 0 で光子が検出され、クロック位相がずれると光子は検出されていない。以下同様に、基底 + と乱数 1、基底 x と乱数 0、基底 x と乱数 1 の場合におけるタイミングシフト量 τ_j に対する観測値の変化を図 1 5 (b) ~ (d) に示す。

【 0 1 3 9 】

図 1 5 (a) ~ (d) には、A P D 0 および A P D 1 の光子カウント比、すなわち光子検出比が点線で示されている。送信器 1 0 のクロック C L K のタイミング $\tau = \tau_{suit}$ である場合、乱数 “ 0 ” を送信した場合は A P D 0 に光が出力されるべきなので、A P D 1 の観測値に対する A P D 0 の観測値の比 $c_0(i_{suit}, j) / c_1(i_{suit}, j)$ を光子検出として表す。また、乱数 “ 1 ” を送信した場合は A P D 1 に光が出力されるべきなので、A P D 0 の観測値に対する A P D 1 の観測値の比 $c_1(i_{suit}, j) / c_0(i_{suit}, j)$ を光子検出として表す。

30

【 0 1 4 0 】

図 1 6 (A) はメモリ 2 7 0 に格納されている光子検出器 A P D 0 および A P D 1 の光子カウント比と送信側のクロックシフト量とのデータテーブルを模式的に示す図であり、(B) はメモリ 2 7 0 に格納されている光子検出器 A P D 0 および A P D 1 の光子カウント比と受信側のクロックシフト量 τ_j とのデータテーブルを模式的に示す図である。図 1 6 (B) に示すように、A P D 0 および A P D 1 の出力パワーとそのときの受信器 2 0 のクロックシフト量 τ_j はすべてメモリ 2 7 0 に記憶されているから、このデータから受信器 2 0 のクロックの最適タイミングを決定することができる。決定手法は図 1 0 で説明した送信器 1 0 の場合と同様であるから説明は省略する。

40

【 産業上の利用可能性 】

【 0 1 4 1 】

本発明は微弱光通信の光パワー測定を行う光パワー測定器一般に適用可能である。また、上述した P l u g & P l a y 方式の双方向方式だけでなく、一方向の量子暗号方式にも適用可能であり、量子暗号鍵配布に限定されるものではなく量子暗号通信におけるすべて

50

の方式で適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0142】

【図1】本発明の一実施形態による微弱光パワー測定装置の技略的構成を示すブロック図である。

【図2】本実施形態による微弱光パワーの測定方法におけるバイアス印加タイミングの位相シフトの状態を説明するための波形図である。

【図3】位相シフト量に対する光子カウントと変化を模式的に示すグラフである。

【図4】本発明の第1実施例による温度無依存型 Plug & Play システムの構成を示すブロック図である。

【図5】送信器のPBSループの動作を説明するための模式的構成図である。

【図6】PBSループを伝播する光パルスの時間順序を示す説明図である。

【図7】本発明の第1実施例によるシステムにおける受信器20での干渉消光比の測定手順を含む送信器10のタイミング検索を示すフローチャートである。

【図8】(a)～(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて送信器のタイミング制御シーケンスを示すハンドシェイク図である。

【図9】(a)～(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて受信器で測定される有効光子カウントと干渉消光比の変化を示すグラフである。

【図10】メモリ270に格納されている光子検出器APD0およびAPD1の有効光子カウントとクロックシフト量とのデータテーブルを模式的に示す図である。

【図11】本発明の第2実施例による量子暗号システムの送信器のタイミング制御手順を示すフローチャートである。

【図12】(a)～(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて送信器のタイミング制御シーケンスを示すハンドシェイク図である。

【図13】本発明の第3実施例による量子暗号システムの送信器のタイミング制御手順を示すフローチャートである。

【図14】(a)～(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて受信器で測定される有効光子カウントと干渉消光比の変化を示すグラフである。

【図15】(a)～(d)は4通りの基底および乱数の組み合わせのそれぞれについて受信器で検出される光子カウントの変化を示すグラフである。

【図16】(A)はメモリ270に格納されている光子検出器APD0およびAPD1の光子カウント比と送信側のクロックシフト量とのデータテーブルを模式的に示す図であり、(B)はメモリ270に格納されている光子検出器APD0およびAPD1の光子カウント比と受信側のクロックシフト量とのデータテーブルを模式的に示す図である。

【図17】Plug & Play方式の概略的構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

【0143】

- 1 光子検出器
- 2 バイアス印加回路
- 3 タイミング制御回路
- 4 光パワー測定部
- 5 光子カウンタ
- 6 メモリ
- 7 パワー測定プログラム
- 10 送信器
- 100 量子ブロック
- 101 ファラデーミラー
- 102 位相変調器
- 103 PBS
- 104 PBSループ

10

20

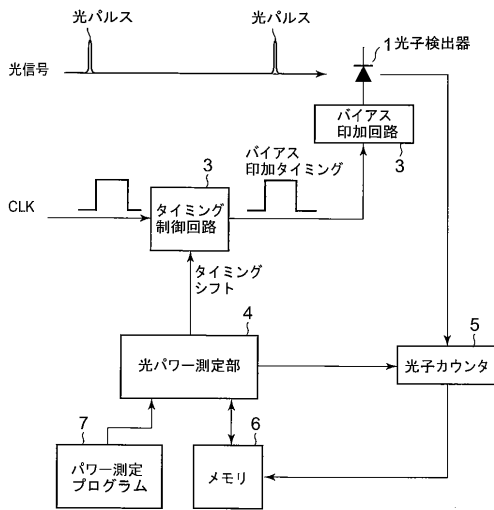
30

40

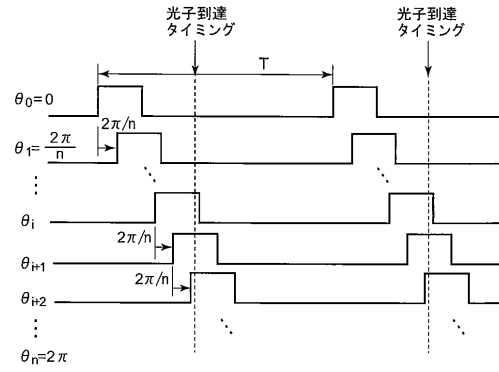
50

105	可変光減衰器	
106	レーザ	
110	同期ブロック	
120	データ通信部	
130	通信制御部	
20	受信器	
200	量子ブロック	
201	レーザ	
202	光サーキュレータ	
203	光カブラ	10
204	Short Path	
205	Long Path	
206	位相変調器	
207	PBS	
208 , 209	光子検出器 (A P D)	
210	同期ブロック	
220	データ通信部	
230	通信制御部	
240	タイミング制御部	
250	光パワー測定部	20
260	光子カウンタ	
270	メモリ	
280	プログラムメモリ	
30	光伝送路	
40 , 50	波長多重フィルタ	

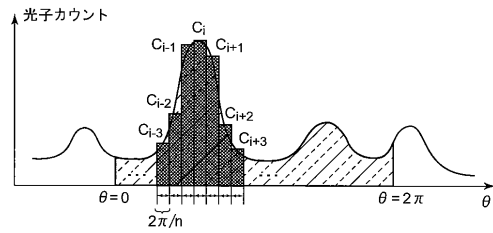
【図1】



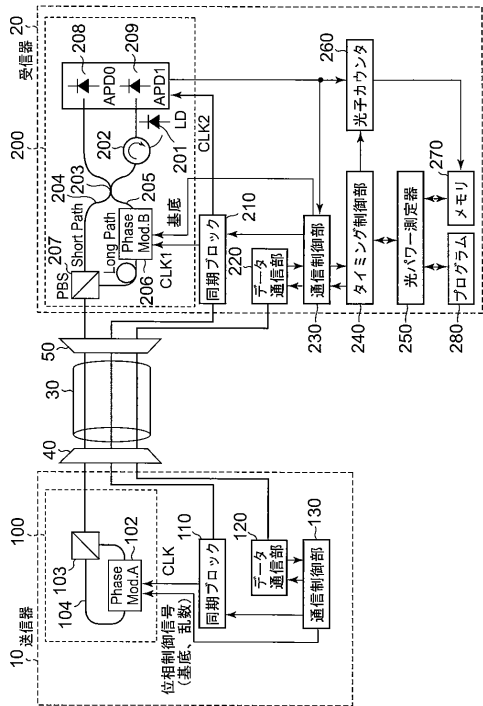
【図2】



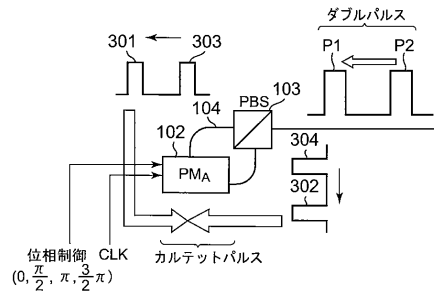
【図3】



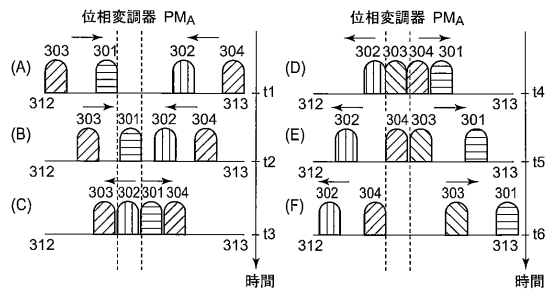
【図4】



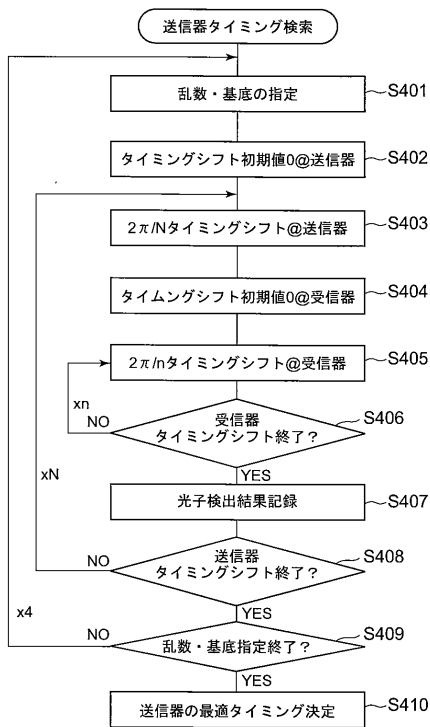
【図5】



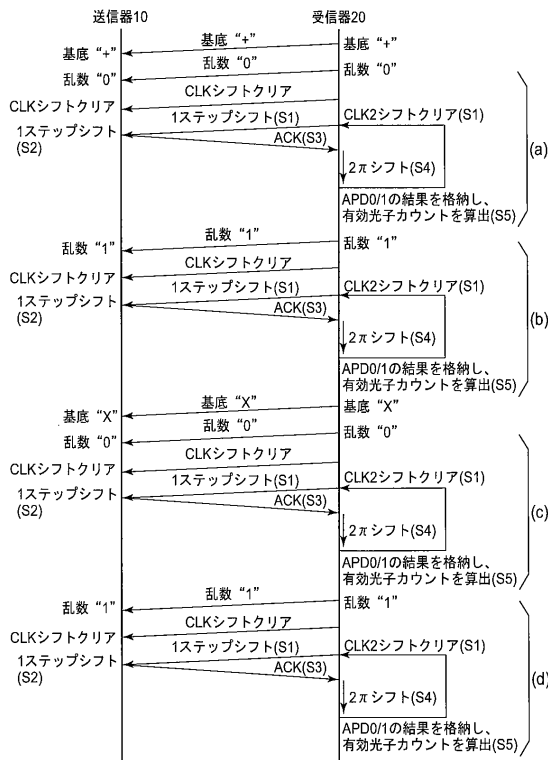
【図6】



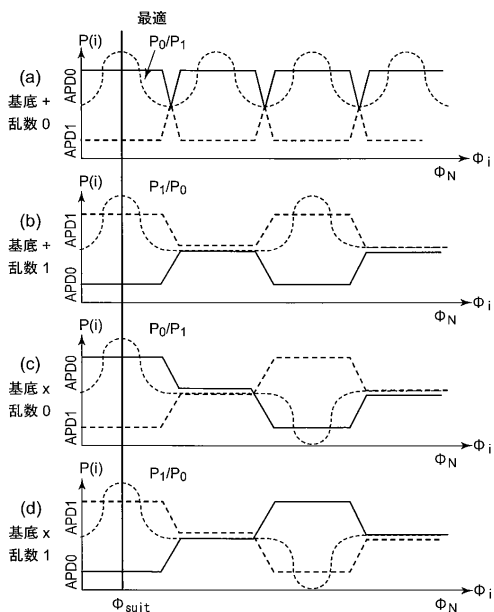
【図7】



【図8】



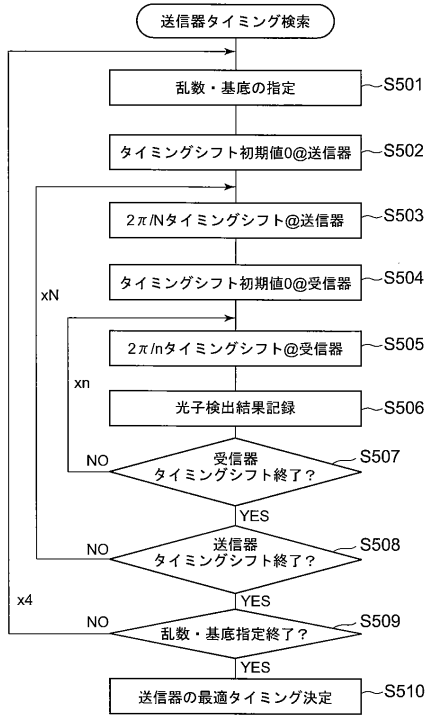
【図9】



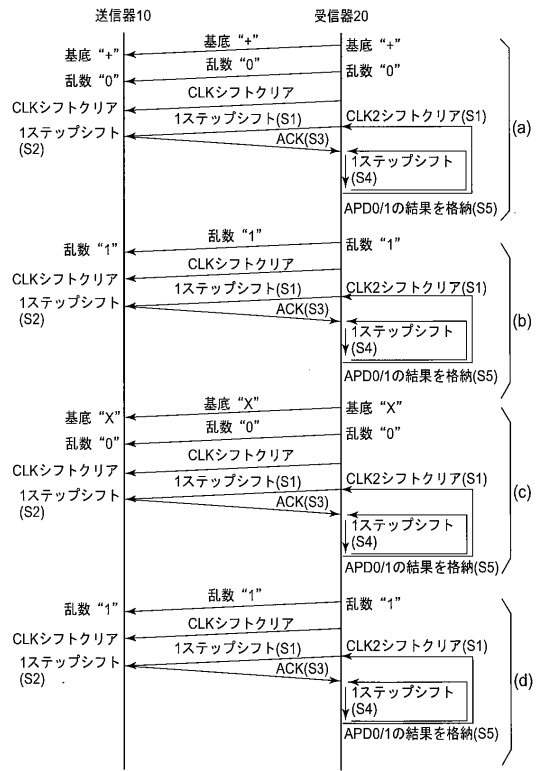
【図10】

N	A _N	B _N	C _N	D _N	E _N
...
i	A _i	B _i	C _i	D _i	E _i
...
3	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃	E ₃
2	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁
クロックシフト					
APDパワー比					
P ₀ /P ₁ (基底+,乱数0)					
P ₁ /P ₀ (基底+,乱数1)					
P ₀ /P ₁ (基底x,乱数0)					
P ₁ /P ₀ (基底x,乱数1)					
E _i =A _i *B _i *C _i *D _i (i=1~N)					

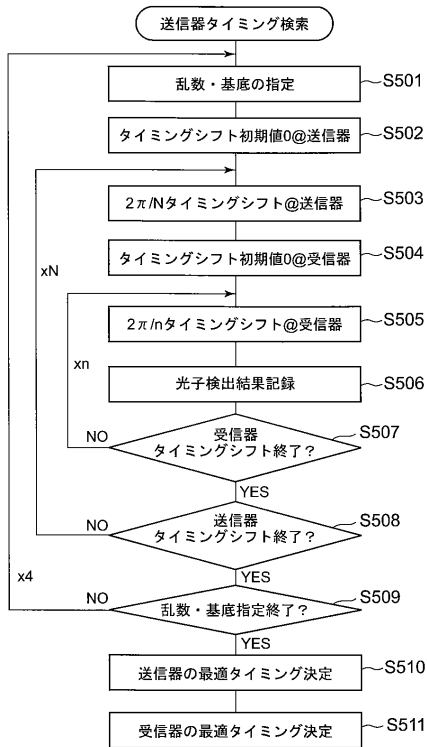
【図11】



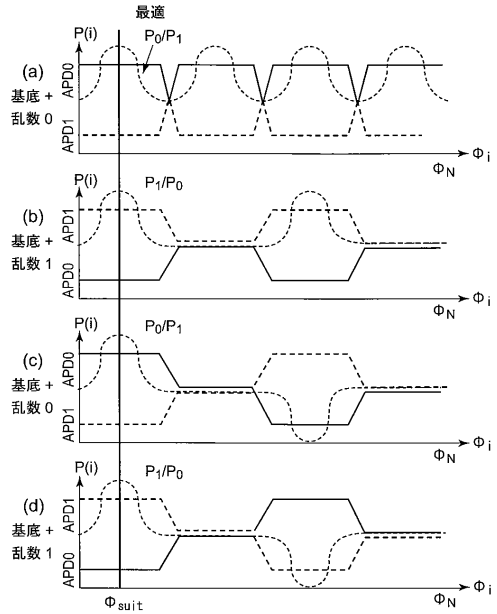
【図12】



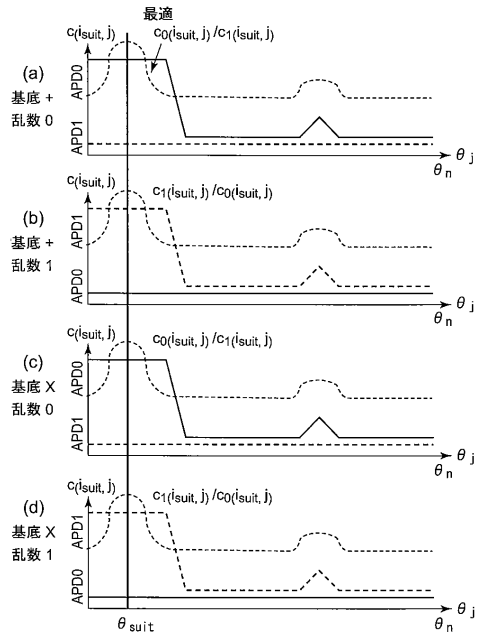
【図13】



【図14】



【図 15】



【図 16】

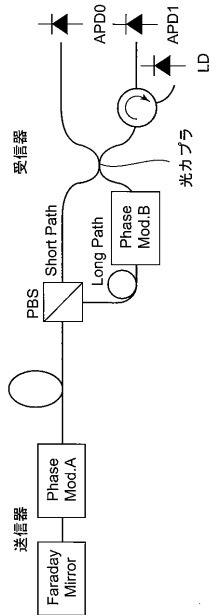
クロックシフト	1	2	3	...	n
APDパワー比	A1	A2	A3	...	A _n
P0/P1 (基底+乱数0)	B1	B2	B3	...	B _n
P1/P0 (基底+乱数1)	C1	C2	C3	...	C _n
P0/P1 (基底×乱数0)	D1	D2	D3	...	D _n
P1/P0 (基底×乱数1)	E1	E2	E3	...	E _n
Ej=Ai * Bj * Ci * Dk (i=1~N)					

クロックシフト	1	2	3	...	n
APDパワー比	A1	A2	A3	...	A _n
C0(θsuit, j)/C1(θsuit, j) (基底+乱数0)	B1	B2	B3	...	B _n
C1(θsuit, j)/C0(θsuit, j) (基底+乱数1)	C1	C2	C3	...	C _n
C0(θsuit, j)/C1(θsuit, j) (基底×乱数0)	D1	D2	D3	...	D _n
C1(θsuit, j)/C0(θsuit, j) (基底×乱数1)	E1	E2	E3	...	E _n
Ej=Ai * Bj * Ck * Dl (j=1~n)					

(A)

(B)

【図 17】



フロントページの続き

(72)発明者 高橋 成五
東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

審査官 角田 慎治

(56)参考文献 特開2006-284202(JP,A)
特開2005-117512(JP,A)
特開2005-260911(JP,A)
特表平09-502322(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H04B 10/00 - 10/28
H04J 14/00 - 14/08