

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年10月8日(08.10.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/202964 A1

(51) 国際特許分類:
H04K 1/02 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2020/008530

(22) 国際出願日: 2020年2月28日(28.02.2020)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2019-071981 2019年4月4日(04.04.2019) JP

(71) 出願人: 学校法人玉川学園 (TAMAGAWA UNIVERSITY AND TAMAGAWA ACADEMY) [JP/JP]; 〒1948610 東京都町田市玉川学園六丁目1番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 谷澤 健 (TANIZAWA Ken); 〒1948610 東京都町田市玉川学園六丁目1番1号 学校法人玉川学園内 Tokyo (JP). 二見 史生 (FUTAMI

Fumio); 〒1948610 東京都町田市玉川学園六丁目1番1号 学校法人玉川学園内 Tokyo (JP).

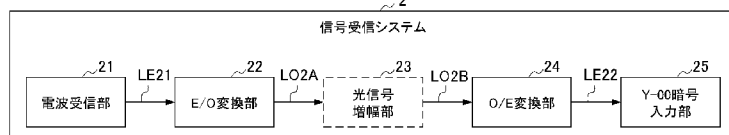
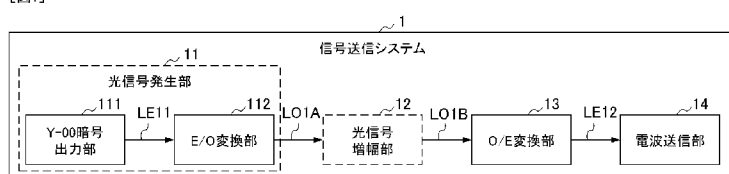
(74) 代理人: 岩池 満, 外 (IWAIKE Mitsuru et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内1-7-12 サピアタワー Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) Title: SIGNAL PROCESSING SYSTEM

(54) 発明の名称: 信号処理システム

[図1]



1... SIGNAL TRANSMISSION SYSTEM
2... SIGNAL RECEPTION SYSTEM
11... OPTICAL SIGNAL GENERATION UNIT
111... Y-00 CIPHER OUTPUT UNIT
112, 22... E/O CONVERSION UNIT
12, 23... OPTICAL SIGNAL AMPLIFICATION UNIT
13, 24... O/E CONVERSION UNIT
14... RADIO WAVE TRANSMISSION UNIT
21... RADIO WAVE RECEPTION UNIT
25... Y-00 CIPHER INPUT UNIT

(57) Abstract: The present invention addresses the problem of providing a signal process in which a countermeasure against eavesdropping over a physical layer in a wireless communication is performed. An optical signal generation unit 11 generates, as an optical signal, multivalued information that is in a multivalued state and is based on prescribed data. An E/O conversion unit 112 converts the optical signal to an electrical signal. An optical signal amplification unit 12 amplifies the optical signal. An O/E conversion unit 13 converts the optical signal to an electrical signal. A radio wave transmission unit 14 transmits, as a radio wave, the multivalued information converted into the electrical signal. The problem is solved thereby.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: 無線通信における物理層での盗聴の対策を行う信号処理を提供することを課題とする。光信号発生部 1 1 は、所定データに基づく多値の状態をとる多値情報を、光信号として発生させる。E/O変換部 1 1 2 は、前記光信号を、電気信号に変換する。光信号増幅部 1 2 は、前記光信号を、増幅する。O/E変換部 1 3 は、前記光信号を、電気信号に変換する。電波送信部 1 4 は、前記電気信号に変換された前記多値情報を、電波として送信する。これにより、上記課題を解決する。

明 細 書

発明の名称： 信号処理システム

技術分野

[0001] 本発明は、信号処理システムに関する。

背景技術

[0002] 近年、情報通信においてセキュリティ対策の重要性が高まっている。インターネットを構成するネットワークシステムは、国際標準化機構に依り策定されたOSI参照モデルで記述される。OSI参照モデルでは、レイヤ1の物理層からレイヤ7のアプリケーション層までに分離され、夫々のレイヤを結ぶインターフェースが標準化、又は、デファクトにより規格化されている。このうち最下層となるのが、有線・無線で実際に信号の送受信を行う役割を担う物理層である。

現状、セキュリティ（多くの場合数理暗号に依る）は、レイヤ2以上で実装されており、物理層ではセキュリティ対策が施されていない。しかしながら、物理層でも盗聴の危険性がある。

例えば、有線通信の代表である光ファイバ通信では、光ファイバに分岐を導入し、信号パワーの一部を取り出すことで大量の情報を一度に盗み出すことが原理的に可能である。そこで、本出願人は、物理層における暗号化技術として、例えば特許文献1に挙げる所定のプロトコルの開発を行っている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2012-085028号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、上述の特許文献1を含む従来技術では、多値の情報を光信号として送信することにより、光ファイバを用いた物理層での盗聴の対策を行うことはできるが、無線通信における物理層での盗聴の対策を行うことは

できなかった。

[0005] 本発明は、無線通信における物理層での盗聴の対策を行うことを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 上記目的を達成するため、本発明の一態様の信号処理システムは、
所定データに基づく多値の状態をとる多値情報を、光信号として発生させる光発生手段と、
前記光信号を、電気信号に変換する光電気変換手段と、
前記電気信号に変換された前記多値情報を、電波として送信する電波送信手段と、
を備える。

発明の効果

[0007] 本発明によれば、無線通信における物理層での盗聴の対策を行うことができる。

図面の簡単な説明

[0008] [図1]本発明の信号処理システムの一実施形態に係る信号送信システムを含む信号送受信システムの構成の一例を示すブロック図である。

[図2]図1の信号送信システムに適用されたY-QO光通信量子暗号の原理の概要を説明する図である。

[図3]図2の位相変調における $N=4096$ のシンボル点の配置のうち、隣接する3つのシンボル点の配置が視認できるように、図2を拡大した図である。

[図4]図1の信号送信システムのうち、ベースバンド・ヘテロダイン方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

[図5]図1の信号送信システムのうち、中間周波数・ヘテロダイン方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

[図6]図1の信号送信システムのうち、アナログ・直接変調方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

[図7]図1の信号送信システムのうち、アナログ・中間周波数方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

[図8]図1の信号送信システムのうち、アナログ・ベースバンド方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

発明を実施するための形態

[0009] 以下、本発明の実施形態について説明する。

図1は、本発明の信号処理システムの一実施形態に係る信号送受信システムの構成の一例を示すブロック図である。

図1の例の信号送受信システムは、信号送信システム1と、信号受信システム2とを含むように構成されている。

信号送信システム1は、送信対象の信号を、Y-O-O光通信量子暗号のプロトコルに基づき暗号化して、電波RWの形態で送信する。また、信号受信システム2は、この電波RWを受信して、Y-O-O光通信量子暗号のプロトコルに基づき復号して、上述の形態の信号を受信する。

なお、詳細は後述するが、Y-O-O光通信量子暗号とは、Y-O-O光通信量子暗号のプロトコルに基づいて、送信対象である所定データを多値の情報とした後、光信号として送信することにより、受信した信号は暗号化された暗号信号となるという原理に基づいた暗号方式である。

[0010] まず、Y-O-O光通信量子暗号のプロトコルに基づき暗号化した電波RWを送信する信号送信システム1の構成について説明する。

信号送信システム1は、光信号発生部11と、光信号増幅部12と、O/E変換部13と、電波送信部14とを含むように構成されている。

[0011] 光信号発生部11は、所定データに基づく多値の状態をとる多値情報を、光信号として発生させる。この光信号は、その詳細については後述するが、送信対象の信号である。

光信号発生部11は、Y-O-O暗号出力部111と、E/O変換部112とを備える。

[0012] Y-O-O暗号出力部111は、所定データに基づく多値の状態をとる多値

情報の電気信号（後述の第2乃至第4電気信号と明確に区別すべく、以下、「第1電気信号」と呼ぶ）を発生する。

即ち、Y-O暗号出力部111は、送信対象である所定データを生成し又は図示せぬ生成元から取得する。Y-O暗号出力部111は、この所定データを用いて、Y-O光通信量子暗号のプロトコルに基づき生成した多値の情報を、多値情報として第1電気信号の形態で信号路LE11を介して出力する。

なお、信号路LE11における第1電気信号は、アナログ信号、及びデジタル信号の何れでも良いが、本実施形態の説明においては、アナログ信号であるものとして説明する。なお、第1電気信号がデジタル信号である場合、信号路LE11は、複数のビットを送信できる構成（例えば、パラレルに信号を送信する複数の信号路や、シリアルに信号を送信するデータ処理部からなる構成）を適宜備える。

[0013] E/O変換部112は、Y-O暗号出力部111から出力された多値情報の第1電気信号を、光信号に変換する。

即ち、E/O変換部112は、LE11を介して入力した、多値情報の第1電気信号を、任意の変調方式により変調された光信号に変換して信号路LO1Aを介して出力する。

[0014] なお、信号路LO1Aは、光通信ケーブルによる光信号路で構成されてよい。

このように信号路LO1Aとして光通信ケーブルを用いることにより、信号送信システム1において、E/O変換部112と、後述するO/E変換部13とは、距離を離して設置することができる。

[0015] 光信号増幅部12は、E/O変換部112から発生された光信号を増幅する。

即ち、光信号増幅部12は、E/O変換部から発生されて信号路LO1Aにより伝送されてきた光信号を増幅して出力する。光信号増幅部12から出力された光信号（増幅された光信号）は、信号路LO1Bを介してO/E変

換部 1 3 に伝送される。

[0016] なお、信号路 L O 1 B は、信号路 L O 1 A と同様に、光通信ケーブルによる光信号路で構成されてよい。つまり、光信号増幅部 1 2 は、信号路 L O 1 A を通ることによって減衰した光信号を増幅することが可能な、光信号路における中継器として用いることができる。このような中継器たる光信号増幅部 1 2 を採用することで、E / O 変換部 1 1 2 と、後述する O / E 変換部 1 3 との間の光信号路の距離を延長させることができる。換言すると、E / O 変換部 1 1 2 と、後述する O / E 変換部 1 3 とは、更に距離を離して設置することができる。

[0017] O / E 変換部 1 3 は、光信号増幅部 1 2 で増幅されて信号路 L O B により伝送されてきた光信号を、電気信号（上述の第 1 電気信号や後述の第 3 及び第 4 電気信号と明確に区別すべく、以下、「第 2 電気信号」と呼ぶ）に変換する。

即ち、O / E 変換部 1 3 は、Y - O O 光通信量子暗号のプロトコルに基づき生成された多値情報に対応した光信号であって、信号路 L O 1 により伝送されてきた光信号を、第 2 電気信号に変換して出力する。

O / E 変換部 1 3 から出力された第 2 電気信号は、信号路 L E 1 2 を介して電波送信部 1 4 に伝送される。

第 2 電気信号は、O / E 変換部 1 3 により光信号から変換された結果、ショット雑音を含んだ電気信号となる。即ち、後述する Y - O O 光通信量子暗号の原理により、暗号化された信号（以下、「暗号信号」と呼ぶ）となる。暗号信号は、Y - O O 光通信量子暗号のプロトコルにおける復号を経ない限り、データを正しく再構築できない。即ち、第 2 電気信号は、第三者により傍受されたとしても、第三者は解読困難である。

なお、本明細書において、暗号信号の用語は、電気信号や光信号、電波等の形態によらず、暗号化された信号のことを指す。

[0018] なお、図 1 において、光信号増幅部 1 2 は破線で示されている。これは、信号送信システム 1 にとって、光信号増幅部 1 2 は必須な構成要素ではなく

、仮に光信号増幅部 1 2 を構成要素に含めた場合であってもその個数は 1 個に限定されず任意の個数でよいことを意味している。

即ち、E/O 変換部 1 1 2 と O/E 変換部 1 3 との間の光伝送路の距離が長くなった場合等には、当該光伝送路内の中継部たる光信号増幅部 1 2 は、複数個導入することができる。

これに対して、E/O 変換部 1 1 2 と O/E 変換部 1 3 との間の光伝送路の距離が短くなった場合等であって、E/O 変換部 1 1 2 から発生された光信号を増幅する必要がない場合、信号送信システム 1 は、光信号増幅部 1 2 を含まない構成とすることができる。

以降、特別に記述しない限り、信号送信システム 1 は、光信号増幅部 1 2 を含まず構成されており、E/O 変換部 1 1 2 と、O/E 変換部 1 3 とは、直接接続された信号路 L O 1 A 及び信号路 L O 1 B（以下、これらをまとめて「信号路 L O 1」と呼ぶ）を介して接続されているものとする。

[0019] 電波送信部 1 4 は、O/E 変換部 1 3 により第 2 電気信号に変換されて信号路 L E 1 2 により伝送されてきた暗号信号を、電波 R W の形態で送信する。

即ち、電波送信部 1 4 は、暗号信号である第 2 電気信号を、所定の増幅や周波数の変換等の制御を施したうえで、アンテナ等の部品を介して、電波 R W として送信する。

即ち、電波 R W の形態で送信された第 2 電気信号は、暗号信号である。

[0020] ここで、第三者が、電波 R W を傍受し、電気信号に変換した場合を考える。この場合、第三者により取得された電波 R W の電気信号は、Y-O-O 光通信量子暗号のプロトコルに基づき生成された多値の情報を光信号に変換し、更に、光信号を第 2 電気信号に変換した、暗号信号である。即ち、第三者により取得された電波 R W の電気信号を解読することは、困難である。

[0021] 以上、Y-O-O 光通信量子暗号のプロトコルに基づき暗号化した暗号信号を電波 R W の形態で送信する信号送信システム 1 の構成例について説明した。

次に、電波RWを受信してY-O-O光通信量子暗号のプロトコルに基づき復号する信号受信システム2の構成例について説明する。

[0022] 信号受信システム2は、電波受信部21と、E/O変換部22と、光信号増幅部23と、O/E変換部24と、Y-O-O暗号入力部25とを含むように構成されている。

[0023] 電波受信部21は、信号送信システム1により送信された電波RWを受信する。

即ち、電波受信部21は、電波RWの形態の暗号信号をアンテナ等で受信し、電気信号（上述の第1及び第2電気信号や後述の第4電気信号と明確に区別すべく、以下、「第3電気信号」と呼ぶ）の形態で出力する。電波受信部21から出力された第3電気信号は、信号路LE21を介して、E/O変換部22に伝送される。

[0024] E/O変換部22は、電波受信部21で受信された電波RWに対応する第3電気信号を、光信号に変換する。

即ち、E/O変換部22は、電波受信部21で受信されて信号路LE21により伝送された第3電気信号の形態の暗号信号を、光信号の形態に変換して出力する。E/O変換部22から出力された第3電気信号は、信号路LO2Aを介して光信号増幅部23に伝送される。

[0025] なお、信号路LO2Aは、光通信ケーブルによる光信号路で構成されてよい。

このように信号路LO2Aとして光通信ケーブルを用いることにより、信号受信システム2において、E/O変換部22と、後述するO/E変換部24とは、距離を離して設置することができる。

[0026] 光信号増幅部23は、E/O変換部22で変換された光信号を増幅する。

即ち、光信号増幅部23は、E/O変換部で変換されて信号路LO2Aにより伝送されてきた光信号を増幅して出力する。光信号増幅部23から出力された光信号（増幅された光信号）は、信号路LO2Bを介してO/E変換部24に伝送される。

[0027] なお、信号路L O 2 Bは、信号路L O 2 Aと同様に、光通信ケーブルによる光信号路で構成されてよい。

つまり、光信号増幅部23は、信号路L O 2 Aを通ることによって減衰した光信号を増幅することが可能な、光信号路における中継器として用いることができる。このような中継器たる光信号増幅部23を採用することで、E/O変換部22と、後述するO/E変換部24との間の光信号路の距離を延長させることができる。換言すると、E/O変換部22と、後述するO/E変換部24とは、更に距離を離して設置することができる。

[0028] なお、図1において、光信号増幅部23は破線で示されている。これは、信号受信システム2にとって、光信号増幅部23は必須な構成要素ではなく、仮に光信号増幅部23を構成要素に含めた場合であってもその個数は1個に限定されず任意の個数でよいことを意味している。

即ち、E/O変換部22とO/E変換部24との間の光伝送路の距離が長くなった場合等には、当該光伝送路内の中継部たる光信号増幅部23は、複数個導入することができる。

これに対して、E/O変換部22とO/E変換部24との間の光伝送路の距離が短くなった場合等であって、E/O変換部22から発生された光信号を増幅する必要がない場合、信号受信システム2は、光信号増幅部23を含まない構成とすることができる。

以降、特別に記述しない限り、信号受信システム2は、光信号増幅部23を含まず構成されており、E/O変換部22と、O/E変換部24とは、直接接続された信号路L O 2 A及び信号路L O 2 B（以下、これらをまとめて「信号路L O 2」と呼ぶ）を介して接続されているものとする。

[0029] O/E変換部24は、光信号増幅部12で増幅されて信号路L O 2により伝送されてきた光信号を、電気信号（上述の第1乃至第3電気信号と明確に区別すべく、以下、「第4電気信号」と呼ぶ）に変換する。

即ち、O/E変換部24は、電波RWの暗号信号に対応した光信号であって、信号路L O 2からなる光伝送路により伝送されてきた光信号を、第4電

気信号に変換して出力する。

O/E変換部24から出力された第4電気信号は、信号路LE22を介してY-OO暗号入力部25に伝送される。

[0030] Y-OO暗号入力部25は、O/E変換部24で変換された第4電気信号の形態の暗号信号を信号路LE22を介して入力され、Y-OO光通信量子暗号のプロトコルに基づき、復号することで、送信対象であった所定データに変換する。また、Y-OO暗号入力部25は、復号された所定データを取得又は図示せぬ受信先に提供する。

[0031] また、さらに言えば、電波受信部21と、Y-OO暗号入力部25を近くに設置する場合、電波受信部21と、Y-OO暗号入力部25とは、直接接続された信号路LE21及び信号路LE22を介して接続されてよい。即ち、第3電気信号を、直接、第4電気信号として採用してY-OO暗号入力部25に入力することができる。

[0032] 以上、信号受信システム2が、電波RWを受信してY-OO光通信量子暗号のプロトコルに基づき復号する信号受信システム2の構成例について説明した。

[0033] このように、本実施形態の信号送受信システムでは、E/O変換部112とO/E変換部13とが、信号路LO1により光信号を伝送するものとして採用されている。このため、図1の例では、光信号の通信方式として、有線通信の代表である光ファイバ通信が採用されている。

光ファイバ通信では、第三者が、光ファイバに分岐を導入し、信号パワーの一部を取り出すことで、大量の情報（ここでは暗号化された信号。以下、「暗号信号」と呼ぶ）を一度に盗み出すことが原理的に可能である。

[0034] このため、暗号信号がたとえ盗み出されたとしても、その暗号信号の意味内容、即ち平文（送信データ）の内容を第三者に認識させないようにする手法が必要である。

本出願人は、このような手法として、Y-OO光通信量子暗号を用いた手法を開発している。

詳細は後述するが、Y-O-O光通信量子暗号は、光の粒子性に伴う量子的な暗号化であり、光ファイバ通信には適用が可能であった。一方、電波RWを用いた無線通信といった、光に比べて量子性が極めて小さい通信には適用ができなかった。

[0035] ここで、本実施形態の信号送受信システムでは、上述のように、信号送信システム1と信号受信システム2とが、無線通信により情報（暗号信号）を送受信する。このため、図1の例では、暗号信号は、無線通信のため電波RWの形態で、信号送信システム1と信号受信システム2とにより送受信されるものとされている。

無線通信では、第三者が、電波RWを傍受することで、大量の情報（ここでは暗号信号）を、一度に盗み出すことが原理的に可能であるという課題が生じてしまう。

そこで、本実施形態の信号送受信システムは、このような課題を解決することが可能なように構成されている。以下、このような課題を解決する手法について説明する。

[0036] Y-O-O光通信量子暗号は、「量子雑音の効果で暗号文を正しく取得できないこと」を特徴としており、本出願人により開発されたものである。

Y-O-O光通信量子暗号において、送信対象のデータ（平文）は、「0」又は「1」のビットデータの1以上の集合体で表される。この送信データを構成する各ビットデータは、所定のアルゴリズムにより、M個（Mは2以上の整数値）の値のうち所定値に変調される。そこで、以下、この数値Mを「変調数M」と呼ぶ。

[0037] Y-O-O光通信量子暗号では、暗号側と復号側で暗号鍵により、ビット毎に光信号（搬送波）の位相と振幅のうち少なくとも一方が変調数Mの値のうち何れかに変調されることによって、送信データ（平文）に対する暗号化が行われる。ここで、変調数Mを極めて多値とすることで、「量子雑音の効果で暗号文を正しく取得できないこと」という特徴が実現される。

Y-O-O光通信量子暗号で採用される「所定のプロトコル」については、

例えば特開 2012-085028 号公報を参照するとよい。そこで、ここでは簡単に、Y-O-O 光通信量子暗号の原理の概要について、位相変調を例として図 2 及び図 3 を参照しつつ説明する。

[0038] 図 2 は、Y-O-O 光通信量子暗号の原理の概要を説明する図である。

図 2 (a) 乃至図 2 (c) には、縦軸と横軸の交点を原点とした、光信号の位相と振幅（強度）を表す I-Q 平面が描画されている。I-Q 平面上の一点を決めると、光信号の位相と振幅が一意に決まる。位相は、I-Q 平面の原点を始点とし、その光信号を表す点を終点とする線分と、位相 0 を表す線分との成す角度となる。一方、振幅は、その光信号を表す点と、I-Q 平面の原点との間の距離となる。

[0039] 図 2 (a) は、Y-O-O 光通信量子暗号の理解を容易なものとするべく、通常の 2 値変調の原理を説明する図である。

例えば、平文（送信データ）がそのまま光信号（搬送波）に重畳されて送信される場合、平文を構成する各ビットデータ（1 又は 0）の夫々に対して、図 2 (a) に示す 2 値変調が行われるものとする。

この場合、図 2 (a) において、ビットデータが「0」の場合、位相変調後の光信号を示す点（以下、「シンボル点」と呼ぶ）の配置は、横軸上右側の 0 (0) としたシンボル点 S 1 1 の配置、即ち位相が 0 の配置となる。一方、ビットデータが 1 の場合、位相変調後のシンボル点の配置は、横軸上左側の π (1) としたシンボル点 S 1 2 の配置、即ち位相が π の配置となる。

なお、シンボル点 S 1 1 を囲む実線の円は、シンボル点 S 1 1 の光信号を受信した場合における、量子雑音の揺らぎの範囲の例を示したものである。シンボル点 S 1 2 についても、同様に量子雑音の揺らぎの範囲の例がシンボル点 S 1 2 を囲む実線の円として示されている。

[0040] 図 2 (b) は、Y-O-O 光通信量子暗号を採用した場合における、変調数 $M=16$ の位相変調の原理を説明する図である。

図 2 (b) の例の場合、平文を構成する各ビットデータの夫々について、暗号鍵を用いて 8 値のうちランダムな何れかの値が生成される。そして、図

2 (a) に示す通常の 2 値変調のシンボル点 (0 に対応する位相 0 の点、又は 1 に対応する位相 π の点) の位相が、8 値のうちランダムに生成された値に従って I Q 平面においてビット毎に回転されることで、位相変調が行われる。

ビットデータの取り得る値は「0」又は「1」の 2 値であるので、結果として、図 2 (b) の例の位相変調が行われると、シンボル点の配置は、($\pi/8$) ずつ位相が異なる 16 個 (変調数 $M=16$) の配置となる。

[0041] ただし、図 2 (b) の例の場合、ビットデータがとり得る「0」又は「1」の値が、変調数 $M=16$ の値のうち何れかの値に変調されただけである。このため、16 個のシンボル点の配置を取る光信号 (暗号信号) が盗み出されてしまうと、その意味内容、即ち平文 (送信データ) の内容が第三者に認識される恐れがある。即ち、Y-O-O 光通信量子暗号の安全性は、変調数 $M=16$ 程度だと十分ではない。

そこで、実際には、図 2 (c) に示すように、変調数 M として極めて多値、例えば 4096 が採用され、Y-O-O 光通信量子暗号の安全性が高められている。

[0042] 図 2 (c) は、Y-O-O 光通信量子暗号を採用した場合における、変調数 $M=4096$ の位相変調の原理を説明する図である。

図 3 は、図 2 (c) の位相変調における $N=4096$ のシンボル点の配置のうち、隣接する 3 つのシンボル点の配置が視認できるように、図 2 (c) を拡大した図である。

図 3 に示すように、シンボル点 S_{21} 乃至 S_{23} の夫々において、範囲 S_N だけショット雑音 (量子雑音) による揺らぎがある。

ショット雑音は、光が量子性をもつことに起因する雑音であり、真にランダムであり、物理法則として取り除けないという特徴を有する。

変調数 M として 4096 等の極めて多値の位相変調がなされると、図 3 に示すように、隣接するシンボル点がショット雑音に隠れて判別できない状況になる。

[0043] 具体的には、隣接する2つのシンボル点 S_{21} 及び S_{22} の距離 D が、ショット雑音の範囲 S_N よりも十分小さいとき（そのように小さくなるように、変調数 M として極めて多値の位相変調がなされたとき）、受信側で測定された位相情報から、元のシンボル点の位置は断定困難となる。

つまり、例えばある時刻に受信側で測定された位相が、図3に示すシンボル点 S_{22} の位置に対応していたものとする。この場合、シンボル点 S_{22} の光信号として送信されたものであるのか、それとも、実際にはシンボル点 S_{21} やシンボル点 S_{23} の光信号として送信されたものが、ショット雑音の影響でシンボル点 S_{22} として測定されたのかは、区別ができない。

[0044] 以上まとめると、Y-O-O光通信量子暗号では、変調数 M が極めて多値の変調が採用されている。

[0045] なお、図2及び図3の例では位相変調であるが、これに代えて又はこれと共に振幅（強度）変調でもよい。即ち、Y-O-Oプロトコルを用いた光信号の変調には、強度変調、振幅変調、位相変調、周波数変調、直交振幅変調等のあらゆる変調方式を採用できる。

[0046] また、上述のように、Y-O-O光通信量子暗号により、あらゆる変調方式において、2つのシンボル点の距離 D を、ショットノイズの範囲 S_N より十分に小さくすることが可能であり、「量子雑音の効果で暗号文を正しく取得できない」という特徴を持つことができる。また、量子雑音は安全性を担保することになるが、実際的には、量子雑音に加えて熱雑音等の古典雑音も含めたすべての「雑音」の効果によって盗聴者が正しい暗号文を取得することを防止することになる。

[0047] 以下、Y-O-O光通信量子暗号は、光ファイバ通信には適用が可能で、無線通信には適用が不可能とされてきた理由について説明する。

まず、Y-O-O光量子暗号における、安全性の指標と、搬送波の周波数の関係性について説明する。以下、「ショット雑音が隣接するシンボルをいくつマスクするか」に対応する、雑音マスクング量を用いて説明する。

[0048] 具体的には、本明細書では「ショット雑音の分布をガウス分布として近似

したときの標準偏差の範囲に入るシンボル点の数」を雑音マスキング量 Γ として定義して説明する。

なお、雑音マスキング量 Γ の概念は、ショット雑音の分布以外にも適用可能な概念である。他の雑音に対して雑音マスキング量 Γ の概念を適用する方法は、後述する。

[0049] 図2で上述したように、隣接する2つのシンボル点の距離 D が、ショット雑音の範囲 S_N よりも十分小さいとき、受信側で測定された位相情報から、元のシンボル点の位置は断定困難となる。

光通信において、高速で通信できる程度の強度の光信号を採用した場合、ショット雑音の量の分布（揺らぎの範囲）は、ガウス分布として近似することができる。即ち、この例の雑音マスキング量 Γ は、図2で上述したショット雑音の範囲 S_N に対応する距離（半径）を、ショット雑音のガウス分布の標準偏差を採用する。

[0050] 換言すれば、雑音マスキング量 Γ は、ショット雑音の範囲 S_N に含まれる他のシンボル点の数である。つまり、雑音マスキング量 Γ は、あるシンボル点に対して距離 D がショット雑音の範囲 S_N より小さい他のシンボル点の数を示す。即ち、雑音マスキング量 Γ は、暗号信号の暗号の強度に比例する量となる。

[0051] 例えば、Y-O-O光量子暗号において、位相変調方式を採用した場合、雑音マスキング量 Γ は、以下の式（1）で示される。

[数1]

$$\Gamma = \frac{M}{4\pi} \sqrt{\frac{R \cdot h\nu_0}{P_0}}$$

・・・（1）

[0052] ここで、変調数 M は、暗号化のために変調される位相の候補数である。ま

た、シンボルレート R は、単位時間あたりにシンボル点をいくつ送るかを示す数である。また、プランク定数 h は、物理定数であって、光子の持つエネルギーと振動数に係る比例定数である。また、周波数 ν_0 は、信号の周波数である。また、パワー P_0 は、信号のパワーを表す数である。

[0053] 雑音マスキング量 Γ が十分大きい値である場合、ショット雑音によるマスキングが働く。即ち、 $Y=0$ の光量子暗号が暗号として有効に働く。具体的には例えば、この値が 1 以上でショット雑音によるマスキングの効果が発揮され、十分に大きい値である場合、更に高い安全性が達成される。

式 (1) をみると、位相変調方式を採用した場合において、雑音マスキング量 Γ は、信号周波数 ν_0 の平方根に比例する。換言すれば、搬送波の周波数 ν_0 が低い場合、雑音マスキング量 Γ は小さくなり、暗号化の安全性は低いものとなる。

[0054] 具体的には例えば、光ファイバ伝送で用いられる周波数 ν_0 は、 200 [THz] (波長はおよそ、 1.55 [μm]) がある。一方、例えば、長波による無線通信で用いられる周波数 ν_0 は、 100 [kHz] がある。また、例えば、マイクロ波による無線通信で用いられる周波数 ν_0 は、 10 [GHz] がある。

[0055] ここで、周波数 ν_0 以外が変わらない条件で、雑音マスキング量 Γ を比較した例は、以下の通りである。なお、周波数 ν_0 以外が変わらない条件とは、シンボルレート R 、及びパワー P_0 が、同一である条件である。

例えば、上記の長波の例において、長波による無線通信の雑音マスキング量 Γ を、光ファイバ伝送の雑音マスキング量 Γ で割った比は、約 45000 分の 1 となる。また、例えば、上記のマイクロ波の例において、マイクロ波による無線通信の雑音マスキング量 Γ を、光ファイバ伝送の雑音マスキング量 Γ で割った比は、約 140 分の 1 となる。

[0056] 上記の通り、長波やマイクロ波といった電波を用いた無線通信においては、光ファイバ伝送と比較して、雑音マスキング量 Γ が小さくなってしまったため、 $Y=0$ の光通信量子暗号を用いることは、困難であると考えられてきた

。それゆえに、Y-O-O「光」通信量子暗号という呼び名にもなっている。つまり、可視光と電波とは共に光子の運動に基づくが、基本的に、可視光領域以上の周波数でなくては利用できないと考えられてきた。

[0057] 以上、Y-O-O光通信量子暗号は、光ファイバ通信には適用が可能で、無線通信には適用が不可能とされてきた理由について説明した。

上記の通り、無線通信では、第三者が、電波RWを傍受することで、大量の情報（ここでは暗号信号）を、一度に盗み出すことが原理的に可能である。このため、第三者が、電波RWを傍受した場合であっても、データを正しく再構築できない、物理層での暗号化を行いたいという要望がある。本実施形態の信号送受信システムは、このような要望に応えるべく、物理層のうち、無線通信における電波RWに対しても暗号化を行うことができるものである。

つまり、上述の本実施形態の信号送信システム1は、Y-O-O光通信量子暗号を無線通信に適用が可能となるシステム（そのような可能となる仕組みに基づいて構成されたシステム）である。

[0058] 以下、本実施形態において、Y-O-O光通信量子暗号を無線通信に適用が可能となる仕組みについて説明する。上述したように、本実施形態において、送信対象の所定データは、種々の変換を経ることで信号の形態が変換される。これらの変換の結果、図1の暗号信号が電波RWの形態として送信される。以下、所定データがY-O-O光通信量子暗号により、暗号信号となるタイミングを含む、暗号信号が送信される仕組みについて説明する。

[0059] 図1に示したように、光信号発生部11は、所定データに基づく多値の状態をとる多値情報を、光信号として発生させる。また、発生された光信号は、第三者に傍受された場合であっても、ショット雑音の効果で暗号文を正しく取得できない。

具体的には例えば、信号路LO1の光信号を傍受した第三者は、光信号をO/E変換することにより電気信号として、取得する。O/E変換するタイミングにおいて、光の粒子性により、ショット雑音が発生する。これにより

、Y-O-O光通信量子暗号のアルゴリズム及びその暗号鍵を有しない第三者は、電気信号を復号して暗号文を正しく取得することができない。

[0060] 図1の例の信号送信システム1は、光信号を、O/E変換部13により、第2電気信号に変換する。即ち、上述における第三者によるO/E変換と同様に、O/E変換部13におけるO/E変換のタイミングにおいて、第2電気信号は、ショット雑音が発生した電気信号となる。更に、信号送信システム1は、第2電気信号を電波送信部14から送信する。これにより、電波RWは、光信号の周波数に基づいたショット雑音を含んで暗号化される。即ち、電波RWの周波数ではなく、光信号の周波数に基づいたショット雑音が発生するため、雑音マスキング量 Γ が大きい電気信号となる。

[0061] 以上、本実施形態において、Y-O-O光通信量子暗号を無線通信に適用が可能となる仕組みについて説明した。

上述のタイミングにおいて、即ち、光信号を傍受した第三者がO/E変換するタイミングや、O/E変換部13が光信号を第2電気信号にO/E変換するタイミングにおいて、送信対象の所定データが暗号化され、暗号信号となる。これにより、以下の効果を奏することができる。

[0062] 第三者が、光ファイバに分岐を導入する等して、信号路LO1を通る光信号の信号パワーの一部を取り出した場合であっても、O/E変換した電気信号は、ショット雑音が発生し、暗号化されているため、第三者が解読することは、困難である。

従って、信号路LO1は、長距離の光ファイバ等により構成することができる。即ち、例えば、長距離の光ファイバにより構成した場合に、第三者が光ファイバに工作して光信号を傍受したときであっても、光信号は暗号化されているため、安全性を確保することができる。これにより、光信号発生部11と、E/O変換部13とを離れた位置に備えることができる。

[0063] 更に言えば、一般に、光信号増幅部12は、光信号を増幅する際、出力後の光信号にノイズを載せる。これにより、上述のショット雑音に加えて、更にノイズを載せることで、信号路LO1A以降において、第三者が信号を取

得した場合であっても、光信号は更に大きな雑音により暗号化されているため、解読することは困難である。

[0064] 以下、図1の例の信号送信システム1における各機能ブロックの夫々の間で入力や出力される信号の夫々の、具体的な周波数の例を説明する。なお、信号送信システム1により送信される電波RWの周波数は、中心周波数 $f_0 = f_{RF1}$ [Hz] であるものとして説明する。

[0065] まず、Y-O-O光通信量子暗号に基づく多値の状態をとる多値情報の電気信号は、ベースバンド（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号）で発生する。

即ち、例えば、Y-O-O暗号出力部111で出力され、信号路LE11を介して伝送される第1電気信号は、中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号である。

[0066] 次に、レーザの直接変調やレーザと各種変調素子の組み合わせで実施されるE/O変換により、第1電気信号は光信号に変換される。これにより、中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] であった第1電気信号は、レーザの周波数を中心周波数とする光信号に変換される。

即ち、例えば、E/O変換部112は、図示せぬレーザ光源を含んで構成される。E/O変換部112のレーザ光源は、周波数 f_{sig} の単色の（変調されていない）搬送波を発生する。E/O変換部112は、単色の周波数 f_{sig} の搬送波を、中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の光信号に変調する。これにより、E/O変換部112は、第1電気信号を光信号に変換する。

[0067] 次に、光信号は、受信に必要な光学部材とフォトディテクター（複数の場合もある）を用いたO/E変換により、再び電気信号に変換される。

即ち、例えば、O/E変換部13は、図示せぬ光学部材と1以上のフォトディテクターを含んで構成される。一般的な光ファイバ通信における、O/E変換部13は、光信号を、中心周波数 $f_0 = 0$ の第2電気信号に変換する。

[0068] 上述の通り、単にO/E変換を行っただけでは、第2電気信号は中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号となるため、信号送信システム1により送信した

い中心周波数 $f_0 = f_{RF1}$ の電波 RW の形態で直接送信することができない。そこで、図4乃至8を用いて後述する信号送信システム1の構成により、電波送信部14は、無線通信で用いる電波 RW の周波数の電気信号を得ることができる。

[0069] 次に、図1の例の信号受信システム2における各機能ブロックの夫々の間で入力や出力される信号の夫々の、具体的な周波数の例を説明する。なお、信号受信システム2により受信される電波 RW の周波数は、中心周波数 $f_0 = f_{RF2}$ [Hz] であるものとして説明する。これは、信号送信システム1と信号受信システム2とで、異なる周波数を採用することができるためである。例えば、図示せぬ電波の中継装置が、電波 RW を、違う中心周波数の電波として中継する構成をとることができる。なお、信号受信システム2が、信号送信システム1により送信した電波 RW と同一の周波数（中心周波数 $f_0 = f_{RF1}$ [Hz]）の電波 RW を受信することもできることは、言うまでもない。

[0070] 受信において、信号受信システム2は、中心周波数 $f_0 = f_{RF2}$ の無線信号（ここでは、暗号信号）を受信後、送信側と逆のプロセスで、E/O変換とO/E変換を行い、ベースバンドの暗号信号（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]）の信号）を得る。

なお、本実施形態において、信号送受信システムは、信号送信システム1と信号受信システム2とを含むように構成されているが、信号送信システム1は、信号の受信に係る機能を備えた、信号の送信及び受信を可能な信号処理システムであってよい。この場合、2つ以上の信号処理システムを含む送受信システムにおいて、通信の方向によらず、電波 RW の形態の暗号信号による通信を行うことができる。この場合、信号の送信及び受信を可能な信号処理システムにおいて、電波受信部や電波送信部（アンテナ）、E/O変換部とO/E変換部の間の光ファイバ等の伝送路等は、送信と受信とで共有されてもよい。なお、2つ以上の信号処理システムを含む信号送受信システムにおいて、暗号信号を用いることは、片方向のみとすることもできる。

[0071] 上述の通り、信号処理システムにおける構成や送信と受信の構成は、必ずしも対称である必要はない。例えば、信号受信システムがアンテナ中継局の場合、アンテナ（電波受信部）にて受信後に増幅等の操作の後に再びアンテナ（電波送信部）にて送信を行うこともある。特に、信号受信システム2が、PC等の端末の場合には、E/O変換やO/E変換はなく、電氣的な処理のみを行うことも想定される。即ち、電波受信部21で受信した第3電気信号は、Y-O暗号入力部25に入力されてよい。その際、第3電気信号は、Y-O暗号入力部25に適した中心周波数に適宜変換されてよい。

[0072] 以下、図4乃至8を用いて、信号送信システム1のY-O暗号出力部111から出力された第1電気信号（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]の信号）を、電波送信部14から出力される電波RWの形態の信号（中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ [Hz]の信号）に変換を行う具体的な例を説明する。

[0073] 図4は、図1の信号送信システムのうち、ベースバンド・ヘテロダイン方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

図4の例の信号送信システム1は、図1の例の信号送信システム1に、更に、レーザ発生部121と、光コンバイナ部122と、夫々を接続する信号路LL11乃至LL13とを備える。

[0074] Y-O暗号出力部111は、送信対象である所定データと秘密鍵から、Y-O光通信量子暗号のプロトコルに基づき、光の位相、及び光の振幅の少なくとも一方を変調するための多値情報の第1電気信号をベースバンドの信号（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]の信号）として出力する。

第1電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE11に示す分布となる。

[0075] グラフFE11に示す分布は、信号に含まれる周波数を概念的に示したものである。グラフFE11に示す分布は、横軸に周波数 f をとる。

また、グラフFE11に示す分布における、上向きの矢印は、当該矢印の位置の周波数を多く含むことを示している。即ち、グラフFE11に示す分布は、中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]の信号であることを示している。

また、グラフ F E 1 1 に示す分布における、上向きの矢印の周囲にある半球状の形状は、中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号の周囲に、変調に係る信号が周波数分布を持つことを示す。

以下、グラフの夫々に示す分布における矢印や半球状の形状等は、上記のグラフ F E 1 1 と同様の意味合いを持つものである。

[0076] つまり、グラフ F E 1 1 の分布をみると、第 1 電気信号は、光の位相、及び光の振幅の少なくとも一方を変調するための情報を含む信号である。

[0077] E/O変換部 1 1 2 は、第 1 電気信号を、変調方式に応じた適切な E/O変換により、中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の光信号に変換する。図 4 の例の光信号は、光ファイバ等により構成された信号路 L L 1 1 を介して、光コンバイン部 1 2 2 に伝送される。

なお、E/O変換部 1 1 2 は、図示せぬレーザ発生部と、位相変調器、マッハツェンダ変調器、I/Q変調器等を組み合わせる光の位相と振幅もしくはその片方を変調する構成をとる。又は、E/O変換部 1 1 2 は、図示せぬ変調レーザ発生部を備え、変調された光信号を直接出力する構成をとってもよい。

[0078] E/O変換部 1 1 2 から出力される光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ F O 1 1 に示す分布となる。

グラフ F O 1 1 をみると、光信号は、中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の信号である。また、光信号は、中心周波数 f_0 の前後の周波数に分布を持っている。即ち、光信号は、位相変調された中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の信号である。

[0079] レーザ発生部 1 2 1 は、光信号周波数 $f = f_{sig} - f_{RF}$ の単色のレーザ光を発生する。即ち、レーザ発生部 1 2 1 は、光信号の中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ から、無線信号として伝送したい周波数 $f = f_{RF}$ だけ離れた、周波数 $f = f_{car}$ の単色のレーザ光（キャリア光とも適宜呼ぶ）を発生する。図 4 の例のキャリア光は、光ファイバ等により構成された信号路 L L 1 2 を介して、光コンバイン部 1 2 2 に伝送される。

[0080] レーザ発生部 121 から発生されるキャリア光に含まれる周波数は、例えば、グラフ F O 1 2 に示す分布となる。

グラフ F O 1 2 をみると、キャリア光は、中心周波数 $f_0 = f_{car}$ の信号である。また、キャリア光は、中心周波数 f_0 の前後の周波数に分布を持たない。即ち、キャリア光は、単色の周波数 $f = f_{car}$ の信号である。

[0081] 光コンバイン部 122 は、光信号とキャリア光を合波する。即ち、信号路 L L 1 1 を介して伝送された光信号と、信号路 L L 1 2 を介して伝送されたキャリア光との両方を合わせた合波された光信号を出力する。図 4 の例の合波された光信号は、光ファイバ等により構成された信号路 L L 1 3 を介して、O/E 変換部 13 に伝送される。

なお、光コンバイン部 122 は、光パワー合波器や光波長多重器等によって構成されてよい。

[0082] 光コンバイン部 122 から出力される合波された光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ F O 1 3 に示す分布となる。

グラフ F O 1 3 をみると、合波された光信号は、中心周波数 $f_0 = f_{car}$ の信号と中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の信号を含んでいる。また、合波された光信号のうち中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の前後の周波数に分布を持つ。即ち、合波された光は、光の位相、及び光の振幅の少なくとも一方が変調された中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の信号と、単色の周波数 $f = f_{car}$ の信号とを含む光信号である。

[0083] O/E 変換部 13 は、合波された光信号を第 2 電気信号に変換する。第 2 電気信号には、二つの周波数のビート成分である周波数 $f = f_{RF}$ （無線伝送したい周波数）の暗号信号が発生する。

[0084] O/E 変換部 13 で変換された第 2 電気信号の周波数は、例えば、グラフ F E 1 2 に示す分布となる。

グラフ F E 1 2 をみると、第 2 電気信号は、中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の信号である。また、第 2 電気信号は、中心周波数 f_0 の前後の周波数に分布を持っている。

[0085] 電波送信部 1 4 は、第 2 電気信号の暗号信号を電波 R W の形態で送信する。

[0086] 以上が、図 4 の例のベースバンド・ヘテロダイン方式を採用した場合における、信号送信システム 1 における各機能ブロックの夫々と、各機能ブロックの夫々の間で入力や出力される信号の夫々の、具体的な周波数の例である。

[0087] 上述の構成により、ベースバンド（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号）で発生された第 1 電気信号が、送信される電波 R W の周波数である中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の第 2 電気信号（ここでは暗号信号）に変換され、電波 R W の形態で送信される。

[0088] なお、E/O 変換部 1 1 2 と光コンバイン部 1 2 2 との間には、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

同様に、キャリア光を発生させるレーザ発生部 1 2 1 と光コンバイン部 1 2 2 との間にも、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

また、光コンバイン部 1 2 2 と O/E 変換部 1 3 との間にも、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

さらに、O/E 変換部 1 3 と電波送信部 1 4 との間には、RF 伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、 f_{RF} の周波数帯のフィルタや増幅器等のコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

[0089] 図 5 は、図 1 の信号送信システムのうち、中間周波数・ヘテロダイン方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

図 5 の例の信号送信システム 1 は、図 1 の例の信号送信システム 1 に、更に、局部発振部 1 3 1 と、ミキサ部 1 3 2 と、レーザ発生部 1 3 3 と、光コンバイン部 1 3 4 と、信号路 L L 2 1 乃至 L L 2 6 とを備える。

[0090] 図 5 の例の Y-O-O 暗号出力部 1 1 1 の機能や構成は、図 4 の例の Y-O

0暗号出力部111の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。即ち、第1電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE21に示す分布となり、図4の例のグラフFE11に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

Y-00暗号出力部111が出力する第1電気信号は、信号路LL21を介してミキサ部132に伝送される。

[0091] 局部発振部131は、後述する中間周波数 $f \mid F$ に対応する局部発振信号を発振する。局部発振部131により発振された局部発振信号は、信号路LL22を介してミキサ部132に伝送される。

[0092] ミキサ部132は、第1電気信号と局部発振信号とを、混合して中間周波数である周波数 $f = f \mid F$ を中心周波数とした中間周波数の電気信号を出力する。中間周波数の電気信号は、信号路LL23を介して、E/O変換部112に伝送される。

なお、ミキサ部132は、変調方式に応じた構成をとり、第1電気信号と局部発振信号とから、中間周波数の電気信号を出力する。即ち、ミキサ部132の具体的な構成は、強度変調、振幅変調、位相変調、周波数変調、直交振幅変調等の変調方式に応じた構成をとってよい。

[0093] ミキサ部132から出力される中間周波数の電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE22に示す分布となる。

グラフFE22をみると、中間周波数の電気信号は、中心周波数 $f_0 = f \mid F$ の信号である。また、中間周波数の電気信号は、中心周波数 f_0 の前後の周波数に分布を持っている。即ち、中間周波数の電気信号は、光の位相、及び光の振幅の少なくとも一方を変調するための情報をもつ中心周波数 $f_0 = f \mid F$ の信号である。

[0094] E/O変換部112は、中間周波数の電気信号を、変調方式に応じた適切なE/O変換により、中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の光信号に変換する。図5のE/O変換部112の他の機能や構成は、図4の例のE/O変換部112の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

。

光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ F O 2 1 に示す分布となり、図 4 の例のグラフ F O 1 1 に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

E / O 変換部 1 1 2 が出力する光信号は、光ファイバ等により構成された信号路 L L 2 4 を介して光コンバイン部 1 3 4 に伝送される。

[0095] レーザ発生部 1 3 3 は、光信号周波数 $f = f_{sig} - f_{RF} + f_{IF}$ の単色のレーザ光を発生する。即ち、レーザ発生部 1 2 1 は、光信号の中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ から、無線信号として伝送したい周波数 $f = f_{RF}$ と中間周波数 f_{IF} との差だけ離れた、周波数 $f = f_{car} = f_{sig} - f_{RF} + f_{IF}$ の単色のレーザ光（キャリア光と適宜呼ぶ）を発生する。図 4 の例のキャリア光は、光ファイバ等により構成された信号路 L L 2 5 を介して、光コンバイン部 1 3 4 に伝送される。

[0096] レーザ発生部 1 3 3 から発生されるキャリア光に含まれる周波数は、例えば、グラフ F O 2 3 に示す分布となる。

グラフ F O 2 3 をみると、キャリア光は、中心周波数 $f_0 = f_{car}$ の信号である。また、キャリア光は、中心周波数 f_0 の前後の周波数に分布を持たない。即ち、キャリア光は、単色の周波数 $f = f_{car}$ の信号である。

[0097] 光コンバイン部 1 3 4 は、光信号とキャリア光を合波する。即ち、信号路 L L 2 4 を介して伝送された光信号と、信号路 L L 2 5 を介して伝送されたキャリア光との両方を合わせた合波された光信号を出力する。図 5 の例の合波された光信号は、光ファイバ等により構成された信号路 L L 2 6 を介して、O / E 変換部 1 3 に伝送される。

なお、光コンバイン部 1 3 4 は、光パワー合波器や光波長多重器等によって構成されてよい。

[0098] 光コンバイン部 1 3 4 から出力される合波された光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ F O 2 3 に示す分布となる。

グラフ F O 2 3 をみると、合波された光信号は、中心周波数 $f_0 = f_{car}$

r の信号と中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の信号を含んでいる。また、合波された光信号のうち中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の前後の周波数に分布を持つ。即ち、合波された光は、周波数変調された中心周波数 $f_0 = f_{car}$ の信号と、単色の周波数 $f = f_{sig}$ の信号とを含む光信号である。なお、上述の通り、キャリア光の周波数 $f = f_{car} = f_{sig} - f_{RF} + f_{IF}$ であるため、周波数変調された中心周波数 $f_0 = f_{car}$ の信号と、単色の周波数 $f = f_{sig}$ の信号との周波数との差は、 $f_{RF} - f_{IF}$ となっている。

[0099] O/E変換部13は、合波された光信号を第2電気信号に変換する。第2電気信号には、二つの周波数のビート成分である周波数 $f = f_{RF} - f_{IF}$ の暗号信号が発生する。なお、E/O変換部112には、中間周波数の電気信号である位相変調された中心周波数 $f_0 = f_{IF}$ の信号が入力されていたため、第2電気信号の中心周波数は f_{IF} だけ足された周波数となる。つまり、第2電気信号は、ビート成分である周波数 $f = f_{RF} - f_{IF}$ であって、中心周波数は f_{IF} だけ足されるので、中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の信号となる。

[0100] 電波送信部14と、信号路LE12との夫々の機能や構成は、図4の電波送信部14と、信号路LE12との夫々の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

また、信号路LE12により伝送される第2電気信号に含まれる周波数は例えば、グラフFE23に示す分布となり、図4の例のグラフFE12に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

これにより、電波送信部14は、第2電気信号の暗号信号を電波RWの形態で送信する。

[0101] なお、E/O変換部112と光コンバイン部134との間や、レーザ発生部133と光コンバイン部134との間、光コンバイン部134とO/E変換部13との間との夫々には、図4の例と同様に、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

さらに、O/E変換部13と電波送信部14との間には、図4の例と同様に、RF伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、 f_{RF} の周波数帯のフィルタや増幅器等のコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

[0102] 以上が、図5の例の中間周波数・ヘテロダイン方式を採用した場合における、信号送信システム1における各機能ブロックの夫々と、各機能ブロックの夫々の間で入力や出力される信号の夫々の、具体的な周波数の例である。

[0103] 上述の構成により、ベースバンド（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号）で発生された第1電気信号が、中間周波数の電気信号を介して、送信される電波RWの周波数である中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の第2電気信号（ここでは暗号信号）に変換され、電波RWの形態で送信される。

[0104] 中間周波数の電気信号に変換することで、E/O変換部112は、レーザと光の強度変調器（マッハツェンダ変調器や電界吸収型の変調器）の組み合わせやレーザの直接変調等、比較的簡便な構成とすることができる。即ち、E/O変換部112は、ベースバンドで発生された第1電気信号を光信号に変換する場合と比較して、中間周波数の電気信号を光信号に変換の方が、比較的簡便（即ち、比較的安価）な構成により変換することができる。

[0105] 図6は、図1の信号送信システムのうち、アナログ・直接変調方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

図6の例の信号送信システム1は、図1の例の信号送信システム1に、更に、局部発振部141と、ミキサ部142と、信号路LL31乃至LL33とを備える。

[0106] 図6の例のY-O暗号出力部111の機能や構成は、図4の例のY-O暗号出力部111の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。即ち、第1電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE31に示す分布となり、図4の例のグラフFE11に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

Y-O暗号出力部111が出力する第1電気信号は、信号路LL31を介してミキサ部142に伝送される。

[0107] 局部発振部 141 は、後述する中間周波数 f_{RF} に対応する局部発振信号を発振する。即ち、図 6 の例の局部発振部 141 は、中間周波数として電波 RW の周波数である f_{RF} に対応する局部発振信号を発振する。局部発振部 141 により発振された局部発振信号は、信号路 $LL32$ を介してミキサ部 142 に伝送される。

[0108] ミキサ部 142 は、第 1 電気信号と局部発振信号とを、混合して中間周波数である周波数 $f = f_{RF}$ を中心周波数とした中間周波数の電気信号を出力する。即ち、中間周波数として、送信される電波 RW の周波数が採用される。中間周波数の電気信号は、信号路 $LL33$ を介して、 E/O 変換部 112 に伝送される。

なお、ミキサ部 142 は、変調方式に応じた構成をとることができるが、図 5 の例のミキサ部 132 の構成の例と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

[0109] ミキサ部 142 から出力される中間周波数の電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ $FE32$ に示す分布となる。

グラフ $FE32$ をみると、中間周波数の電気信号は、中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の信号である。また、中間周波数の電気信号は、中心周波数 f_0 の前後の周波数に分布を持っている。即ち、中間周波数の電気信号は、光の位相、及び光の振幅の少なくとも一方を変調するための情報をもつ中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の信号である。

[0110] E/O 変換部 112 は、中間周波数の電気信号を、変調方式に応じた適切な E/O 変換により、中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の光信号に変換する。図 6 の E/O 変換部 112 の他の機能や構成は、図 4 の例の E/O 変換部 112 の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ $FO3$ に示す分布となり、図 4 の例のグラフ $FO11$ に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

E/O変換部112が出力する光信号は、光ファイバ等により構成された信号路LO1を介してO/E変換部13に伝送される。

[0111] O/E変換部13は、光信号を第2電気信号に変換する。第2電気信号には、中間周波数の電気信号である中間周波数 $f = f_{RF}$ の暗号信号が発生する。即ち、E/O変換部112には、中間周波数である中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の信号が入力されていたため、第2電気信号の中心周波数は、ベースバンドで発生された第1電気信号から f_{RF} だけ足された周波数となる。

[0112] 電波送信部14と、信号路LE12との夫々の機能や構成は、図4の電波送信部14と、信号路LE12との夫々の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

また、信号路LE12により伝送される第2電気信号に含まれる周波数は例えば、グラフFE33に示す分布となり、図4の例のグラフFE12に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

これにより、電波送信部14は、第2電気信号の暗号信号を電波RWの形態で送信する。

[0113] なお、E/O変換部112とO/E変換部13との間には、図4の例と同様に、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

さらに、O/E変換部13と電波送信部14との間には、図4の例と同様に、RF伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、 f_{RF} の周波数帯のフィルタや増幅器等のコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

[0114] 以上が、図6の例のアナログ・直接変調方式を採用した場合における、信号送信システム1における各機能ブロックの夫々と、各機能ブロックの夫々の間で入力や出力される信号の夫々の、具体的な周波数の例である。

[0115] 上述の構成により、ベースバンド（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]の信号）で発生された第1電気信号が、中間周波数の電気信号を介して、送信される電波RWの周波数である中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の第2電気信号（ここでは暗号信号）に変換され、電波RWの形態で送信される。

[0116] 中間周波数の電気信号に変換することで、E/O変換部112は、レーザと光の強度変調器（マッハツェンダ変調器や電界吸収型の変調器）の組み合わせやレーザの直接変調等、比較的簡便な構成とすることができる。即ち、E/O変換部112は、ベースバンドで発生された第1電気信号を光信号に変換する場合と比較して、中間周波数の電気信号を光信号に変換する方が、比較的簡便（即ち、比較的安価）な構成により変換することができる。

[0117] 図7は、図1の信号送信システムのうち、アナログ・中間周波数方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

図7の例の信号送信システム1は、図1の例の信号送信システム1に、更に、局部発振部151と、ミキサ部152と、局部発振部153と、ミキサ部154と、信号路LL41乃至LL46とを備える。

[0118] 図7の例のY-O暗号出力部111の機能や構成は、図4の例のY-O暗号出力部111の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。即ち、第1電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE41に示す分布となり、図4の例のグラフFE11に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

Y-O暗号出力部111が出力する第1電気信号は、信号路LL41を介してミキサ部152に伝送される。

[0119] 図7の例の局部発振部151と、ミキサ部152との機能や構成の夫々は、図5の例の局部発振部131と、ミキサ部132との機能や構成の夫々と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。即ち、第1電気信号及び中間周波数の電気信号に含まれる周波数の夫々は、例えば、グラフFE41及びグラフFE42の夫々に示す分布となり、図5の例のグラフFE21及びグラフFE22の夫々に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。中間周波数の電気信号は、信号路LL43を介して、E/O変換部112に伝送される。

なお、図7の例において、局部発振部151が発振する局部発振信号は、後述の第2局部発振信号と明確に区別すべく、以下、「第1局部発振信号」

と呼ぶ。

[0120] E/O変換部112は、中間周波数の電気信号を、変調方式に応じた適切なE/O変換により、中心周波数 $f_0 = f_{sig}$ の光信号に変換する。図5のE/O変換部112の他の機能や構成は、図4の例のE/O変換部112の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFO4に示す分布となり、図4の例のグラフFO11に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

E/O変換部112が出力する光信号は、光ファイバ等により構成された信号路LO1を介してO/E変換部13に伝送される。

[0121] O/E変換部13は、光信号を第2電気信号に変換する。第2電気信号には、中間周波数の電気信号である中間周波数 $f = f_{IF}$ の暗号信号が発生する。即ち、E/O変換部112には、中間周波数の電気信号である位相変調された中心周波数 $f_0 = f_{IF}$ の信号が入力されていたため、第2電気信号の中心周波数は、ベースバンドで発生された第1電気信号から f_{IF} だけ足された周波数となる。

O/E変換部13が出力する第2電気信号は、信号路LL44を介してミキサ部154に伝送される。

[0122] 局部発振部153は、中間周波数 $f_{RF} - f_{IF}$ に対応する局部発振信号（上述の第1局部発振信号と明確に区別すべく、以下、「第2局部発振信号」と呼ぶ。）を発振する。即ち、図7の例の局部発振部153は、中間周波数として電波RWの周波数である f_{RF} と第1局部発進周波数の中心周波数 $f_0 = f_{IF}$ との差に対応する第2局部発振信号を発振する。局部発振部153により発振された第2局部発振信号は、信号路LL45を介してミキサ部154に伝送される。

[0123] ミキサ部154は、第2電気信号と第2局部発振信号とを、混合して中間周波数として電波RWの周波数である f_{RF} の電気信号を出力する。即ち、

ミキサ部 154 により混合された電気信号の中心周波数は、ベースバンドで発生された第 1 電気信号から f_{IF} だけ足された周波数と、中間周波数 f_{RF} $f_{RF} - f_{IF}$ に対応する第 2 局部発振信号とが足された、中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ となる。

即ち、ミキサ部 154 により混合された電気信号として、送信される電波 RW の周波数が出力される。混合された電気信号は、信号路 LL46 を介して、電波送信部 14 に伝送される。

なお、ミキサ部 154 は、変調方式に応じた構成をとることができるが、図 5 の例のミキサ部 132 の構成の例と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

[0124] ミキサ部 154 から出力される混合された電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフ FE43 に示す分布となり、図 4 の例のグラフ FE12 に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

[0125] 電波送信部 14 の機能や構成は、図 4 の電波送信部 14 の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

これにより、電波送信部 14 は、混合された電気信号の暗号信号を電波 RW の形態で送信する。

[0126] なお、E/O 変換部 112 と光コンバイン部 134 との間や、レーザ発生部 133 と光コンバイン部 134 との間、光コンバイン部 134 と O/E 変換部 13 との間との夫々には、図 4 の例と同様に、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

さらに、O/E 変換部 13 と電波送信部 14 との間には、図 4 の例と同様に、RF 伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、 f_{RF} の周波数帯のフィルタや増幅器等のコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

[0127] なお、E/O 変換部 112 と O/E 変換部 13 との間には、図 4 の例と同様に、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

さらに、O/E変換部13とミキサ部154との間や、ミキサ部154と電波送信部14との間の夫々には、図4の例と同様に、RF伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、 f_{RF} の周波数帯のフィルタや増幅器等のコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

[0128] 以上が、図7の例のアナログ・中間周波数方式を採用した場合における、信号送信システム1における各機能ブロックの夫々と、各機能ブロックの夫々の間で入力や出力される信号の夫々の、具体的な周波数の例である。

[0129] 上述の構成により、ベースバンド（中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz] の信号）で発生された第1電気信号が、中間周波数の電気信号を介して、送信される電波RWの周波数である中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ の混合された電気信号（ここでは暗号信号）に変換され、電波RWの形態で送信される。

[0130] 図8は、図1の信号送信システムのうち、アナログ・ベースバンド方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック図である。

図8の例の信号送信システム1は、図1の例の信号送信システム1に、更に、局部発振部161と、ミキサ部162と、信号路LL51乃至LL53とを備える。

[0131] 図8の例のY-O暗号出力部111の機能や構成は、図4の例のY-O暗号出力部111の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。即ち、第1電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE51に示す分布となり、図4の例のグラフFE11に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

Y-O暗号出力部111が出力する第1電気信号は、信号路LE11を介してE/O変換部112に伝送される。

[0132] 図8の例のE/O変換部112の機能や構成は、図4の例のE/O変換部112の機能や構成と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。即ち、光信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFO5に示す分布となり、図4の例のグラフFO11に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

E/O変換部112が変換した光信号は、光ファイバ等により構成された信号路LO1を介して、O/E変換部13に伝送される。

[0133] O/E変換部13は、光信号を、第2電気信号に変換する。第2電気信号には、第1電気信号と同様の中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]の暗号信号が発生する。

O/E変換部13で変換された第2電気信号は、信号路LL51を介して、ミキサ部162に伝送される。

[0134] 局部発振部161は、中間周波数 f_{RF} に対応する局部発振信号を発振する。即ち、図8の例の局部発振部161は、中間周波数として電波RWの周波数である f_{RF} に対応する局部発振信号を発振する。局部発振部161により発振された局部発振信号は、信号路LL52を介してミキサ部162に伝送される。

[0135] ミキサ部162は、第2電気信号と局部発振信号とを、混合して中間周波数として電波RWの周波数である f_{RF} の電気信号を出力する。即ち、ミキサ部162により混合された電気信号の中心周波数は、ベースバンドで発生された第1電気信号と同様の中心周波数 $f_0 = 0$ [Hz]と、中間周波数 f_{RF} に対応する局部発振信号とが足された、中心周波数 $f_0 = f_{RF}$ となる。

即ち、ミキサ部162により混合された電気信号として、送信される電波RWの周波数が出力される。混合された電気信号は、信号路LL53を介して、電波送信部14に伝送される。

なお、ミキサ部162は、変調方式に応じた構成をとることができるが、図5の例のミキサ部132の構成の例と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

[0136] ミキサ部162から出力される混合された電気信号に含まれる周波数は、例えば、グラフFE52に示す分布となり、図4の例のグラフFE12に示す分布と基本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

[0137] 電波送信部14の機能や構成は、図4の電波送信部14の機能や構成と基

本的に同様であるので、ここではそれらの説明は省略する。

これにより、電波送信部 1 4 は、混合された電気信号の暗号信号を電波 R W の形態で送信する。

[0138] なお、E / O 変換部 1 1 2 と O / E 変換部 1 3 との間には、図 4 の例と同様に、光ファイバ等の光の伝送媒体や、光フィルタ、光増幅器等の光領域で信号を操作するコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

さらに、O / E 変換部 1 3 とミキサ部 1 5 4 との間や、ミキサ部 1 5 4 と電波送信部 1 4 との間の夫々には、図 4 の例と同様に、R F 伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、 f_{RF} の周波数帯のフィルタや増幅器等のコンポーネントが必要に応じて挿入されてよい。

[0139] 以上、本発明が適用される信号送信システム 1 の各種各様な実施形態を説明してきた。しかしながら、本発明が適用される信号送信システム 1 は、雑音マスキング量 Γ が大きい電気信号を電波 R W の形態で出力することが達成できるものであれば足り、その構成は上述の各種実施形態に限定されず、例えば次のようなものであってよい。

[0140] 例えば上述の実施形態では、説明の便宜上、信号送信システム 1 は、送信対象の信号を暗号化して、電波 R W の形態で送信し、信号受信システム 2 は、この電波 R W を受信して復号することで、上述の形態の信号を受信するとしたが、特にこれに限定されない。

例えば、信号処理システムは、電波 R W の送信に係る構成と電波 R W の受信に係る構成の両方を備えて、電波 R W の形態の暗号信号の送受信が可能であってよい。

[0141] また例えば、上述の実施形態では、信号送受信システムは、信号送信システム 1 と、信号受信システム 2 とから構成されたが、特にこれに限定されない。

例えば、電波 R W の形態の暗号信号の送受信が可能な信号処理システムを複数含む構成としてよい。これにより、信号処理システムは、ネットワークを形成することができる。

[0142] また例えば、上述の実施形態では、光信号発生部 11 の Y-OO 暗号出力部 111 は、Y-OO 光通信量子暗号のプロトコルに基づいて、送信対象である所定データを多値の情報とするとしたが、特にこれに限定されない。

即ち、上述の実施形態では、送信対象である所定データと秘密鍵から、Y-OO 光通信量子暗号のプロトコルに基づき、多値情報を生成するとしたが、とくにこれに限定されない。具体的には例えば、光信号発生部 11 は、送信対象である所定データと所定の共通鍵から、多値情報を生成してもよい。また、例えば、送信対象である所定データと所定の規則から、多値情報を生成してもよい。即ち、光信号発生部 11 は、任意のプロトコルに基づき多値情報を生成できれば足りる。

[0143] また例えば、本実施形態の説明において、雑音マスキング量 Γ は、「ショット雑音の分布をガウス分布として近似したときの標準偏差の範囲に入るシンボル点の数」であるとしたが、特にこれに限定されない。

即ち、雑音マスキング量 Γ は、任意の雑音の範囲に入るシンボル点の数であれば足りる。具体的には例えば、雑音マスキング量 Γ における雑音は、熱雑音等の古典雑音を含むあらゆる雑音を含んでよい。

また、雑音マスキング量 Γ における範囲は、雑音の分布はガウス分布として近似したときの標準偏差の範囲に限定されない。具体的には例えば、雑音を実際に計測した分布を取得し、取得された分布の分散を、範囲としてよい。

即ち、雑音マスキング量 Γ は、位相変調方式を採用した場合の式である上述の式 (1) に限定されない。

[0144] 上記をまとめると、隣接する 2 つのシンボル点の距離が、熱雑音等の古典雑音を含むあらゆる雑音の範囲よりも十分小さければ足りる。即ち、光信号発生部 11 が発生する光信号は、熱雑音等の古典雑音も含めたすべての「雑音」による雑音マスキング量が 1 以上とれば足りる。

[0145] また例えば、上述の実施形態では、図 4 乃至 8 を用いて、信号送信システム 1 のうち、種々の方式を採用した例における詳細な構成例を示すブロック

を図示したが、特にこれに限定されない。

例えば、中間周波数として複数段階の中間周波数を備えて信号処理をしてもよい。また例えば、レーザ光を光コンバイン部により合波することとビート成分を取得することを複数回繰り返してもよい。即ち、信号送信システム 1 は、ミキサ部や光コンバイン部は任意の数含むように構成することができる。

換言すれば、電波 R W の周波数ではなく、光信号の周波数に基づいたショット雑音が発生し、雑音マスキング量 Γ が大きい電気信号を電波 R W の形態で送信できれば足りる。即ち、各機能ブロックや各信号路における信号の周波数は、任意である。

[0146] また例えば、上述の実施形態では、図 1、及び図 3 乃至図 8 の光信号を伝送する信号路（例えば、図 1 の信号路 L O 1 A）は、光通信ケーブルによる光信号路で構成されたとしたが、特にこれに限定されない。即ち、光信号を伝送する信号路は、光信号を伝搬（伝送）する経路であれば足りる。例えば、信号路として、大気中や真空中に光信号を伝搬させる、空間伝搬を採用することができる。

[0147] また例えば、上述の実施形態では、光信号を、図 1 の光信号増幅部 1 2 や、図 4 の光コンバイン部 1 2 2 を用いて変換するとしたが、特にこれに限定されない。即ち、光信号の変換の種類は、各種各様の変換の種類を採用できる。例えば、光信号の増幅や、光信号の分岐、光信号のスイッチ（経路の切替）、光信号の伝送路の延長、光信号のコンバインであってよい。

[0148] 以上まとめると、本発明が適用される信号処理装置は、次のようなものであれば足り、各種各様な実施形態をとることができる。

即ち、本発明が適用される信号処理システム（例えば、図 1 の信号送信システム 1）は、

所定データ（例えば、送信対象の所定データ）に基づく多値の状態をとる多値情報（Y-O-O 光通信量子暗号のプロトコルに基づき生成した多値の情報）を、光信号として発生させる光発生手段（例えば、図 1 の光信号発生部

11)と、

前記光信号を、電気信号（例えば、第2電気信号）に変換する光電気変換手段（例えば、図1のO/E変換部13）と、

前記電気信号に変換された前記多値情報を、電波（例えば、図1の電波RW）として送信する電波送信手段（例えば、図1の電波送信部14）と、
を備える信号処理システムであれば足りる。

[0149] このような信号処理システムを採用することで、所定データに基づく多値情報は、光信号の形態に変換される。光信号を電気信号の形態に変換した場合、雑音により、第三者には、電気信号からデータを正しく構築できない。信号処理システムは、第三者にはデータを正しく構築できない電気信号に基づき、電波として送信する。これにより、このような信号処理システムが送信する電波は、第三者にはデータを正しく構築できない。即ち、電波の形態の所定データが、暗号化される。

また、このような信号処理システムにおいて、光信号を傍受して電気信号に変換した第三者であっても、電気信号からデータを正しく構築できない。即ち、光信号の形態の所定データが、暗号化される。

[0150] 前記光発生手段は、

前記多値情報の第1電気信号を発生する多値情報発生手段（例えば、図1のY-O暗号出力部111）と、

前記多値情報の前記第1電気信号を、光信号に変換する電気光変換手段（例えば、図1のE/O変換部112）と、

を有し、

前記光電気変換手段は、前記光信号を、前記第1電気信号とは異なる第2電気信号に変換する、

ことができる。

[0151] このような信号処理システムを採用することで、所定データに基づく多値情報を、電気信号の形態で発生することができる。更に、所定データに基づく多値情報は、電気信号の形態から、光信号の形態に変換される。

[0152] 更に、前記光信号を、変換（例えば、増幅、分岐、スイッチ、延長、コンバイン）する光変換手段（例えば、図1の光信号増幅部12や図4の光コンバイン部122）、

をさらに備え、

前記光電気変換手段は、前記光変換手段により変換された前記光信号を、変換する、

ことができる。

[0153] 光信号は、各種の変換（増幅やコンバイン）により、ノイズが増加する。ノイズが増加した光信号を電気信号に変換した場合、電気信号からデータを正しく構築する難度が増加し、物理層での盗聴の対策の効果が向上する。

[0154] 更に、前記光変換手段は、前記光信号を、前記光信号と比較して周波数の異なる成分を含む光信号に変換し、

前記光電気変換手段は、前記光変換手段により変換された前記光信号を、前記光信号と比較して周波数の高い成分を含まない電気信号に変換する、

ことができる。

[0155] このような信号処理システムを採用することで、光信号を異なる成分を含む光信号に変換し、周波数の異なる成分を含む光信号を第2電気信号に変換する。これにより、例えば、ビート成分である周波数の成分を含む電気信号が、発生する。ビート成分は、基本的に元の周波数の成分と比較して、低い周波数の成分である。また、一般的に、このような信号処理システムは、光信号の周波数が高いほど、物理層での盗聴の対策の効果が向上する即ち、このような信号処理システムは、高い周波数の光信号により物理層での盗聴の対策の効果が向上して、光信号の周波数と比較して低い周波数の電波として送信することができる。

[0156] 更に、前記第2電気信号を、前記第2電気信号と異なる周波数の電気信号に変換する、第2電気信号変換手段（例えば、図7の局部発振部153やミキサ部154）、

をさらに備え、

前記電波送信手段は、前記第2電気信号変換手段により変換された前記第2電気信号を、電波として送信する、
ことができる。

[0157] このような信号処理システムは、光信号を変換した第2電気信号の周波数を、電波として送信する周波数に変換することができる。即ち、信号処理システムは、光信号の周波数において雑音を発生することで、光信号により物理層での盗聴の対策の効果が向上して、電波として送信することができる。

符号の説明

[0158] 1・・・信号送信システム、11・・・光信号発生部、111・・・Y-O暗号出力部、112・・・E/O変換部、12・・・光信号増幅部、13・・・O/E変換部、14・・・電波送信部、2・・・信号受信システム、21・・・電波受信部、22・・・E/O変換部、23・・・光信号増幅部、24・・・O/E変換部、25・・・Y-O暗号入力部、RW・・・電波、121・・・レーザ発生部、122・・・光コンバイン部、131・・・局部発振部、132・・・ミキサ部、133・・・レーザ発生部、134・・・光コンバイン部、141・・・局部発振部、142・・・ミキサ部、151・・・局部発振部、152・・・ミキサ部、153・・・局部発振部、154・・・ミキサ部、161・・・局部発振部、162・・・ミキサ部

請求の範囲

- [請求項1] 所定データに基づく多値の状態をとる多値情報を、光信号として発生させる光発生手段と、
 前記光信号を、電気信号に変換する光電気変換手段と、
 前記電気信号に変換された前記多値情報を、電波として送信する電波送信手段と、
 を備える信号処理システム。
- [請求項2] 前記光発生手段は、
 前記多値情報の第1電気信号を発生する多値情報発生手段と、
 前記多値情報の前記第1電気信号を、光信号に変換する電気光変換手段と、
 を有し、
 前記光電気変換手段は、前記光信号を、前記第1電気信号とは異なる第2電気信号に変換する、
 請求項1に記載の信号処理システム。
- [請求項3] 前記第1電気信号を、前記第1電気信号と比較して周波数の高い成分を含む電気信号に変換する第1電気信号変換手段、
 をさらに備え、
 前記電気光変換手段は、前記第1電気信号変換手段により変換された前記第1電気信号を、光信号に変換する、
 請求項2に記載の信号処理システム。
- [請求項4] 前記光信号を、変換する光変換手段、
 をさらに備え、
 前記光電気変換手段は、前記光変換手段により変換された前記光信号を、変換する、
 請求項2又は3に記載の信号処理システム。
- [請求項5] 前記光変換手段は、前記光信号を、前記光信号と比較して周波数の異なる成分を含む光信号に変換し、

前記光電気変換手段は、前記光変換手段により変換された前記光信号を、前記光信号と比較して周波数の高い成分を含まない電気信号に変換する、

請求項 4 に記載の信号処理システム。

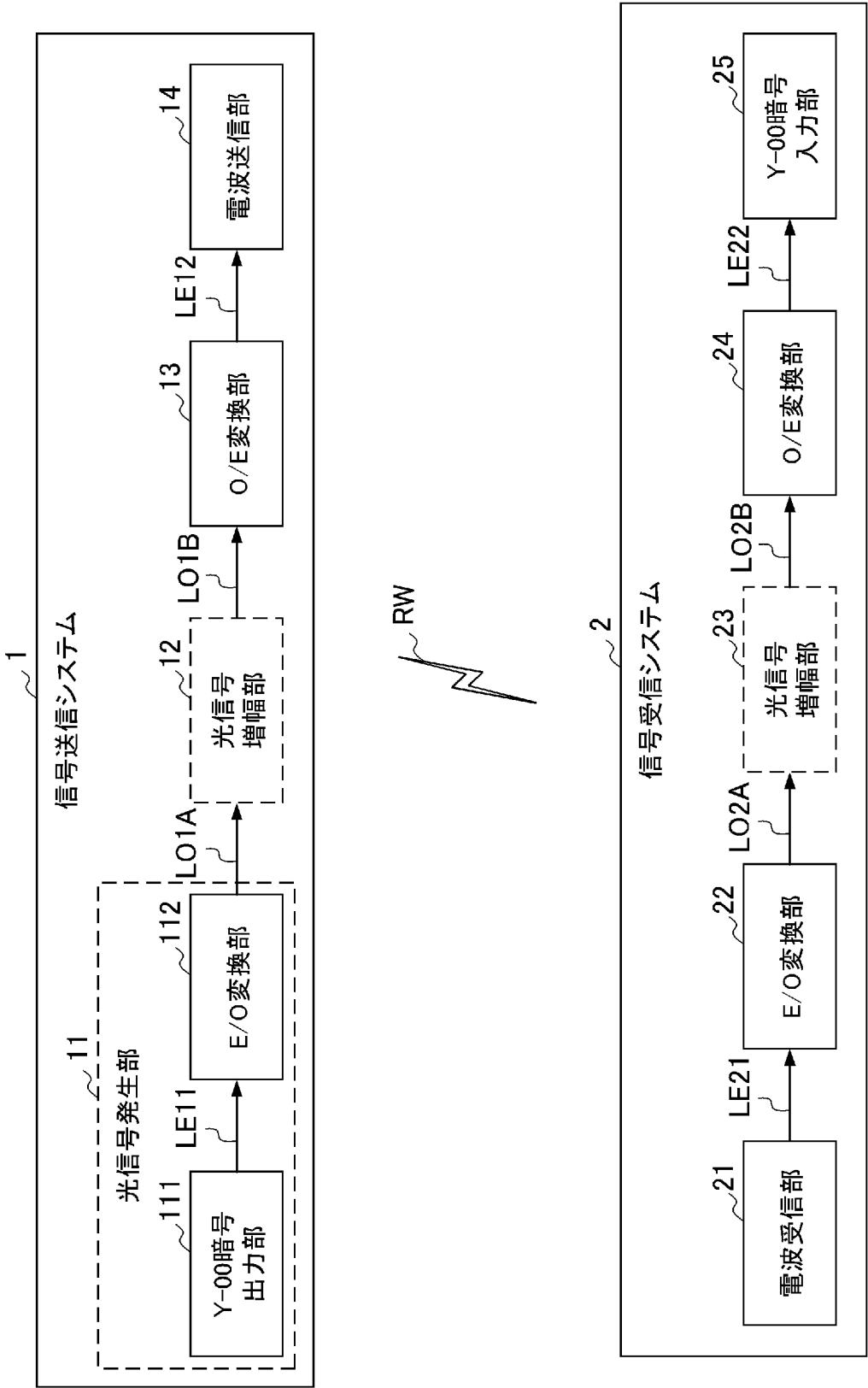
[請求項 6] 前記第 2 電気信号を、前記第 2 電気信号と異なる周波数の電気信号に変換する、第 2 電気信号変換手段、

をさらに備え、

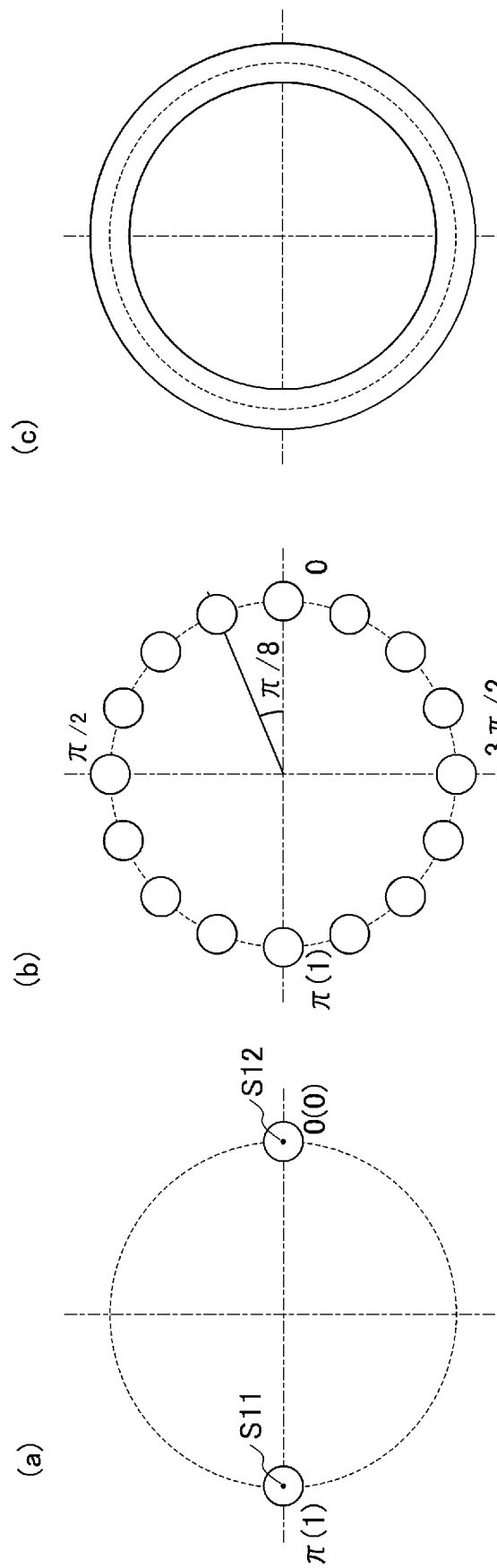
前記電波送信手段は、前記第 2 電気信号変換手段により変換された前記第 2 電気信号を、電波として送信する、

請求項 2 乃至 5 のうち何れか 1 項に記載の信号処理システム。

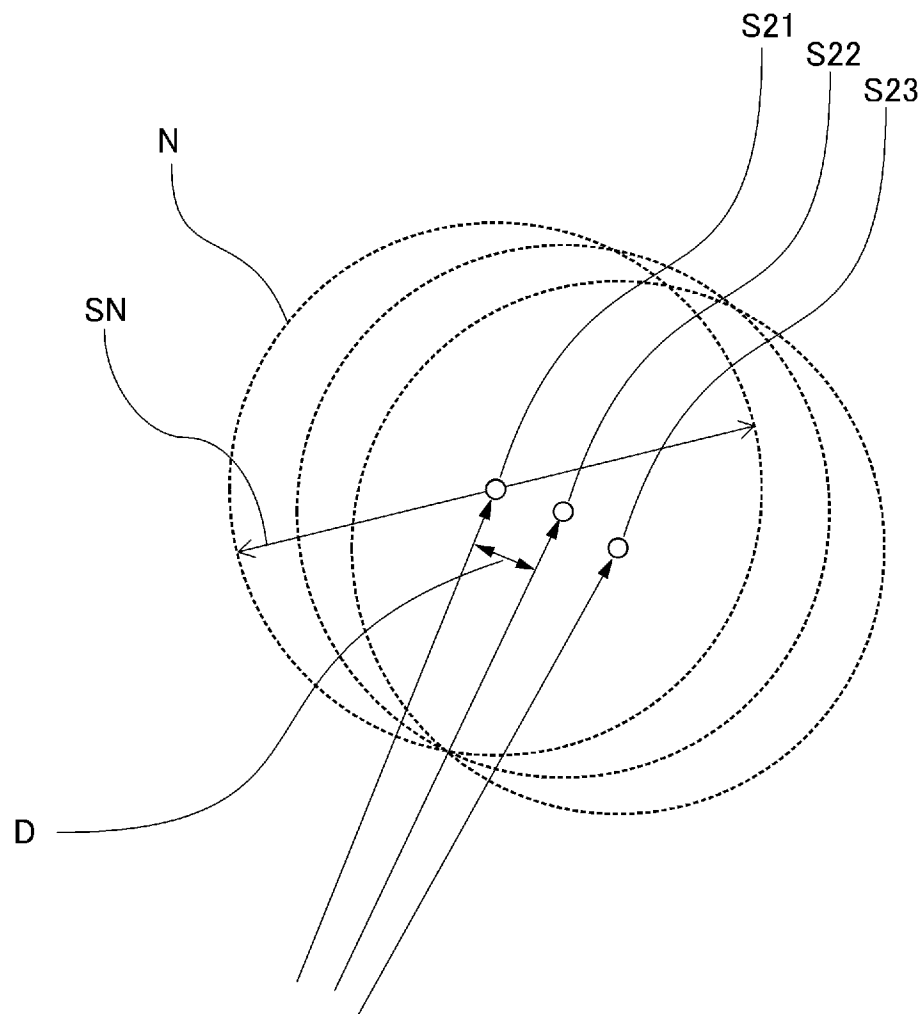
[図1]



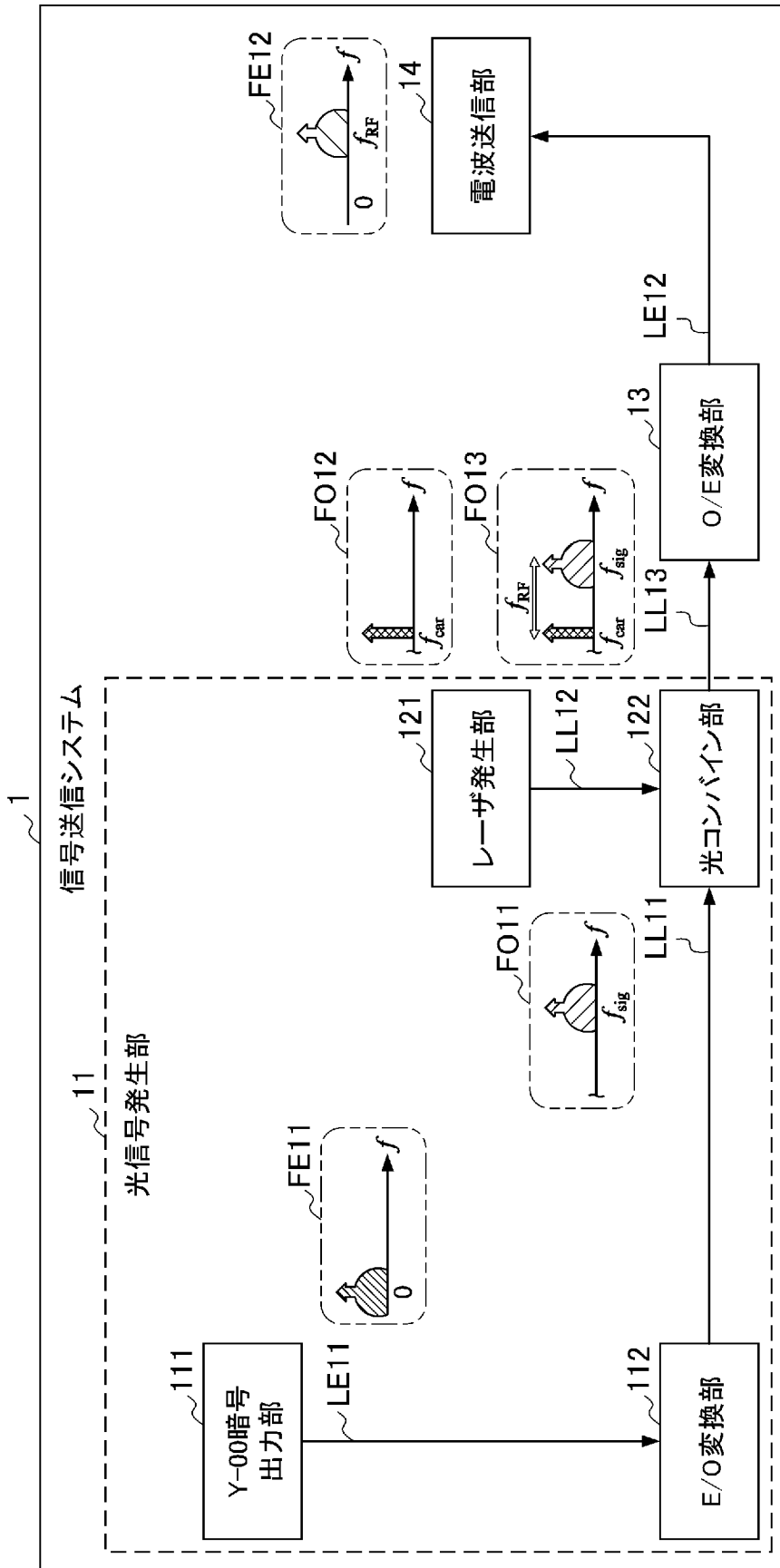
[図2]



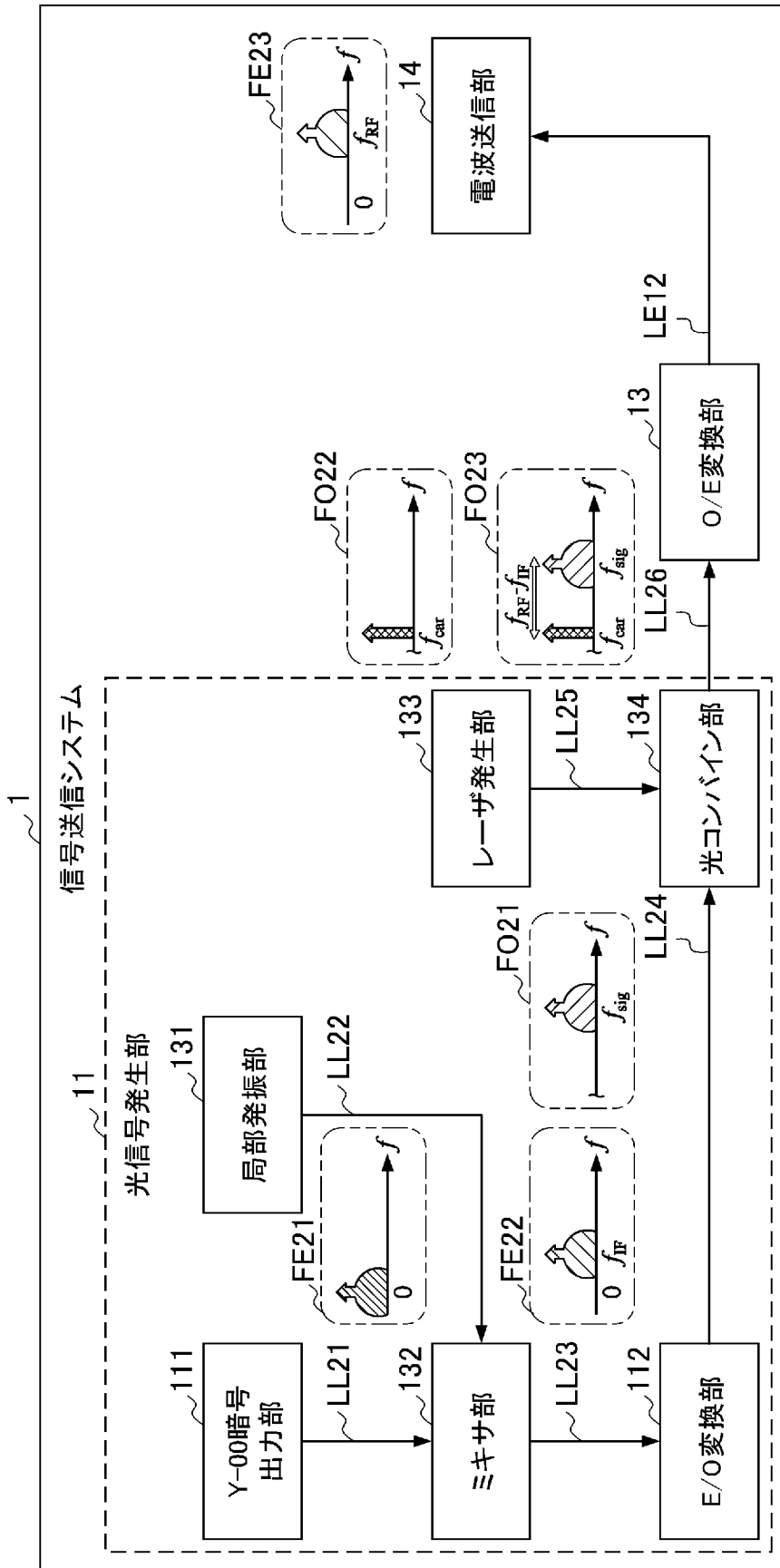
[図3]



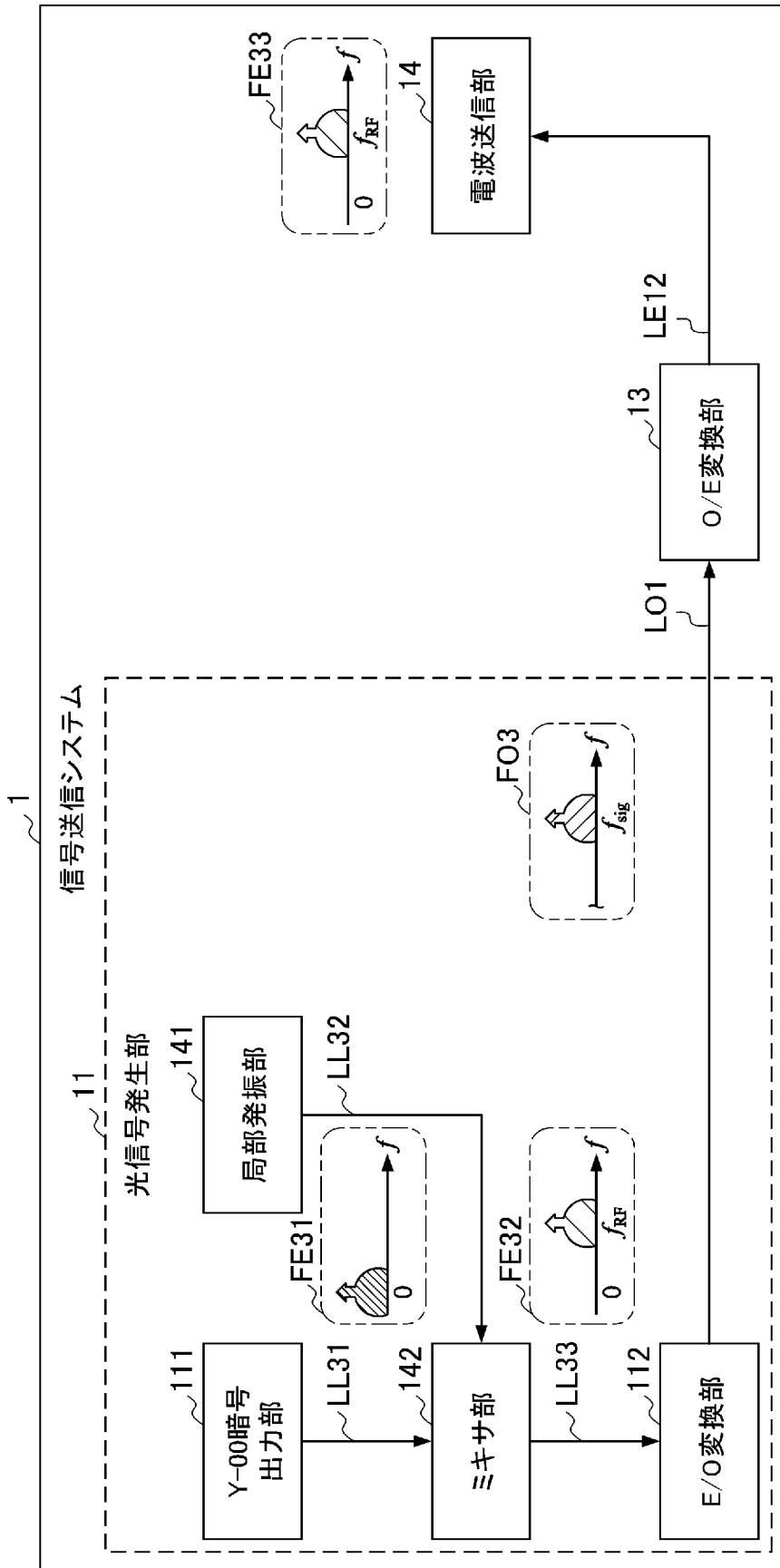
[図4]



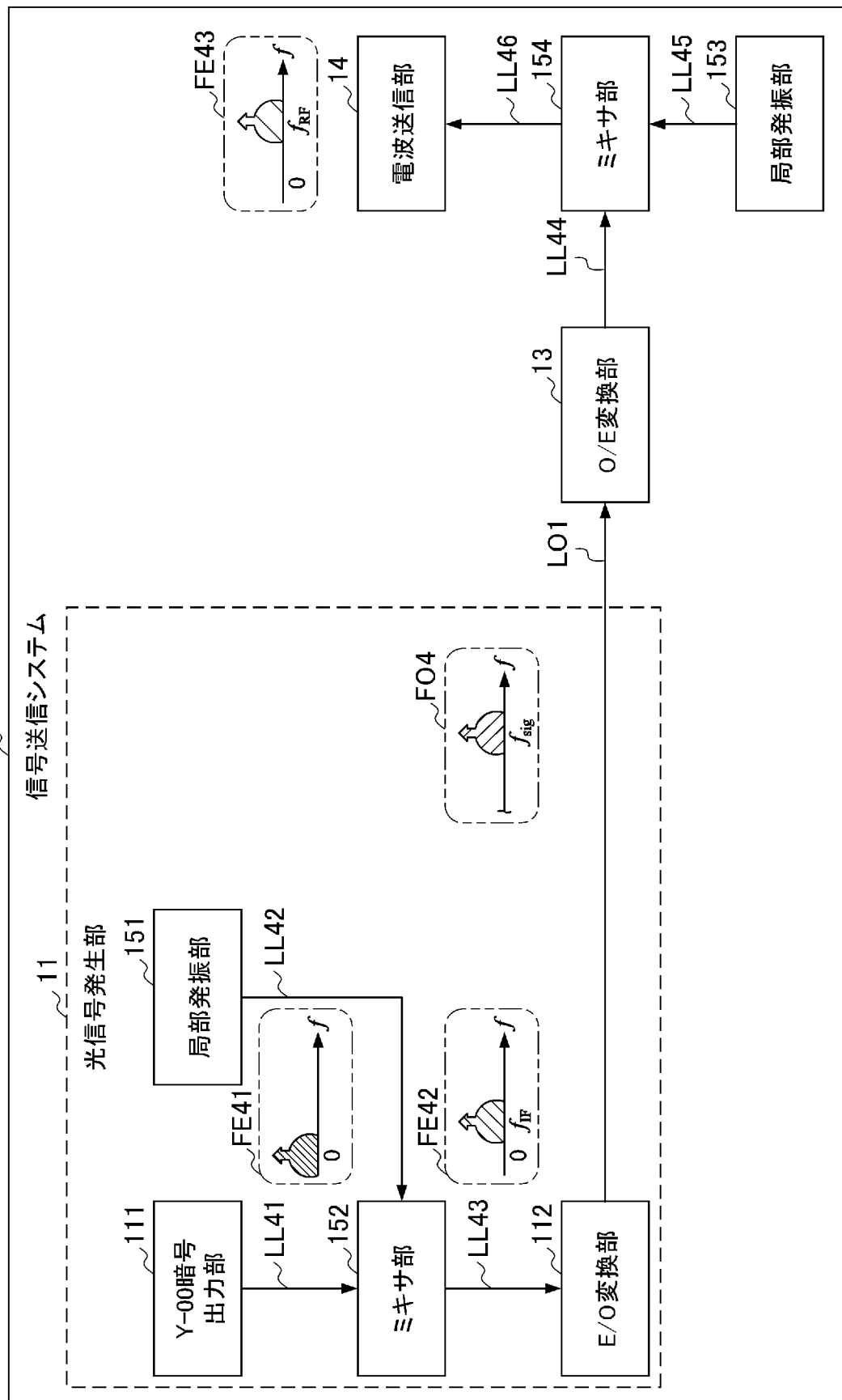
[図5]



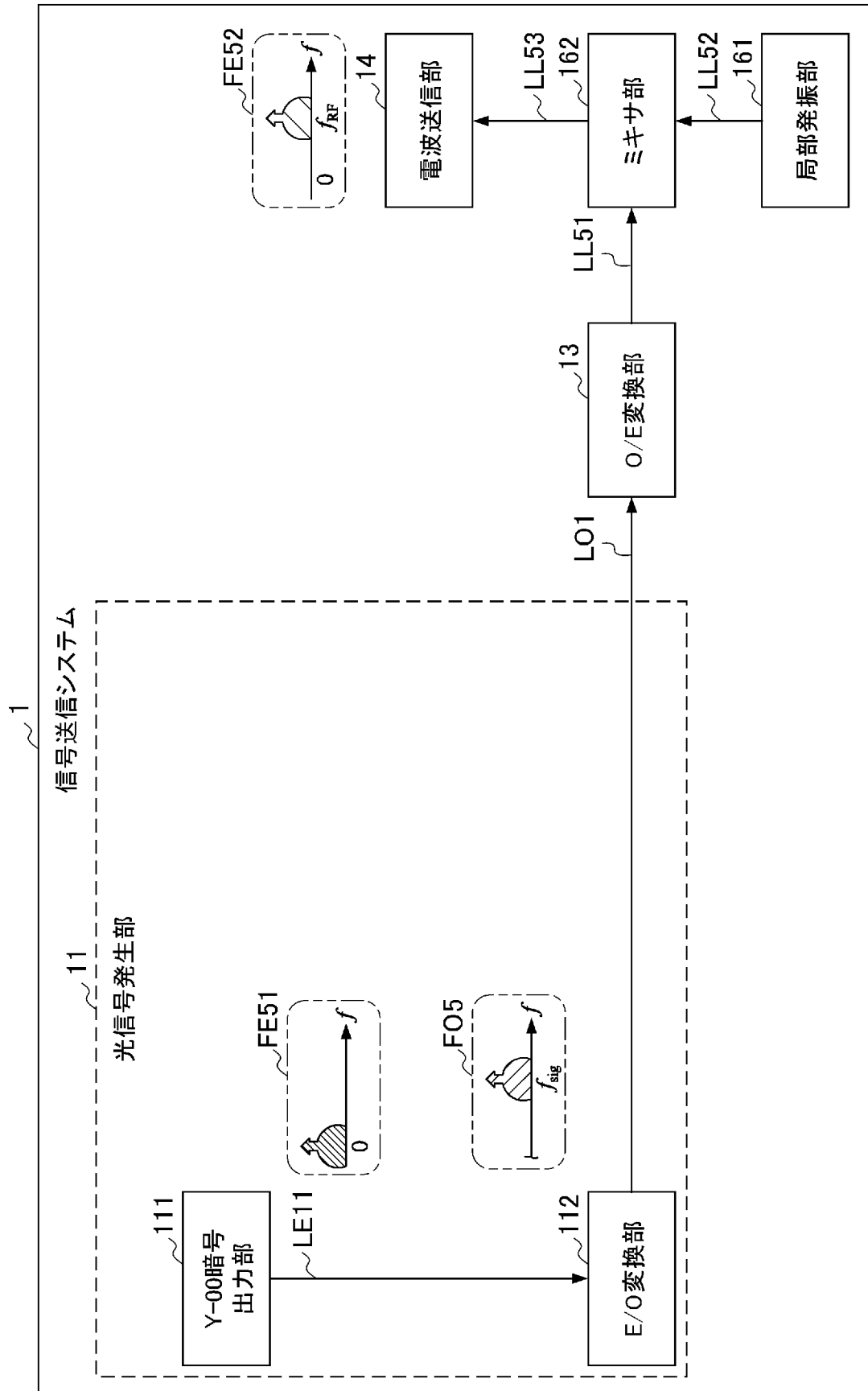
[図6]



[図7]



[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/008530

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. H04K1/02 (2006.01) i

FI: H04K1/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. H04K1/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2020

Registered utility model specifications of Japan 1996-2020

Published registered utility model applications of Japan 1994-2020

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2007-79096 A (MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., LTD.) 29 March 2007, paragraphs [0042]-[0045], entire text, all drawings	1-2, 4 3, 5-6
Y	JP 2010-114662 A (HITACHI INFORMATION & COMMUNICATION ENGINEERING LTD.) 20 May 2010, paragraphs [0001]-[0004]	1-2, 4
A	JP 2006-80720 A (TAMAGAWA GAKUEN) 23 March 2006, entire text, all drawings	1-6

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
01.06.2020

Date of mailing of the international search report
09.06.2020

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/008530

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
T	TANIZAWA, Ken et al., Photonic Generation of Quantum Noise Assisted Cipher at Microwave Frequencies for Secure Wireless Links, 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition(OFC)[online], 13 May 2020 [retrieved on 01 June 2020], Retrieved from the Internet:<URL: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9083118 >, ISBN:978-1-9435-8071-2, entire text, all drawings	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2020/008530

Patent Documents referred to in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2007-79096 A	29.03.2007	(Family: none)	
JP 2010-114662 A	20.05.2010	(Family: none)	
JP 2006-80720 A	23.03.2006	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H04K 1/02(2006.01)i FI: H04K1/02										
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） H04K1/02 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922-1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971-2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996-2020年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994-2020年</td> </tr> </table> 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			日本国実用新案公報	1922-1996年	日本国公開実用新案公報	1971-2020年	日本国実用新案登録公報	1996-2020年	日本国登録実用新案公報	1994-2020年
日本国実用新案公報	1922-1996年									
日本国公開実用新案公報	1971-2020年									
日本国実用新案登録公報	1996-2020年									
日本国登録実用新案公報	1994-2020年									
C. 関連すると認められる文献										
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号								
Y	JP 2007-79096 A（松下電器産業株式会社）29.03.2007（2007-03-29） 段落0042-0045	1-2, 4								
A	全文, 全図	3, 5-6								
Y	JP 2010-114662 A（日立情報通信エンジニアリング株式会社）20.05.2010（2010-05-20） 段落0001-0004	1-2, 4								
A	JP 2006-80720 A（学校法人玉川学園）23.03.2006（2006-03-23） 全文, 全図	1-6								
T	TANIZAWA, Ken et al., Photonic Generation of Quantum Noise Assisted Cipher at Microwave Frequencies for Secure Wireless Links, 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition(OFC) [online], 2020.05.13 [retrieved on 2020.06.01], Retrieved from the Internet:<URL: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9083118>, ISBN:978-1-9435-8071-2 全文, 全図	1-6								
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。										
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献										
国際調査を完了した日 01.06.2020		国際調査報告の発送日 09.06.2020								
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 吉田 歩 5S 1206 電話番号 03-3581-1101 内線 3546								

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/008530

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2007-79096	A	29.03.2007	(ファミリーなし)	
JP	2010-114662	A	20.05.2010	(ファミリーなし)	
JP	2006-80720	A	23.03.2006	(ファミリーなし)	