(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6925645号
(P6925645)
(45)発行日　令和3年8月25日(2021.8.25)　(24)登録日　令和3年8月6日(2021.8.6)

(51)Int.Cl.　F I
H04K 1/02 (2006.01)　H04K 1/02

請求項の数 6　(全 28 頁)

(21)出願番号　特願2019-71981 (P2019-71981)
(22)出願日　平成31年4月4日(2019.4.4)
(65)公開番号　特開2020-170960 (P2020-170960A)
(43)公開日　令和2年10月15日(2020.10.15)
審査請求日　令和2年10月30日(2020.10.30)

早期審査対象出願

(73)特許権者　593171592
学校法人玉川学園
東京都町田市玉川学園六丁目１番１号
(74)代理人　100154748
弁理士　菅沼　和弘
(74)代理人　100207619
弁理士　渡辺　知晴
(72)発明者　谷澤　健
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
(72)発明者　二見　史生
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

審査官　吉田　歩

最終頁に続く

(54)【発明の名称】信号処理システム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

多値の状態をとる多値情報であって、送信対象の所定データが暗号鍵に基づいて生成された当該多値情報をシンボル点として、複数のシンボル点により示される光信号を発生させる光発生手段と、

前記光信号を、受信して電気信号に変換することでショット雑音を付加する光電気変換手段と、

前記光電気変換手段により付加された前記ショット雑音を少なくとも含む雑音の範囲が、前記複数のシンボル点のうち隣接するシンボル点の間の距離と比較して大きい前記電気信号を、前記所定データが暗号化された情報として、電波の形態で送信する電波送信手段と、

前記電波送信手段において前記電気信号を電波の形態で送信可能な状態にさせるように、前記光信号及び前記電気信号のうち少なくとも一方に対して所定の処理を施す変換処理手段と、

を備える信号処理システム。

【請求項２】

前記変換処理手段は、

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】

前記変換処理手段は、

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、

を有し、

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】

前記変換処理手段は、

前記光信号を、変換する光変換手段、

を有し、

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、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】

前記変換処理手段は、

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、

を有し、

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。

【発明の詳細な説明】

【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－００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－００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Ｒ

Ｗを受信して、Ｙ－００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－００光通信量子暗号とは、Ｙ－００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－００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－００暗号出力部１１１と、Ｅ／Ｏ変換部１１２とを備える。
【００１２】
　Ｙ－００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－００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－００暗号出力部１１１は、この所定データを用いて、Ｙ－００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－００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１３に伝送される。
【００１６】
　なお、信号路ＬＯ１Ｂは、信号路ＬＯ１Ａ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１２は、信号路ＬＯ１Ａ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１２を採用することで、Ｅ／Ｏ変換部１１２と、後述するＯ／Ｅ変換部１３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１１２と、後述するＯ／Ｅ変換部１３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１３は、光信号増幅部１２で増幅されて信号路ＬＯＢ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１３は、Ｙ－００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ＬＯ１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１３から出力された第２電気信号は、信号路ＬＥ１２を介して電波送信部１４に伝送される。

第２電気信号は、Ｏ／Ｅ変換部１３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－００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－００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１２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１２は必須な構成要素ではなく、仮に光信号増幅部１２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１１２とＯ／Ｅ変換部１３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１２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１１２とＯ／Ｅ変換部１３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１１２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１２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１２を含まず構成されており、Ｅ／Ｏ変換部１１２と、Ｏ／Ｅ変換部１３とは、直接接続された信号路ＬＯ１Ａ及び信号路ＬＯ１Ｂ（以下、これらをまとめて「信号路ＬＯ１」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１４は、Ｏ／Ｅ変換部１３により第２電気信号に変換されて信号路ＬＥ１２により伝送されてきた暗号信号を、電波ＲＷの形態で送信する。

即ち、電波送信部１４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ＲＷとして送信する。

即ち、電波ＲＷ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ＲＷ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ＲＷの電気信号は、Ｙ－００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ＲＷの電気信号を解読することは、困難である。

【００２１】

以上、Ｙ－００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ＲＷ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－００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－００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ＬＯ２Ｂは、信号路ＬＯ２Ａ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ＬＯ２Ａ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ＬＯ２Ａ及び信号路ＬＯ２Ｂ（以下、これらをまとめて「信号路ＬＯ２」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ＬＯ２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ＬＯ２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－００暗号入力部２５に伝送される。
【００３０】
Ｙ－００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－００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－００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－００暗号入力部２５を近くに設置する場合、電波受信部２１と、Ｙ－００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－００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－００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－００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－００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－００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－００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－００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－００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－００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－００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ＩＱ平面が描画されている。ＩＱ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、ＩＱ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、その信光号を表す点と、ＩＱ平面の原点との間の距離となる。

【００３９】

図２（ａ）は、Ｙ－００光通信量子暗号の理解を容易なものとすべく、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Ｓ１１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Ｓ１２の配置、即ち位相がπの配置となる。

なお、シンボル点Ｓ１１を囲む実線の円は、シンボル点Ｓ１１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Ｓ１２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Ｓ１２を囲む実線の円として示されている。

【００４０】

図２（ｂ）は、Ｙ－００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ＩＱ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、（π／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－００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－００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－００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Ｓ２１乃至Ｓ２３の夫々において、範囲ＳＮ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Ｓ２１及びＳ２２の距離Ｄが、ショット雑音の範囲ＳＮ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Ｓ２２の位置に対応していたものとする。この場合、シンボル点Ｓ２２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Ｓ２１やシンボル点Ｓ２３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Ｓ２２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－００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－００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－００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ＳＮ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－００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－００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、雑音マスキ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ＳＮ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ＳＮ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ＳＮ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ＳＮ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－００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、単位時間当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ν０は、信号の周波数である。また、パワーＰ０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－００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ν０の平方根に比例する。換言すれば、搬送波の周波数ν０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ν０は、２００［ＴＨｚ］（波長はおよそ、１．５５［ｕｍ］）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ν０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ν０は、１０［ＧＨｚ］がある。

【００５５】

ここで、周波数ν０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ν０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Ｐ０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うため、Ｙ－００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－００「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－００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－００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－００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－００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－００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－００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ｆ０＝ｆＲＦ１［Ｈｚ］であるものとして説明する。

【００６５】
まず、Ｙ－００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ｆ０＝０［Ｈｚ］の信号）で発生する。
即ち、例えば、Ｙ－００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ｆ０＝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ｆ０＝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ｆｓｉｇ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ｆｓｉｇの搬送波を、中心周波数ｆ０＝ｆｓｉｇ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ｆ０＝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ｆ０＝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ｆ０＝ｆＲＦ１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ｆ０＝ｆＲＦ２［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ｆ０＝ｆＲＦ１［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ｆ０＝ｆＲＦ２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ｆ０＝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、電気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－００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－００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－００暗号出力部１１１から出力された第１電気信号（中心周波数ｆ０＝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ｆ０＝ｆＲＦ［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、光コンバイン部１２２と、夫々を接続する信号路ＬＬ１１乃至ＬＬ１３とを備える。

【００７４】

Ｙ－００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－００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ｆ０＝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ｆ０＝０［Ｈｚ］の信号であることを示している。

また、グラフＦＥ１１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ｆ０＝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ＦＥ１

１と同様の意味合いを持つものである。

【００７６】

　つまり、グラフＦＥ１１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１１２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ｆ０＝ｆｓｉｇ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ＬＬ１１を介して、光コンバイン部１２２に伝送される。

　なお、Ｅ／Ｏ変換部１１２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、ＩＱ変調器等を組み合わせて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１１２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１１２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ＦＯ１１に示す分布となる。

　グラフＦＯ１１をみると、光信号は、中心周波数ｆ０＝ｆｓｉｇの信号である。また、光信号は、中心周波数ｆ０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ｆ０＝ｆｓｉｇの信号である。

【００７９】

　レーザ発生部１２１は、光信号周波数ｆ＝ｆｓｉｇ－ｆＲＦの単色のレーザ光を発生する。即ち、レーザ発生部１２１は、光信号の中心周波数ｆ０＝ｆｓｉｇから、無線信号として伝送したい周波数ｆ＝ｆＲＦだけ離れた、周波数ｆ＝ｆｃａｒ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ＬＬ１２を介して、光コンバイン部１２２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ＦＯ１２に示す分布となる。

　グラフＦＯ１２をみると、キャリア光は、中心周波数ｆ０＝ｆｃａｒの信号である。また、キャリア光は、中心周波数ｆ０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＝ｆｃａｒ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ＬＬ１１を介して伝送された光信号と、信号路ＬＬ１２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ＬＬ１３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ＦＯ１３に示す分布となる。

　グラフＦＯ１３をみると、合波された光信号は、中心周波数ｆ０＝ｆｃａｒの信号と中心周波数ｆ０＝ｆｓｉｇ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ｆ０＝ｆｓｉｇ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ｆ０＝ｆｓｉｇの信号と、単色の周波数ｆ＝ｆｃａｒ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＝ｆＲＦ（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ＦＥ１２に示す分布となる。
グラフＦＥ１２をみると、第２電気信号は、中心周波数ｆ０＝ｆＲＦの信号である。また、第２電気信号は、中心周波数ｆ０の前後の周波数に分布を持っている。
【００８５】
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。
【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ｆ０＝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ＲＷの周波数である中心周波数ｆ０＝ｆＲＦ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。
【００８８】
なお、Ｅ／Ｏ変換部１１２と光コンバイン部１２２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１２１と光コンバイン部１２２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１２２とＯ／Ｅ変換部１３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１３と電波送信部１４との間には、ＲＦ伝送ケーブル等の伝送媒体に加えて、ｆＲＦ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１３１と、ミキサ部１３２と、レーザ発生部１３３と、光コンバイン部１３４と、信号路ＬＬ２１乃至ＬＬ２６とを備える。
【００９０】
図５の例のＹ－００暗号出力部１１１の機能や構成は、図４の例のＹ－００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ｆＩＦ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＝ｆＩＦ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ｆ０＝ｆＩＦの信号である。また、中間周波数の電気信号は、中心周波数ｆ０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ｆ０＝ｆＩＦ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ｆ０＝ｆｓｉｇ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ＦＯ２１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ＬＬ２４を介して光コンバイン部１３４に伝送される。

【００９５】

レーザ発生部１３３は、光信号周波数ｆ＝ｆｓｉｇ－ｆＲＦ＋ｆＩＦの単色のレーザ光を発生する。即ち、レーザ発生部１２１は、光信号の中心周波数ｆ０＝ｆｓｉｇから、無線信号として伝送したい周波数ｆ＝ｆＲＦと中間周波数ｆＩＦとの差だけ離れた、周波数ｆ＝ｆｃａｒ＝ｆｓｉｇ－ｆＲＦ＋ｆＩＦ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ＬＬ２５を介して、光コンバイン部１３４に伝送される。

【００９６】

レーザ発生部１３３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ＦＯ２３に示す分布となる。

グラフＦＯ２３をみると、キャリア光は、中心周波数ｆ０＝ｆｃａｒの信号である。また、キャリア光は、中心周波数ｆ０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＝ｆｃａｒの信号である。

【００９７】

光コンバイン部１３４は、光信号とキャリア光を合波する。即ち、信号路ＬＬ２４を介して伝送された光信号と、信号路ＬＬ２５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ＬＬ２６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１３４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１３４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ＦＯ２３に示す分布となる。

グラフＦＯ２３をみると、合波された光信号は、中心周波数ｆ０＝ｆｃａｒの信号と中心周波数ｆ０＝ｆｓｉｇ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ｆ０＝ｆｓｉｇ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ｆ０＝ｆｃａｒの信号と、単色の周波数ｆ＝ｆｓｉｇ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＝ｆｃａｒ＝ｆｓｉｇ－ｆＲＦ＋ｆＩＦであるため、周波数変調された中心周波数ｆ０＝ｆｃａｒの信号と、単色の周波数ｆ＝ｆｓｉｇの信号との周波数との差は、ｆＲＦ－ｆＩＦ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＝ｆＲＦ－ｆＩＦ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ｆ０＝ｆＩＦ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ｆＩＦ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＝ｆＲＦ－ｆＩＦであって、中心周波数はｆＩＦだけ足されるので、中心周波数ｆ０＝ｆＲＦ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、ｆＲＦ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ｆ０＝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ｆ０＝ｆＲＦ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。

【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－００暗号出力部１１１の機能や構成は、図４の例のＹ－００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－００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ｆＲＦ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ｆＲＦ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＝ｆＲＦ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ｆ０＝ｆＲＦの信号である。また、中間周波数の電気信号は、中心周波数ｆ０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ｆ０＝ｆＲＦ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ｆ０＝ｆｓｉｇ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＝ｆＲＦ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ｆ０＝ｆＲＦ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ｆＲＦ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、ｆＲＦ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ｆ０＝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ｆ０＝ｆＲＦ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－００暗号出力部１１１の機能や構成は、図４の例のＹ－００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－００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ｆ０＝ｆｓｉｇ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＝ｆＩＦ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ｆ０＝ｆＩＦ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ｆＩＦ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ｆＲＦ－ｆＩＦ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ｆＲＦと第１局部発進周波数の中心周波数ｆ０＝ｆＩＦ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ｆＲＦ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ｆＩＦだけ足された周波数と、中間周波数ｆＲＦ－ｆＩＦに対応する第２局部発振信号とが足された、中心周波数ｆ０＝ｆＲＦ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、ｆＲＦ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１

４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、ｆＲＦ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ｆ０＝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ｆ０＝ｆＲＦ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－００暗号出力部１１１の機能や構成は、図４の例のＹ－００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－００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ｆ０＝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ｆＲＦ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ｆＲＦ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ｆＲＦ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ｆ０＝０［Ｈｚ］と、中間周波数ｆＲＦに対応する局部発振信号とが足された、中心周波数ｆ０＝ｆＲＦ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。

【０１３８】

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、ｆＲＦ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ＲＷ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ＲＷの形態で送信し、信号受信システム２は、この電波ＲＷ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ＲＷの送信に係る構成と電波ＲＷの受信に係る構成の両方を備えて、電波ＲＷ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ＲＷ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－００暗号出力部１１１は、Ｙ－００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－００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し、雑音マスキング量Γが大きい電気信号を電波ＲＷ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ＬＯ１Ａ）は、光通信ケーブルによる光信号路で構成されるとしたが、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１２や、図４の光コンバイン部１２２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－００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－００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】

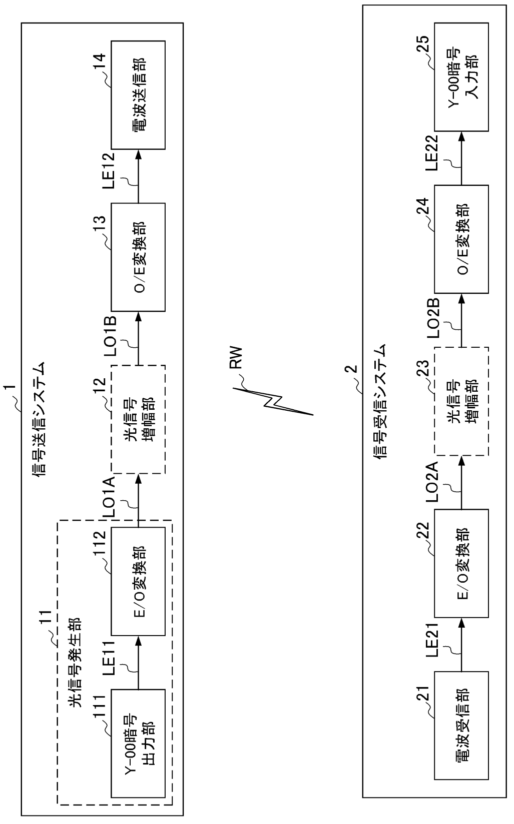
このような信号処理システムは、光信号を変換した第２電気信号の周波数を、電波として送信する周波数に変換することができる。即ち、信号処理システムは、光信号の周波数において雑音を発生することで、光信号により物理層での盗聴の対策の効果が向上して、電波として送信することができる。

【符号の説明】

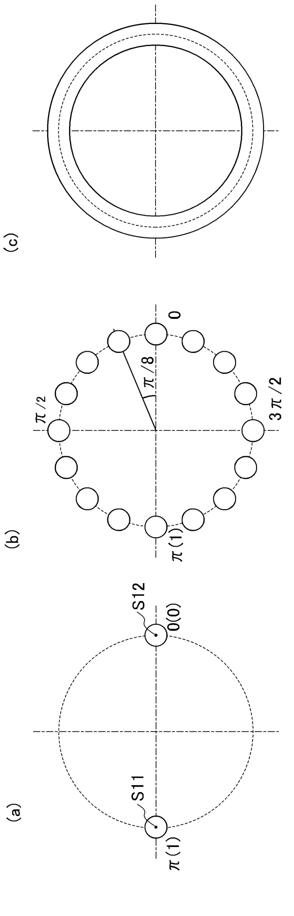
【０１５８】

１・・・信号送信システム、１１・・・光信号発生部、１１１・・・Ｙ－００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－００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

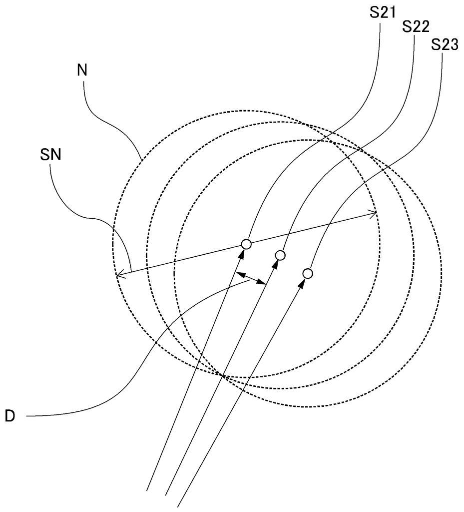
【図１】



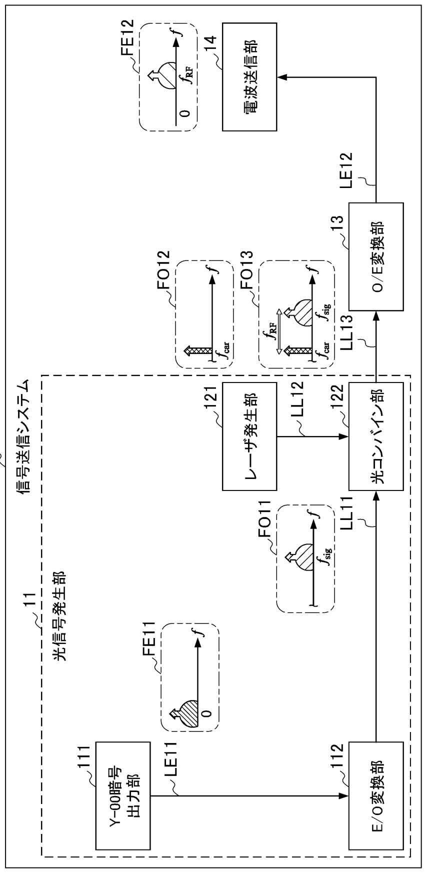
【図２】



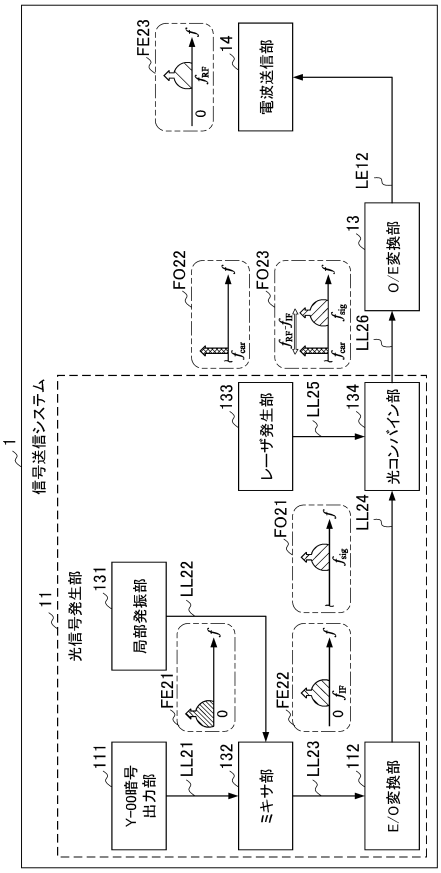
【図３】


S21
S22
S23
N
SN
D

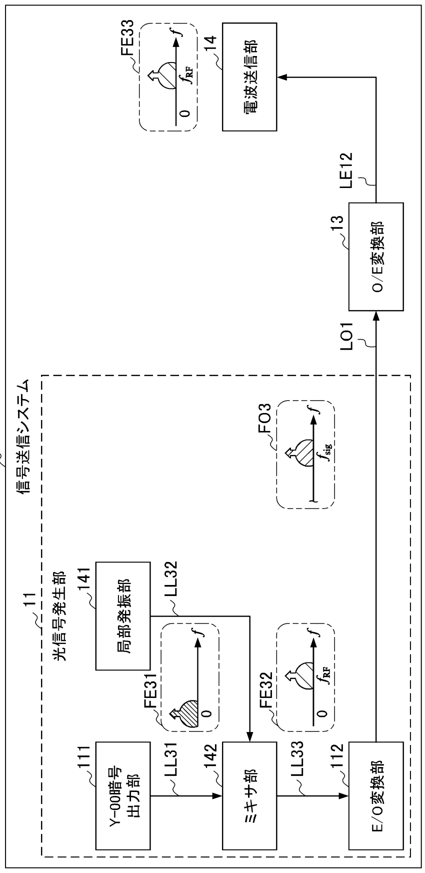
【図４】


1
信号送信システム
11
光信号発生部
111
Y-00暗号出力部
LE11
FE11
112
E/O変換部
FO11
LL11
121
レーザ発生部
LL12
122
光コンバイン部
FO12
FO13
LL13
13
O/E変換部
LE12
FE12
14
電波送信部

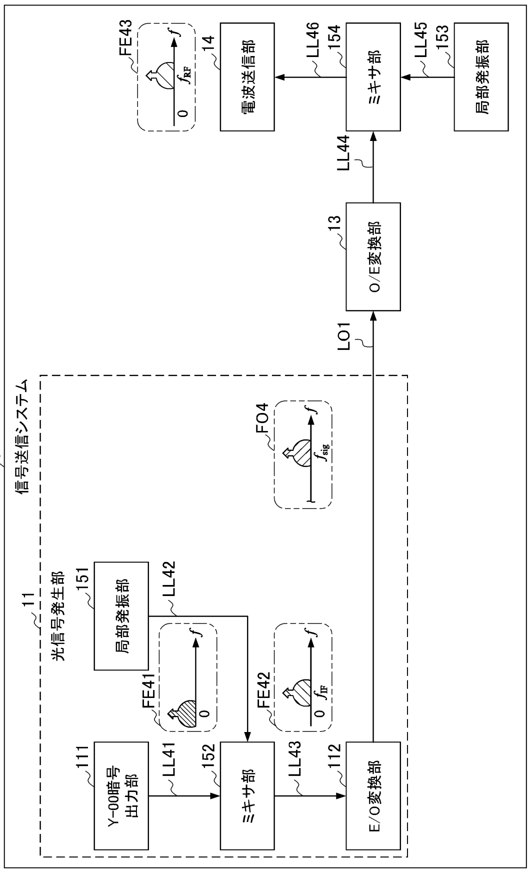
【図５】


1
信号送信システム
11
光信号発生部
111
Y-00暗号出力部
LL21
FE21
131
局部発振部
LL22
132
ミキサ部
LL23
FE22
112
E/O変換部
FO21
LL24
133
レーザ発生部
LL25
134
光コンバイン部
FO22
FO23
LL26
13
O/E変換部
LE12
FE23
14
電波送信部

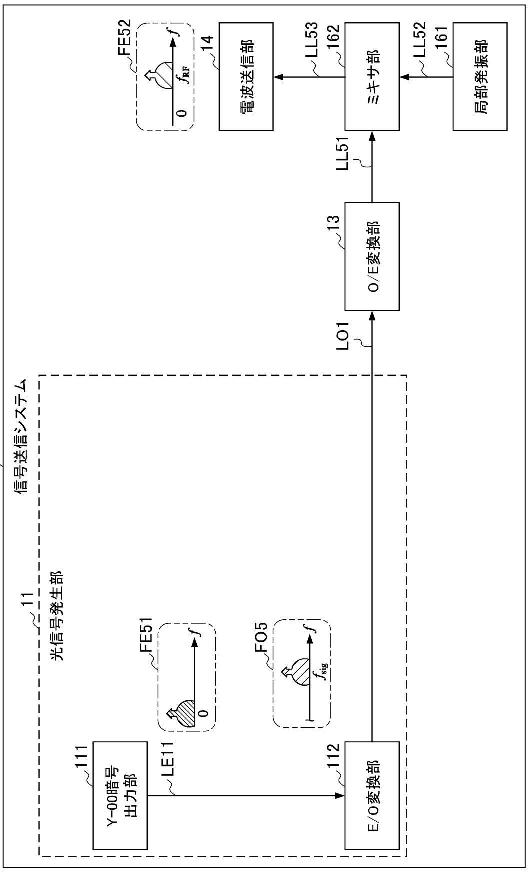
【図６】


1
信号送信システム
11
光信号発生部
111
Y-00暗号出力部
LL31
FE31
141
局部発振部
LL32
142
ミキサ部
LL33
FE32
112
E/O変換部
FO3
LO1
13
O/E変換部
LE12
FE33
14
電波送信部

【図７】


1
信号送信システム
11
光信号発生部
111
Y-00暗号出力部
LL41
151
局部発振部
LL42
FE41
152
ミキサ部
LL43
FE42
112
E/O変換部
FO4
LO1
13
O/E変換部
LL44
154
ミキサ部
LL45
153
局部発振部
LL46
14
電波送信部
FE43

【図８】


1
信号送信システム
11
光信号発生部
111
Y-00暗号出力部
LE11
FE51
FO5
112
E/O変換部
LO1
13
O/E変換部
LL51
162
ミキサ部
LL52
161
局部発振部
LL53
14
電波送信部
FE52

フロントページの続き

(56)参考文献　特開２００７－０７９０９６（ＪＰ，Ａ）
特開２０１０－１１４６６２（ＪＰ，Ａ）
特開２０１２－０８５０２８（ＪＰ，Ａ）
特開２０１２－０５８０１９（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－０８０７２０（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
ＨＯ４Ｋ　　　１／０２