

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **238571**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **423300**

(22) Data zgłoszenia: **30.10.2017**

(51) Int.Cl.

H04B 10/00 (2013.01)

H04B 10/60 (2013.01)

H04B 10/67 (2013.01)

H04B 10/532 (2013.01)

G02B 27/26 (2006.01)

(54) **Sposób odbierania informacji przy użyciu bardzo słabych impulsów światła
oraz odbiornik do odbierania informacji przesyłanej
przy użyciu bardzo słabych impulsów światła**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

06.05.2019 BUP 10/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

06.09.2021 WUP 23/21

(73) Uprawniony z patentu:

UNIwersytet Warszawski, Warszawa, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

KONRAD BANASZEK, Warszawa, PL

MICHAŁ JACHURA, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. SAMOJŁOWICZ CEZARY

PL 238571 B1

Opis wynalazku

Dziedzina techniki

Przedmiotem wynalazku jest sposób odbierania informacji przy użyciu bardzo słabych impulsów światła oraz odbiornik do odbierania informacji przesyłanych przy użyciu bardzo słabych impulsów. Wynalazek dotyczy również układu składającego się z co najmniej dwóch modułów do przesyłania informacji na duże odległości. Wynalazek znajduje zastosowanie w szeroko rozumianej komunikacji satelitarnej, telekomunikacji, optyce oraz przesyłaniu słabych impulsów elektromagnetycznych na duże odległości, w tym głęboką przestrzeń kosmiczną.

Stan techniki

W stanie techniki znaną i jedną z najczęściej stosowanych technik modulacji sygnału w komunikacji satelitarnej jest modulacja położenia impulsu (ang. *Pulse Position Modulation*, PPM). W związku z niejednorodnym rozkładem mocy optycznej w ramce pojedynczego symbolu PPM, technika ta wymaga bardzo wysokiej mocy chwilowej lasera umieszczonego w nadajniku. Standardowa architektura nadajnika satelitarnego realizuje modulację PPM poprzez wycinanie z lasera pracy ciągłej impulsów optycznych za pomocą elektro-optycznego modulatora amplitudy oraz późniejsze wzmacnianie impulsów przy użyciu np. erbowych wzmacniaczy optycznych [D. O. Caplan, „Laser communication transmitter and receiver design”, *J. Opt. Fib. Commun. Rep.*, **2007**, 4, 225–362]. Szybkość transmisji w takim rozwiązaniu sięgać może kilku megabitów na sekundę i ograniczona jest głównie przez szybkość używanego modulatora amplitudy. Ze względu na niską moc chwilową rzędu kilku watów, rozwiązanie to umożliwia optyczne przesyłanie informacji jedynie na stosunkowo krótkie odległości, takie jak Ziemia-niska orbita okołoziemska, Ziemia-orbita geostacjonarna lub Ziemia-Księżyc [M. Toyoshima, i inni, „Current status of research and development on space laser communications technologies and future plans in NICT”, **2015** IEEE ICSOS, New Orleans, LA, strony 1–5, (październik 2015)].

Do realizacji protokołu PPM na odległościach umożliwiających komunikację z głęboką przestrzenią kosmiczną (ang. *deep-space*) wymagane są chwilowe moce optyczne rzędu kilowatów (10^3 W). W obecnie stosowanych rozwiązaniach osiąga się je poprzez modulacje dobroci wnęki rezonansowej lasera (ang. *Q-switching*) [H. Hemmati, *Deep-Space Optical Communication*, Rozdział 5: Flight Transceiver, Wiley, październik 2005]. Niestety częstotliwość modulacji wnęki jest ograniczona do kilkuset kiloherców, co znacząco obniża osiągalną prędkość transmisji. Dodatkowo, wydajność konwersji mocy elektrycznej na optyczną w tym rozwiązaniu jest niewielka i w przypadku najbardziej wydajnych systemów wynosi 10–15%. Z wysokimi mocami chwilowymi po stronie nadajnika wiążą się również problemy z odprowadzaniem ciepła, jak również niebezpieczeństwo uszkodzenia światłowodowych elementów optycznych.

Obiecującym rozwiązaniem pozwalającym na obniżenie mocy chwilowej lasera umieszczonego w nadajniku jest użycie strukturyzowanych odbiorników optycznych. W rozwiązaniu tym energia optyczna jest rozdzielana na szereg impulsów, które są następnie łączone w odbiorniku gdzie następuje pomiar. Gdy moc odbieranych sygnałów staje się bardzo mała, pojawia się tzw. zjawisko *superaddytywności* polegające na tym, że łączny pomiar kilku impulsów niesie ze sobą więcej informacji niż gdyby wszystkie impulsy mierzone były osobno.

Kanoniczny przykład strukturyzowanego odbiornika został opisany w amerykańskim dokumencie patentowym [US20120177385A], w którym zaproponowano układ liniowej optyki o n portach wejściowych i n portach wyjściowych umożliwiający konwersję sekwencji impulsów optycznych o określonych relacjach fazowych na przestrzenny format PPM. W przeciwieństwie do zaproponowanego rozwiązania układ ten wymaga, aby każdy z impulsów optycznych tworzących sekwencję wchodził do innego portu wejściowego. Podobnie, każdy z wyjściowych symboli PPM pojawia się na jednym z „ n ” wyjściowych portów zamiast w jednym jak w zaproponowanym rozwiązaniu. Gdyby wszystkie impulsy propagowały się współliniowo rozwiązanie przedstawione w dokumencie wymagałoby dodatkowo aktywnego przekierowywania poszczególnych impulsów wchodzących oraz wychodzących z urządzenia.

Znany jest również amerykański dokument patentowy [US14981175A], w którym transmisja informacji realizowana jest za pomocą modulacji fazy lasera pracy ciągłej, wzmacnianego następnie zgodnie z architekturą opisywaną na początku rozdziału. W przeciwieństwie do zaproponowanego rozwiązania, w tym dokumencie patentowym każdy z modulowanych fragmentów sygnału rejestrowany jest oddzielnie i nie następuje późniejsza konwersja modulowanego fazowo sygnału na format PPM.

W stanie techniki znane są niezwykle liczne przykłady systemów korzystających z pasma radiowego lub mikrofalowego do komunikacji satelitarnej [np. US3710255A, US13116403A]. Ten zakres promieniowania elektromagnetycznego (0,5 GHz–20 GHz) jest obecnie wykorzystywany zarówno w komunikacji Ziemia-Orbita, jak i w misjach realizowanych przez sondy kosmiczne, czy łaziki marsjańskie. Rosnące zapotrzebowanie na szybkość przesyłu danych gromadzonych przez urządzenia eksplorujące przestrzeń kosmiczną spowodowało rosnące zainteresowanie komunikacją optyczną, która uważana jest za przyszłość komunikacji satelitarnej [D. Powell, „Lasers boost space communication” *Nature*, **2013**, 499, 266–267]. Głównym powodem takiego zainteresowania jest znacznie większe pasmo transmisji oferowane przez komunikację optyczną, które zgodnie z twierdzeniem Shannona-Hartleya [E. Desurvire, „Classical and quantum information theory” Cambridge University Press, **2009**] pozwala na zwiększenie szybkości przesyłu danych o kilka rzędów wielkości.

Problem ze stanu techniki

Nadrzędnym problemem optycznej komunikacji satelitarnej na dużych odległościach jest efektywne wytwarzanie sygnałów zmodulowanych w formacie PPM o bardzo dużej mocy chwilowej. Silne impulsy PPM nie mogą wydajnie być wygenerowane za pomocą amplitudowej modulacji lasera pracy ciągłej, zaś dostępne lasery impulsowe cechują się niską wydajnością konwersji mocy elektrycznej na optyczną.

Rozwiązanie problemu

Wynalazek opisany w niniejszym zgłoszeniu patentowym dotyczy przesyłania informacji przy użyciu polaryzacyjno-fazowych sekwencji impulsów generowanych za pomocą modulowanego lasera pracy ciągłej, które są konwertowane w odbiorniku na standardowy format modulacji położenia impulsu. Dzięki przebiegającej wieloetapowo w odbiorniku interferencji optycznej energia niesiona przez sekwencję impulsów jest koncentrowana w pojedynczym impulsie. Pozwala to na zwiększenie stosunku optycznej mocy chwilowej do mocy średniej w transmisji informacji optycznej na duże odległości, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności konwersji energii elektrycznej na optyczną wynikającej z użycia lasera pracy ciągłej.

Ujawnienie istoty wynalazku

Wynalazek obejmuje sposób odbierania informacji przy użyciu bardzo słabych impulsów światła, w którym w odbiorniku impuls światła posiadający co najmniej dwie różne polaryzacje rozdziela się na co najmniej dwa sygnały optyczne o różnych polaryzacjach, następnie sygnał o jednej z rozdzielonych polaryzacji opóźnia się względem sygnału optycznego o innej polaryzacji, po czym sygnały łączą się ze sobą i na skutek interferencji ulegają wzmocnieniu, charakteryzujący się tym, że w którym przed rozdzieleniem co najmniej jednego impulsu światła o co najmniej dwóch różnych polaryzacjach z sekwencji impulsów obraca się jego polaryzację przy użyciu modulatora polaryzacji (PoIM) niezależnie od sekwencji wejściowej o $+90^\circ$ lub -90° , a następnie sygnały rejestruje się na detektorze.

Korzystnie po rozdzieleniu impulsu światła posiadającego co najmniej dwie różne polaryzacje na co najmniej dwa sygnały optyczne obraca się ich polaryzację.

Korzystnie rozdzielone sygnały o co najmniej dwóch różnych polaryzacjach łączą się, a następnie obraca się ich polaryzację.

Wynalazek obejmuje także odbiornik do odbierania informacji przy użyciu bardzo słabych impulsów światła, który zawiera wejście, elementy optyczne i detektor, który obejmuje co najmniej jeden moduł (T), który zawiera co najmniej jeden element rozdzielający polaryzację, element o różnej drodze optycznej dla każdej z rozdzielonych polaryzacji, oraz płytkę obracającą polaryzację, przy czym część sygnału optycznego przebiega krótszą, a część dłuższą drogą optyczną, charakteryzujący się tym, że element o różnej drodze optycznej dla każdej z rozdzielonych polaryzacji, znajduje się pomiędzy dwoma kostkami rozdzielającymi polaryzację (PBS), a moduł (T) zawiera co najmniej jeden modulator polaryzacji (PoIM).

Korzystnie płytką obracającą polaryzację jest płytka półfalowa (HWP), która obraca polaryzację o 45° lub płytka ćwierćfalowa (QWP).

Korzystnie na wyjściu z układu odbiornika umieszczony jest detektor pojedynczych fotonów do detekcji impulsu optycznego.

Zalety wynalazku

Niniejszy wynalazek pozwala na efektywne zwiększenie stosunku mocy chwilowej do mocy średniej w urządzeniu odbiorczym dla komunikacji optycznej przy użyciu promieniowania laserowego, zachowując wysoką wydajność konwersji energii elektrycznej na optyczną w nadajniku.

Możliwe obszary wykorzystania wynalazku

Niniejszy wynalazek znajduje zastosowanie w przesyłaniu słabych sygnałów na duże odległości, np. w sektorze kosmicznym, w systemach łączności satelitarnej (do transmisji danych z satelity do odbiornika naziemnego), telekomunikacji oraz optyce i innych obszarach tematycznie powiązanych.

Korzystny przykład wykonania wynalazku

Wynalazek zostanie teraz bliżej przedstawiony w korzystnym przykładzie wykonania, z odniesieniem do załączonego rysunku, na którym:

Fig. 1 przedstawia konwersję sekwencji impulsów optycznych o odpowiednio dobranych polaryzacjach i fazach do pojedynczego impulsu optycznego realizowaną za pomocą układu optyki liniowej złożonej z kostek rozdzielających polaryzację (PBS), płytek półfalowych obracających polaryzację o 45° (HWP) oraz optycznych linii opóźniających,

Fig. 2 przedstawia sposób kodowania informacji w komunikacji za pomocą czasu wysłania sekwencji impulsów optycznych o odpowiednio dobranych fazach i polaryzacjach,

Fig. 3 przedstawia aktywny odbiornik optyczny konwertujący słowa kodowe Hadamarda o długości 2^m składające się z symboli BPSK o fazie ± 1 do formatu PPM rzędu 2^m ,

Fig. 4 przedstawia przykładową transformację poszczególnych słów kodowych Hadamarda po przejściu przez kolejne moduły aktywnego odbiornika,

Fig. 5. przedstawia pojedynczy moduł aktywnego odbiornika skonfigurowany dla opóźnienia „T”. PolM, modulator polaryzacji; PBS, kostka dzieląca polaryzację; HWP, płytka półfalowa. Objaśnienia ilustrują transformację przykładowej sekwencji Hadamarda dla $T = 2\tau$.

W niniejszym opisie stosowane terminy mają następujące znaczenia. Niezdefiniowane terminy w niniejszym dokumencie posiadają znaczenia rozumiane przez specjalistę w dziedzinie w świetle posiadanej najlepszej wiedzy, niniejszego ujawnienia i kontekstu opisu zgłoszenia patentowego. Termin „BPSK” oznacza najprostszą formę modulacji PSK (skrót z ang. *Phase Shift Keying*), w której faza może przyjmować jedną z dwóch wartości przesuniętych względem siebie o 180° reprezentując logiczne „0” lub „1” (skrót z ang. *Binary Phase Shift Keying*).

Termin „guard-time” oznacza przedział ochrony równy całkowitemu czasowi trwania sekwencji impulsów, którymi oddzielone są poszczególne ramki sygnału. Przedział ochronny wykorzystywany jest do synchronizacji czasowej nadajnika i detektora, przez co jest on nieodzownym i standardowym elementem w modulacji położenia impulsu. Dla porównania i lepszego zrozumienia patrz Fig. 2.

Termin „QWP” oznacza płytkę ćwierćfalową, po przejściu przez którą światło może zmienić swoją polaryzację. Na drodze równej grubości płytki światło o kierunku polaryzacji zgodnym z kierunkiem osi szybkiej wyprzedza światło o kierunku polaryzacji zgodnym z kierunkiem osi wolnej o ćwierć długości fali (skrót z ang. *Quarter-Wave Plate*).

Termin „HWP” oznacza płytki półfalowe obracające polaryzację o 45° (skrót z ang. *Half-Wave Plate*).

Termin „PBS” oznacza kostki rozdzielające polaryzację (skrót z ang. *Polarization Beam-Splitter*).

Termin „PPM” oznacza rodzaj modulacji cyfrowej sygnału analogowego (skrót z ang. *Pulse Position Modulation*). Modulacja położenia impulsu następuje proporcjonalnie do wartości chwilowej sygnału analogowego przez przesunięcie impulsu w stosunku do pozycji referencyjnej.

Termin „widzialność” odnosi się do widzialności interferencji opisującej interferencję sygnałów optycznych. Widzialność interferencji zdefiniowana jest jako $(I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$, gdzie I_{max} to maksymalna wartość natężenia sygnału po interferencji optycznej (w tzw. jasnym prążku), zaś I_{min} to minimalna wartość natężenia sygnału po interferencji optycznej (w tzw. ciemnym prążku). Gdy wiązki optyczne są idealnie spójne, widzialność interferencji przyjmuje wartość 1, natomiast gdy wiązki są zupełnie niespójne widzialność interferencji przyjmuje wartość 0.

Przykłady wykonania wynalazku

Poniższe przykłady zostały umieszczone jedynie w celu zilustrowania wynalazku oraz wyjaśnienia poszczególnych jego aspektów, a nie w celu jego ograniczenia i nie powinny być utożsamiane z całym jego zakresem, który zdefiniowano w załączonych zastrzeżeniach.

W przykładowej realizacji wynalazku moc optyczna sygnału jest rozłożona na sekwencję impulsów, które poprzez konstruktywną interferencję składają się po stronie odbiorcy w pojedynczy impuls przy użyciu odpowiednio zaprojektowanego strukturyzowanego odbiornika. Konwersja impulsów do pojedynczego impulsu ma miejsce w układzie przedstawionym na Fig. 1.

Każdy z modułów „ T ” układu przedstawionego na Fig. 1 opóźnia w czasie impulsy spolaryzowane poziomo względem impulsów spolaryzowanych pionowo, nakładając je na siebie. Po opuszczeniu modułu zinterferowane światło tworzy nową sekwencję o dwukrotnie zmniejszonej liczbie impulsów, spolaryzowanych pod kątem $\pm 45^\circ$. Następnie ich polaryzacja obracana jest o 45° przy użyciu płytki półfalowej tak, aby wchodząc do kolejnego modułu impulsy znów były spolaryzowane w kierunkach poziomym i pionowym. Po zastosowaniu odpowiedniej liczby modułów cała energia niesiona przez sekwencję impulsów optycznych skumulowana jest w pojedynczym impulsie, który dzięki wysokiej mocy jest łatwy do zarejestrowania np. za pomocą fotodiody lawinowej (ang. *avalanche photo diode*). Modulacja położenia impulsu, przy użyciu której kodowana jest transmitowana informacja, realizowana jest poprzez przesuwanie w czasie całej sekwencji impulsów, co zostało zilustrowane na Fig. 2. W celu uniknięcia czasowego nachodzenia na siebie sekwencji impulsów, poszczególne ramki sygnału są oddzielone przedziałem ochronnym (ang. *guard-time*) równym całkowitemu czasowi trwania sekwencji impulsów. Przedział ochronny wykorzystywany jest do synchronizacji czasowej nadajnika i detektora, w związku z czym jest on nieodzownym i standardowym elementem w modulacji położenia impulsu.

PRZYKŁAD 1

Pasywny układ przesyłania informacji

Pierwszy zaproponowany przykład realizacji wynalazku pozwala na zmniejszenie stosunku optycznej mocy chwilowej do mocy średniej po stronie nadajnika i polega na generacji fazowo-polaryzacyjnej sekwencji impulsów rozciągającej się w czasie na wszystkie możliwe położenia impulsu PPM. Odpowiedni dobór fazy i polaryzacji poszczególnych impulsów pozwala na konwersję sekwencji na pojedynczy impuls kodujący informację w formacie PPM, przy użyciu układu optycznego składającego się wyłącznie z pasywnych elementów.

Układ konwertujący sekwencję 2^m impulsów dla $m = 4$ został przedstawiony na Fig. 1. Konwersja impulsów odbywa się w połączonych szeregowo modułach (oznaczonych jako szare kwadraty) opisywanych opóźnieniem czasowym „ T ”. Odbiornik składa się z „ m ” modułów o malejącym opóźnieniu czasowym $2^{m-1}\tau, \dots, 2\tau, 1\tau$, gdzie τ oznacza czas trwania pojedynczego okna PPM. Po wejściu do modułu polaryzacja pozioma jest opóźniona względem polaryzacji pionowej, tak aby sekwencja impulsów optycznych uległa dwukrotnemu skróceniu. Impulsy spójnie ze sobą interferując, opuszczają polaryzacyjną linię opóźniającą w polaryzacji diagonalnej bądź antydiagonalnej, która za pomocą płytki półfalowej obracana jest na polaryzację poziomą i pionową. Po przejściu przez pojedynczy moduł sekwencja impulsów skracana jest dwukrotnie, zaś moc każdego z impulsów jest dwukrotnie zwiększona. Po przejściu przez „ m ” modułów energia całej sekwencji skoncentrowana jest w pojedynczym impulsie, którego czas nadejścia zdeterminowany jest przez czas wysłania całej sekwencji. Czas nadejścia pojedynczego impulsu może być zmierzony za pomocą standardowego detektora pojedynczych fotonów takiego jak fotodioda lawinowa (ang. *Avalanche Photo Diode*). Kodowanie informacji w formacie PPM odbywa się poprzez wysłanie sekwencji impulsów w odpowiednim czasie, jak pokazano na Fig. 2. W celu uniknięcia nachodzenia na siebie kolejnych sekwencji impulsów, muszą być one rozdzielone przedziałem ochrony (*guard-time*) o długości równej bądź większej niż czas trwania sekwencji.

Najłatwiejszym sposobem zrozumienia jak układ pasywnego odbiornika zdolny jest do konwersji sekwencji impulsów na impuls pojedynczy, jest przeanalizowanie działania układu w drugą stronę (od prawej strony do lewej strony). Kiedy do układu z prawej strony wchodzi pojedynczy impuls optyczny wysokiej mocy, rozdzielany jest on w każdym module na sekwencje impulsów o określonej fazie i polaryzacji. Ten tryb pracy układu wykorzystywano dotychczas do emulowania pomiarów z rozdzielczością liczby fotonów za pomocą detektorów pojedynczych fotonów [D. Achilles i inni „*Fiber-assisted detection with photon number resolution*”, *Opt. Lett.*, **2003**, 28, 2387–2389].

Polaryzacyjno-fazowe sekwencje impulsów mogą być generowane przy użyciu wiązki lasera pracy ciągłej spolaryzowanej pod kątem 45° oraz dwóch modulatorów fazy modulujących odpowiednio polaryzację poziomą i pionową. W celu zachowania odpowiedniego przedziału ochrony, wiązka musi być blokowana pomiędzy kolejnymi sekwencjami np. za pomocą modulatora amplitudy (np. EOSpace AX-1x2-0MVS-40-PFA-PFA), co powoduje, że nadajnik wykorzystuje efektywnie 50% dostępnej mocy optycznej.

Podobnie do standardowych protokołów transmisji optycznej, w prezentowanym układzie możliwe jest podwojenie szybkości przesyłania informacji, jeśli nadajnik generować będzie równocześnie dwie sekwencje impulsów odpowiadające prostopadłym polaryzacom pojedynczego impulsu na wyjściu układu.

Podczas transmisji sygnału polaryzacja pozioma i pionowa powinny być zamienione odpowiednio na polaryzację kołową lewoskrętną i prawoskrętną (np. za pomocą płytki ćwierćfalowej) tak, aby umożliwić komunikację niezależnie od wzajemnej kątowej orientacji nadajnika i odbiornika.

Na Fig. 1 przedstawiono dwa alternatywne warianty linii opóźniających. Pierwszy z nich w układzie przypominającym interferometr Macha-Zehndera, drugi z nich w układzie interferometru Michelsona z dwoma płytkami ćwierćfalowymi (QWP). Moc optyczna na wyjściu układu skoncentrowana jest w pojedynczym impulsie niosącym informację zakodowaną w formacie PPM, pozwalając na wydajną detekcję sygnału. Fig. 1 przedstawia skalowalną architekturę pasywnego układu pozwalającą na konwersję pojedynczej sekwencji impulsów o długości 2^m dla $m = 4$. Każdy z „ m ” modułów opóźniających oznaczanych przez kwadratowe pole ze zdefiniowanym opóźnieniem „ T ” składa się z polaryzacyjnej linii opóźniającej oraz płytki półfalowej.

Na Fig. 2 przedstawiono sposób kodowania informacji w komunikacji za pomocą czasu wysłania sekwencji impulsów optycznych o odpowiednio dobranych fazach i polaryzacjach. Konwerter przedstawiony na Fig. 1 zamienia sekwencję na pojedynczy impuls, którego czas nadejścia zależy od czasu wysłania sekwencji podobnie do standardowej modulacji położenia impulsu. Czas martwy (nazywany też przedziałem ochrony, czyli *guard-time*) pomiędzy ramkami sygnału zapewnia, że dwie następujące po sobie sekwencje impulsów nie nachodzą na siebie w czasie. W przedstawionym schemacie stosunek mocy szczytowej do średniej jest zwiększony ośmiokrotnie.

PRZYKŁAD 2

Aktywny układ przesyłania informacji dla sekwencji Hadamarda

W schemacie superaaddytywnej komunikacji przedstawionym w pracy [S. Guha, „*Structured Optical Receivers to Attain Superadditive Capacity*”, *Phys. Rev. Lett.*, **2011**, 106, 240502-1--240502-4] zaproponowano używanie słów kodowych złożonych z sygnałów BPSK, o fazie „0” lub „ π ” oznaczanych symbolicznie jako „+” (plus) albo „-” (minus). Słowa kodowe używane do komunikacji są kolejnymi wierszami macierzy Hadamarda o określonym wymiarze. Macierze Hadamarda są macierzami ortogonalnymi symetrycznymi, które istnieją dla wymiarów będących naturalną potęgą dwójki. Elementami macierzy Hadamarda są wyłącznie liczby „1” lub „-1”. Dla macierzy Hadamarda o wymiarze $2^m \times 2^m$ każdy wiersz macierzy może być jednoznacznie powiązany z ciągiem bitów $b_{m-1}b_{m-2} \dots b_1b_0$ o długości „ m ”, tak jak zostało pokazane w Tabeli 1 dla $m = 3$. Wartość poszczególnych bitów określa hierarchię relacji pomiędzy poszczególnymi sekcjami wiersza macierzy. Znak wybranego elementu słowa Hadamarda można wyznaczyć poprzez przemnożenie wszystkich czynników 1, -1 znajdujących się nad nim w tabeli. Słowa kodowe Hadamarda są następnie używane do modulacji fazowej sekwencji impulsów optycznych.

Układ aktywnego odbiornika, który umożliwia mapowanie sekwencji impulsów optycznych zmodulowanych zgodnie ze słowami kodowymi Hadamarda na format PPM został przedstawiony na Fig. 3. Wewnątrz odbiornika poszczególne impulsy z sekwencji interferują konstruktywnie w ten sposób, że na wyjściu odbiornika cała energia optyczna skoncentrowana jest w pojedynczym impulsie. Położenie czasowe wyjściowego impulsu zależy od słowa Hadamarda, zgodnie z którym zmodulowana została sekwencja impulsów. Konwersja różnych sekwencji impulsów na poszczególnych etapach odbiornika na wyjściowy format PPM została przedstawiona na Fig. 4.

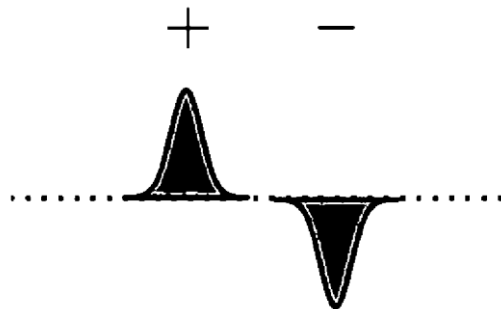
Aktywny układ składa się z połączonych szeregowo modułów, których schemat przedstawiono na Fig. 5. Pierwszym elementem każdego z modułów jest modulator polaryzacji, który niezależnie od sekwencji wejściowej obraca polaryzację wybranych impulsów o $+90^\circ$ lub -90° zgodnie z kierunkiem strzałek przed każdym z modułów przedstawionych na Fig. 3. W następnej kolejności impulsy spolaryzowane poziomo są opóźniane względem impulsów spolaryzowanych pionowo o czas „ T ” charakterystyczny dla każdego modułu. Podobnie, jak w pasywnej wersji odbiornika, sekwencja impulsów optycznych ulega wtedy dwukrotnemu skróceniu, zaś impulsy spójnie ze sobą interferując, opuszczają polaryzacyjną linię opóźniającą spolaryzowane diagonalnie lub antydiagonalnie. Polaryzacje diagonalne zamieniane są następnie na polaryzacje liniowe przy użyciu płytki półfalowej HWP. Na końcu każdego z modułów znajduje się druga polaryzacyjna linia opóźniająca wprowadzająca opóźnienie „ T ” dla polaryzacji poziomej.

Dla słów kodowych Hadamarda o długości 2^m odbiornik składa się z „ m ” modułów o malejącym opóźnieniu czasowym $2^{m-1}\tau, \dots, 2\tau, 1\tau$, gdzie τ oznacza czas trwania pojedynczego okna PPM. W związku z powyższym liczbę modułów niezbędnych do konwersji sekwencji impulsów na format PPM skaluje się logarytmicznie z długością sekwencji. Impuls wyjściowy, w którym skoncentrowana jest cała energia optyczna pojawia się na czasowej pozycji o numerze $\sum_{k=0}^{m-1} b_k 2^k$, odpowiadającej dziesiętnej

reprezentacji binarnego ciągu bitów $b_{m-1}b_{m-2}...b_1b_0$. Pozycja ta może być zmierzona za pomocą standardowego detektora pojedynczych fotonów. W przypadku niezarejestrowania impulsu na żadnej z oczekiwanych pozycji pomiar taki odrzucający jest jako niekonkluzywny analogicznie do standardowych schematów komunikacji opartych o modulację PPM.

T a b e l a 1. Przedstawia schemat konwersji ciągu bitów $b_{m-1}b_{m-2}...b_1b_0$ na słowa kodowe Hadamarda o długości 2^m składające się ze znaków BPSK ± 1 , dla $m = 3$. Poszczególne znaki w słowach kodowych Hadamarda zadane są poprzez iloczyn wszystkich czynników ± 1 znajdujących się nad nimi w tabeli.

Sekwencja bitów $b_1b_2b_0$	1				$(-1)^{b_2}$			
	1		$(-1)^{b_1}$		1		$(-1)^{b_1}$	
	1	$(-1)^{b_0}$	1	$(-1)^{b_0}$	1	$(-1)^{b_0}$	1	$(-1)^{b_0}$
000	+	+	+	+	+	+	+	+
001	+	-	+	-	+	-	+	-
010	+	+	-	-	+	+	-	-
011	+	-	-	+	+	-	-	+
100	+	+	+	+	-	-	-	-
101	+	-	+	-	-	+	-	+
110	+	+	-	-	-	-	+	+
111	+	-	-	+	-	+	+	-



Na Fig. 3 przedstawiono aktywny odbiornik optyczny konwertujący słowa kodowe Hadamarda o długości 2^m składające się z symboli BPSK o fazie ± 1 do formatu PPM rzędu 2^m . Przykład przedstawiony na Fig. 3 odpowiada wartości $m = 3$. Skalowalna konstrukcja odbiornika strukturyzowanego składa się z aktywnych modułów wprowadzających opóźnienia $2^{m-1}\tau... 2\tau, \tau$, gdzie τ oznacza separację czasową. Zakrzywione strzałki pokazują kierunek obrotu polaryzacji poszczególnych fragmentów sygnału realizowany przez modulatory polaryzacji w poszczególnych modułach.

PRZYKŁAD 3

Zalety i wady pasywnej oraz aktywnej konstrukcji układu

Zapotrzebowanie na wysoki stosunek mocy chwilowej do mocy średniej po stronie nadajnika w reżimie komunikacji optycznej na dużych odległościach może być spełnione przy użyciu opisanych tu odbiorników. W układzie komunikacji optycznej opisanym niniejszym wynalazkiem, nadajnik wysyła sekwencję spójnych impulsów optycznych zmodulowanych fazowo i polaryzacyjnie. Odbiornik natomiast łączy odebrane impulsy odpowiednio interferując je tak, aby skoncentrować całą energię optyczną niesioną przez sekwencję do pojedynczego impulsu. Informacja kodowana jest w pozycji wyjściowego impulsu zgodnie ze schematem standardowej modulacji PPM. Układ nadajnika, emitującego

impulsy zaproponowany w opisie patentowym, jest stosunkowo łatwy do praktycznej realizacji w przeciwieństwie do konstrukcji odbiornika, która nieuchronnie wiąże się z szeregiem technicznych problemów, rozwiązanych niniejszym wynalazkiem.

Układ odbiornika (zarówno w wersji pasywnej, jak i aktywnej) jest odporny na przestrzenne lub czasowe zniekształcenia mierzonego sygnału optycznego, które mogą pojawić się podczas propagacji impulsów. Znaczący postęp w zwiększeniu tolerancji odbiornika na tego typu zniekształcenia zrobiono podczas prac nad kryptografią kwantową w wolnej przestrzeni [J. Jin, i inni, „*Efficient time-bin qubit analyzer compatible with multimode optical channels*”, arXiv: 1509.07490, 2015].

Kolejnym technicznym wyzwaniem komunikacji optycznej jest stabilizacja polaryzacyjnych linii opóźniających z dokładnością do części długości fali tak, aby zagwarantować wysoką widzialność interferencji impulsów (konstruktywnej bądź destruktywnej) na poszczególnych czasowych pozycjach. Wysoka widzialność interferencji wymaga również wzajemnej spójności wszystkich impulsów składających się na polaryzacyjną fazową sekwencję. Oznacza to, że wszelkie zaburzenia sygnału podczas propagacji muszą zachodzić w skalach czasowych dużo wolniejszych niż czas trwania pojedynczej sekwencji.

Możliwe również, iż widzialność interferencji na skrajach poszczególnych pozycji czasowych zostanie pogorszona ze względu na czas potrzebny na włączenie/wyłączenie modulatorów elektro-optycznych. Potencjalnym rozwiązaniem tego problemu jest użycie w nadajniku lasera impulsowego o wysokiej częstotliwości repetycji, pozwalającego na skoncentrowanie energii impulsów dokładnie na środku odpowiednich pozycji czasowych tam, gdzie modulatory znajdują się w stanie ustalonym.

W przedstawionym układzie komunikacji optycznej korzystne jest zastosowanie światła w zakresie telekomunikacyjnej długości fali około 1550 nm. Alternatywnie jednak można zastosować inną długość fali lasera w zakresie 700–900 lub 1100–1600 nm. Są to zakresy widmowe, dla których dostępne są bardzo szybkie modulatory polaryzacji (pasmo rzędu 10–50 GHz), jak również wydajne lasery diodowe o bardzo długim czasie spójności. Dokładna długość fali używanego światła może np. odpowiadać jednej z linii Fraunhofera, co pozwalałoby na znaczące obniżenie poziomu tła w odbiorniku. W proponowanym zakresie długości fal są to m.in. linie 759,4 nm, 849,8 nm, 854,2 nm, 866,2 nm, 1268,1 nm, 1328,4 nm, 1414,2 nm, 1477,7 nm, 1496,1 nm, 1508,4 nm. Pożądane jest również aby stosowana długość fali była dostatecznie oddalona od widmowych linii absorpcyjnych cząsteczki wody. W korzystnym zakresie długości fali światła są to linie 718 nm, 810 nm, 1130 nm, 1380 nm.

Wysokiej klasy diody laserowe, jak i modulatory oferowane są na świecie jedynie przez kilku producentów, którzy zdominowali rynek sprzętu telekomunikacyjnego (Sumitomo – Japonia, Infinera – Stany Zjednoczone, Finisar – Stany Zjednoczone, Alcatel – Francja). Przykładowym producentem diod laserowych, którego produkty mogą być wykorzystane do budowy nadajnika jest firma Finisar (Stany Zjednoczone), zaś przykładowym modelem takiej diody Finisar S7500. Modulatory polaryzacji o bardzo niskim napięciu półfalowym niezbędne do budowy odbiornika mogą być zakupione od firmy EoSpace (Stany Zjednoczone). Przykładem takiego modulatora jest model (EoSpace PM-DV5-40-PFU-PFU-LV-UL).

Płytki półfalowe i kostki dzielące polaryzację niezbędne do konstrukcji odbiornika są bardzo standardowymi elementami optycznymi produkowanymi przez wielu producentów. Przykładowymi producentami, którzy dostarczają takie elementy jest firma NewPort (Stany Zjednoczone), płytka 05RP02-40, kostka 05BC16PC.11. Tańszym i wciąż dobrym jakościowo rozwiązaniem są produkty firmy Thorlabs (Stany Zjednoczone), płytka WPH05M-1550, kostka PBS25-1550. Najtańszą alternatywą są chińskie firmy takie jak Foctek Photonics Inc. produkujące elementy optyczne na zamówienie. W ich wypadku jednak trzeba uważać na potencjalne rozbieżności parametrów dostarczonego towaru z deklarowaną przez producenta specyfikacją.

Przykładowym detektorem pojedynczych fotonów (SPD) umożliwiającym detekcję impulsu optycznego na wyjściu układu odbiornika z dużą rozdzielczością czasową jest fotodioda lawinowa. Fotodiody mogą być dostarczone przez firmę IdQuantique (Szwajcaria), model ID230 lub firmę Micro Photon Devices (Włochy), model \$PD-050-CTB-FC.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób odbierania informacji przy użyciu bardzo słabych impulsów światła, w którym w odbiorniku impuls światła posiadający co najmniej dwie różne polaryzacje rozdziela się na co najmniej dwa sygnały optyczne o różnych polaryzacjach, następnie sygnał o jednej z rozdzielonych polaryzacji opóźnia się względem sygnału optycznego o innej polaryzacji, po czym sygnały łączy się ze sobą i na skutek interferencji ulegają wzmocnieniu, **znamienny tym**, że w którym przed rozdzieleniem co najmniej jednego impulsu światła o co najmniej dwóch różnych polaryzacjach z sekwencji impulsów obraca się jego polaryzację przy użyciu modulatora polaryzacji (PoIM) niezależnie od sekwencji wejściowej o $+90^\circ$ lub -90° , a następnie sygnały rejestruje się na detektorze.
2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że po rozdzieleniu impulsu światła posiadającego co najmniej dwie różne polaryzacje na co najmniej dwa sygnały optyczne obraca się ich polaryzację.
3. Sposób według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że rozdzielone sygnały o co najmniej dwóch różnych polaryzacjach łączy się, a następnie obraca się ich polaryzację.
4. Odbiornik do odbierania informacji przy użyciu bardzo słabych impulsów światła, który zawiera wejście, elementy optyczne i detektor, który obejmuje co najmniej jeden moduł (T), który zawiera co najmniej jeden element rozdzielający polaryzację, element o różnej drodze optycznej dla każdej z rozdzielonych polaryzacji, oraz płytkę obracającą polaryzację, przy czym część sygnału optycznego przebiega krótszą, a część dłuższą drogą optyczną, **znamienny tym**, że element o różnej drodze optycznej dla każdej z rozdzielonych polaryzacji, znajduje się pomiędzy dwoma kostkami rozdzielającymi polaryzację (PBS), a moduł (T) zawiera co najmniej jeden modulator polaryzacji (PoIM).
5. Odbiornik według zastrz. 4, **znamienny tym**, że płytką obracającą polaryzację jest płytka półfalowa (HWP), która obraca polaryzację o 45° lub płytka ćwierćfalowa (QWP).
6. Odbiornik według zastrz. 4 albo 5, **znamienny tym**, że na wyjściu z układu odbiornika umieszczony jest detektor pojedynczych fotonów do detekcji impulsu optycznego.

Rysunki

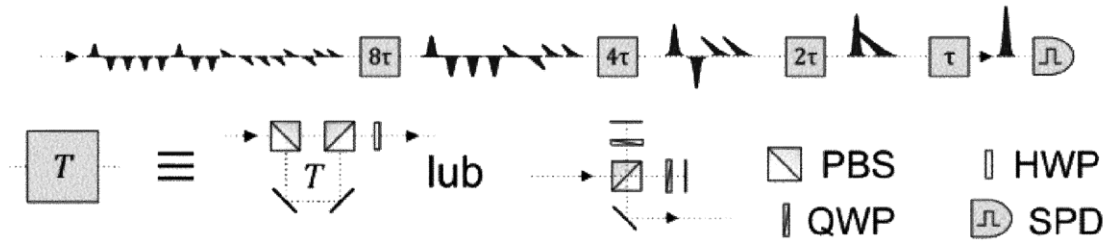


Fig. 1

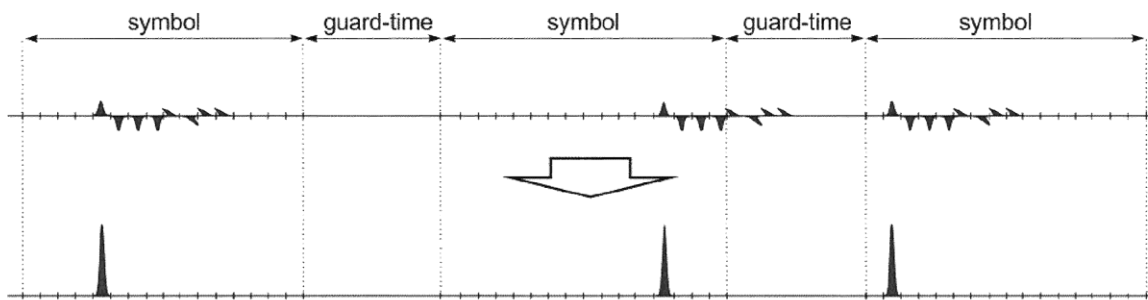


Fig. 2

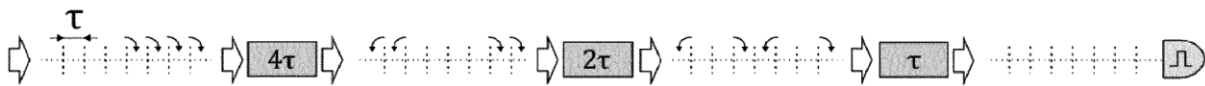


Fig. 3

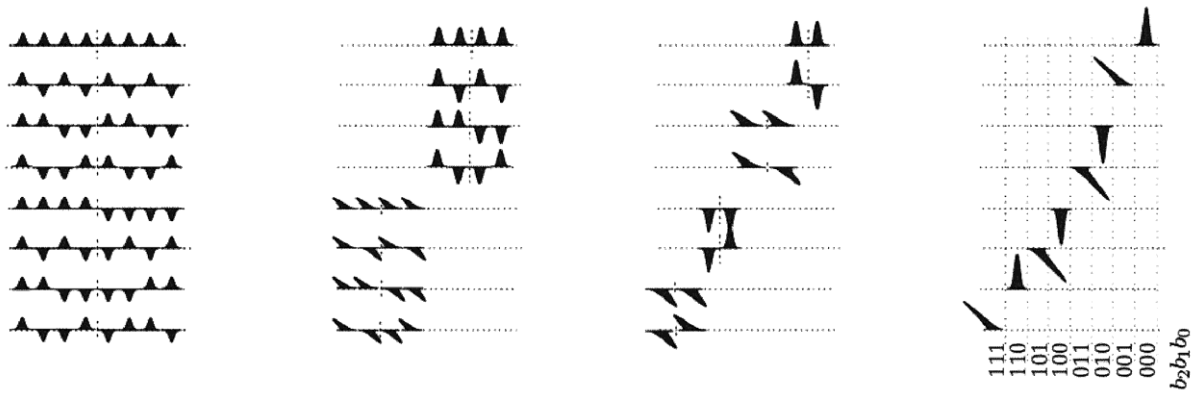


Fig. 4

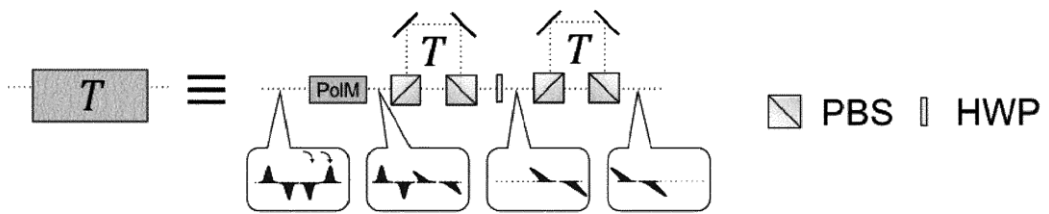


Fig. 5