

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: 2023-346
(22) Přihlášeno: 07.09.2023
(40) Zveřejněno: 12.02.2025
(Věstník č. 7/2025)
(47) Uděleno: 02.01.2025
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: 12.02.2025
(Věstník č. 7/2025)

(56) Relevantní dokumenty:
US 11255663 B2; US 2023085489 A1; GB 2610643 A.

(73) Majitel patentu:
Eltvor Instruments, s.r.o., Tábor, CZ

(72) Původce:
Ing. Marek Peca, Tábor, CZ

(54) Název vynálezu:
Bezdotykový měřič pohybu

(57) Anotace:
Bezdotykový měřič pohybu obsahuje: dva zdroje (101, 102) koherentního elektromagnetického vlnění o odlišné frekvenci, jejichž výstupy jsou napojeny na dva děliče svazku tak, že jeden dělič svazku propojuje výstup zdroje (102) koherentního elektromagnetického vlnění se vstupem interferometru (201) a vstupem interferometru (202), zatímco druhý dělič svazku propojuje výstup zdroje (101) koherentního elektromagnetického vlnění s interferometrem (201) a se vstupem směrového vazebního členu (3), přičemž výstup směrového vazebního členu (3) je zapojen do interferometru (202) a výstupy interferometrů (201, 202) jsou zapojeny na vstup elektronického demodulátoru (4); nebo zdroj (101) koherentního elektromagnetického vlnění, jehož výstup je zapojen do děliče svazku, přičemž jeden výstup děliče svazku je zapojen na vstup elektro-optického modulátoru (501), na jehož elektrický vstup je připojen periodický elektrický signál s obsahem sudých harmonických frekvencí, a druhý výstup děliče svazku je zapojen na vstup směrového vazebního členu (3) a výstup směrového vazebního členu (3) je zapojen společně s výstupem elektro-optického modulátoru (501) do interferometru (201) a výstup interferometru (201) je společně s periodickým elektrickým signálem zapojen na vstup elektronického demodulátoru (4); nebo zdroj (101) koherentního elektromagnetického vlnění, jehož výstup je zapojen do děliče svazku, přičemž jeden výstup děliče svazku je zapojen na první vstup kvadraturního interferometru (203) a druhý výstup děliče svazku je zapojen na vstup směrového vazebního členu (3), zatímco výstup směrového vazebního členu (3) je zapojen do druhého vstupu kvadraturního interferometru (203), jehož výstupy jsou zapojeny na vstup elektronického demodulátoru (4).

Bezdotykový měřič pohybu

Oblast techniky

5

Interferometrické bezdotykové měření pohybu předmětů je založeno na vysílání svazku světla na předmět a interferometrickém porovnávání fáze odraženého světla s fází světla vysílaného. V případě měření rychlosti je tento princip též nazýván Dopplerovským podle frekvenčního posuvu světla odraženého pohybujícím se předmětem. Jako zdroj měrného svazku je používán laser a detektory interferometru bývají polovodičové diody. Jedním z předpokladů pro praktickou použitelnost takového měřiče je schopnost odlišit pohyb vpřed a vzad, tedy kladný a záporný Dopplerovský posuv. Toho je tradičně dosahováno buď heterodynní interferometrií, nebo kvadraturní interferometrií. U heterodynní interferometrie je třeba vytvořit dva vzájemně koherentní svazky světla o odlišné frekvenci, u kvadraturní interferometrie je výzvou potlačení šumu a driftu na elektronických frekvencích blízkých nule.

15

Předkládaný vynález představuje způsoby vytvoření heterodynního signálu a alternativně i řešení založené na kvadraturní interferometrii.

20

Dosavadní stav techniky

Převažující druhy interferometrických měřičů pohybu jsou založeny na heterodynním principu, při němž je nutno vytvořit dva svazky optického signálu o dobře definované odlišné frekvenci. Jeden je odražen od měřeného předmětu a druhý je pak s odraženým signálem porovnáván v interferometru. Stojící předmět tak způsobí, že výstupní elektronický signál z interferometru má nenulovou frekvenci rovnou rozdílu optických frekvencí obou svazků. Tato tak tvoří mezifrekvenci následného elektronického zpracování signálu. Frekvenční potažmo fázovou demodulací tohoto signálu získáme rychlost, potažmo relativní polohu předmětu.

30

Metoda 1

Základním způsobem vytvoření svazku světla o posunuté frekvenci, převažujícím v soudobých průmyslových vibrometrech, je použití akusto-optického modulátoru (AOM). Do AOM vstupuje světlo laseru a vysokofrekvenční elektrický signál a na výstupu tohoto AOM je světlo o frekvenci rovné součtu frekvence laseru a frekvence elektrického signálu.

35

Patenty:

- EP 3296687 A1 Optical interferometer and vibrometer with such an optical interferometer (Christian Rembe, Michael Wortge, Alexander Dräbenstedt, Tobias Braun)
- US 9212896 B2 Optical interferometer and vibrometer comprising such an optical interferometer (Michael Wortge, Christian Rembe, Alexander Dräbenstedt, Tobias Braun)
- US 8199331 B2 Vibrometer and method for optically measuring an object (Christian Rembe, Georg Siegmund, Tian-Hua Xu).

45

Nevýhodou řešení založených na AOM je především cena a dostupnost AOM, které jsou doposud omezeny poměrně obtížnou výrobou (broušení a leštění krystalů, lepení aj.), často neumožňující nasycit poptávku.

50

Metoda 2

Jiným způsobem generování dvojice svazků světla o posunuté frekvenci jsou dvojfrekvenční

55

lasery, které s využitím různých fyzikálních principů umožňují vytvořit dvě koherentní a přesně odladěné frekvence přímo v témže aktivním prostředí laseru.

Literatura: HP (1985) *Model HP 5517A Laser Head* Hewlett-Packard Company.

Metoda 3

Alternativou k heterodynárnímu měření pohybuje použití svazku o jediné optické frekvenci a kvadrurního homodynárního interferometru. Stojící předmět způsobí, že z homodynárního interferometru vychází stejnosměrný elektronický signál. Díky kvadrurnímu interferometru, což jsou vlastně dva interferometry s fázovým rozdílem o 90° odlišným, je možné rozlišit pohyb vzdalující se od přibližujícího.

Literatura: Hobbs, P. C. (2022) *Building electro-optical systems: making it all work*, John Wiley & Sons, oddíl 10.3.8 “SSB Interferometers”.

Výzvou při použití homodynárního interferometru jsou šумы a driftы (včetně tzv. $1/f$ šumu) elektronického signálového řetězce, působící největší chyby poblíž nulové frekvence, tedy u signálu blízkého stejnosměrnému.

Podstata vynálezu

Vynález si klade za cíl poskytnout alternativy ke generování posunuté optické frekvence pro heterodynární interferometrii na straně jedné a pro potlačení nízkofrekvenčních šumů homodynární interferometrie na straně druhé.

Prvním navrhovaným směrem pro vytvoření dvojice optických svazků o posunuté frekvenci je použití dvou samostatných laserů, např. páru podobných polovodičových laserových diod. Takový pár laserů ale může mít obecně velmi vzdálenou frekvenci, nezpracovatelnou následujícím interferometrem a elektronickým signálovým řetězcem a nadto se budou jakékoli uvažovatelné lasery vyznačovat velmi silným vzájemným fázovým šumem, řádově překračujícím měřený Dopplerovský signál.

Z toho důvodu je dvojice laserů doplněna o referenční, nepohyblivý interferometr, který průběžně měří vzájemnou frekvenci a fázi obou laserů. Z rozdílu měřené frekvence je uzavřena zpětnovazební smyčka, regulující frekvenci jednoho nebo obou laserů tak, aby rozdílová frekvence ležela v pásmu dobře zpracovatelném navazujícím signálovým řetězcem. Tato regulace může být uskutečněna například prostým teplotním řízením, ale případně i jiným ovlivněním optické délky rezonátoru.

Kromě zpětnovazební regulace laserů je signál z referenčního interferometru převeden na okamžitou fázi a tato je odečítána od okamžité fáze z druhého, měrného interferometru, do něhož vstupuje Dopplerovský posunutý signál odražený od předmětu. Klíčovým prvkem soustavy je odečtení fáze z obou interferometrů, které umožní odečíst a tedy potlačit vzájemný fázový šum obou laserů a zbyde jen užitečný signál, jehož frekvence je úměrná rychlosti pohybu a fáze je úměrná relativní poloze.

Výhodou vynálezu oproti stávajícím metodám (Metoda 1 a Metoda 2 výše) je, že nepotřebuje obtížně vyrobitelný AOM, popř. dvojfrekvenční laser. Přidaný laser může být shodného typu, jako laser hlavní (typicky telekomunikační laserová dioda), nebo lze s výhodou použít laser o nižším výkonu (např. včetně kusů, které nesplnily nominální tolerance dodavatele). Vyšší složitost dvojitého interferometru je možno do značné míry usnadnit a zlevnit použitím planárního optického obvodu, vyrobeného jednovrstvou litografií.

Jinou předloženou alternativou k vytvoření světla o posunuté frekvenci je použití elektro-optického modulátoru (EOM) namísto AOM. Při tradičním buzení EOM harmonickým (sinusovým) elektrickým signálem, či obecně signálem obsahujícím jen liché harmonické frekvence, se objeví na výstupu EOM frekvence rovné součtu, ale i rozdílu vstupních frekvencí (optické a elektrické). Z toho důvodu nelze takové řešení použít pro odlišení pohybu vzdalujícího se od přibližujícího. Proto navrhujeme buzení EOM elektrickým signálem, který obsahuje sudé harmonické složky. Takový signál způsobí, že součtová frekvence je na výstupu EOM jinak silná, než frekvence rozdílová. Lze vytvořit takový tvar vlny, kdy rozdílová frekvence zcela zanikne a zbyde jen frekvence součtová, např. při použití pilového elektrického signálu. V takovém uspořádání pak EOM může zastoupit roli AOM.

Výhodou vynálezu oproti Metodě 1 je, že EOM bývá výrazně levnější než AOM a EOM je též masově litograficky vyráběn pro účely použití v telekomunikacích, což opět zlepšuje jeho dostupnost a konkurenci dodavatelů.

Dalším předloženým způsobem řešení je využití homodynního kvadraturního interferometru. Obtížnou otázkou je, jak měřit zároveň pohyby pomalé, kdy signály z fotodiod jsou blízké stejnosměrným a signálový řetězec je zatížen driftem a $1/f$ šumem, a zároveň signály o poměrně vysokých frekvencích 1 až 10 MHz. Signály blízké stejnosměrným lze dobře měřit s použitím zesilovačů s aktivním nulováním vstupní nesymetrie ("chopper"), ale takové zesilovače nejsou schopné zpracovat signál v oblasti ~MHz. Proto navrhujeme použít kombinaci dvou různých typů zesilovačů, které mohou být zapojeny jako transimpedanční, každý na opačné elektrodě fotodiody, případně mohou být k fotodiode napojeny pasivním LC obvodem frekvenční výhybky. Signály z výstupu obou zesilovačů jsou pak složeny do jednoho, podle zvolené zlomové frekvence tak, aby každý ze zesilovačů pracoval v pásmu, kde má lepší šumové vlastnosti.

Výhodou vynálezu oproti Metodě 3 je nižší šum na frekvencích blízkých nule a tedy možnost pracovat i s pomalu se pohybujícími předměty.

Konečně navrhujeme řešení kvadraturního interferometru, které má v jedné větvi vložen EOM, jehož jediným účelem je posunout pracovní frekvenci z nuly do oblasti vyšších frekvencí, kde se neuplatňuje $1/f$ šum a kde je možné použít standardní vysokofrekvenční zesilovače. EOM zde tedy tvoří nenulovou mezifrekvenci podobně, jako je tomu u heterodynního interferometru. Rozdílem oproti předchozímu použití EOM je zde to, že díky kvadraturnímu interferometru je možné odlišit směr pohybu (znaménko Dopplerova posuvu) bez ohledu na to, zda z EOM vystupuje frekvence součtová i rozdílová. EOM v tomto uspořádání může být buzen libovolným periodickým signálem: sinusovým, obdélníkovým i jiným.

Výhodou vynálezu oproti Metodě 3 je použití heterodynní mezifrekvence a tedy možnost pracovat i s pomalu se pohybujícími předměty.

Objasnění výkresů

V připojených výkresech znázorňuje:

obr. 1 řešení měřiče pohybu se dvěma samostatnými lasery;

obr. 2 řešení měřiče pohybu s elektro-optickým modulátorem;

obr. 3 řešení měřiče pohybu s kvadraturním interferometrem;

obr. 4 řešení měřiče pohybu s elektro-optickým modulátorem a zároveň kvadraturním interferometrem; a

obr. 5 zesilovač fotoelektrického signálu určeného pro měřič pohybu založený na homodynním interferometru.

5 Příklady provedení vynálezu

Příklad 1

Příkladem realizace bezdotykového měřiče je odzkoušený laboratorní vzorek, schematicky znázorněný na obr. 1. Zdrojem světla jsou dva zdroje 101, 102 koherentního elektromagnetického vlnění shodného typu, s rezonátorem typu DFB a aktivním chlazením (TEC) a vláknovým výstupem, pracující na vlnové délce okolo 1550 nm. Oba zdroje 101, 102 koherentního elektromagnetického vlnění jsou napájeny v sérii ze zdroje proudu. Teplota každého z nich je nezávisle řízena TEC digitálním regulátorem. TEC prvního zdroje KM koherentního elektromagnetického vlnění je řízen na konstantní teplotu podle vestavěného snímače teploty.

Z obou zdrojů 101, 102 koherentního elektromagnetického vlnění je odbočena část výkonu do referenčního interferometru 201, realizovaného jako vláknový dělič svazku, s PIN fotodiodou na výstupu. Signál z ní je zesílen a rozdělen do dvou větví. V jedné větvi je vložen hrubý digitální frekvenční čítač, měřící přibližně rozdílovou frekvenci obou zdrojů 101, 102 koherentního elektromagnetického vlnění. Tato frekvence je pak použita pro zpětnovazební řízení TEC druhého zdroje 102 koherentního elektromagnetického vlnění tak, aby rozdílová frekvence ležela v pásmu zpracovatelném vysokofrekvenčním A/D převodníkem. Druhá větev téhož referenčního signálu je vedena do prvního kanálu A/D převodníku v elektronickém demodulátoru 4.

Část signálu z prvního zdroje 101 koherentního elektromagnetického vlnění pokračuje do vazebního členu 3, jímž je kombinace vláknové a prostorové optiky, sestávající z kolimátorů a Wollastonova hranolu. Účelem vazebního členu je sloučit v prostoru svazek vysílaného a přijímaného světla do téhož překrývajícího se optického vidu. Za vazebním členem následuje objektiv sestávající ze spojných čoček.

Přijatý signál odražený od měřeného předmětu je veden z vazebního členu do měrného interferometru 202, spolu s částí signálu z druhého zdroje 102 koherentního elektromagnetického vlnění. Tento interferometr je opět realizován jako vláknový dělič svazku s párem PIN fotodiod na výstupu. Následuje rozdílový nízkofrekvenční zesilovač a zesílený signál je veden do druhého kanálu A/D převodníku v elektronickém demodulátoru 4.

Konečné zpracování probíhá v digitální oblasti. Signály z obou kanálů A/D převodníku v elektronickém demodulátoru 4 jsou číslicovým zpracováním fázově demodulovány a fáze obou signálů jsou odečteny. Z rozdílu fází je potom derivátorem počítána okamžitá frekvence a ta už je přímo úměrná rychlosti měřeného předmětu a prezentována uživateli.

Příklad 2

Jiným příkladem realizace bezdotykového měřiče je odzkoušený laboratorní vzorek, schematicky znázorněný na obr. 2. Zdrojem světla je zdroj 101 koherentního elektromagnetického vlnění s rezonátorem typu DFB a vláknovým výstupem, pracující na vlnové délce okolo 1550 nm. Stabilizace teploty není kritická.

Ze zdroje koherentního elektromagnetického vlnění 101 je odbočena část výkonu do elektro-optického modulátoru 501 (EOM). Modulovaný signál na optickém výstupu EOM je veden do interferometru 201. Elektrický vstup EOM je buzen generátorem signálů o libovolném průběhu a frekvenci v rozsahu jednotek až desítek MHz. Příkladem použitého průběhu je pila, alternativně superpozice dvou sinusových vln o poměru frekvencí 1:2.

Část signálu ze zdroje 101 koherentního elektromagnetického 101 vlnění pokračuje do vazebního členu 3, stejně jako v příkladu 1. Přijatý signál odražený od měřeného předmětu je veden z vazebního členu do měrného interferometru 201, spolu se signálem z elektro-optického modulátoru 501. Tento interferometr je realizován jako vláknový dělič svazku s párem PIN fotodiod na výstupu. Signály z fotodiod jsou zpracovány v elektronickém demodulátoru 4 sestávajícím z rozdílového nízkošumového zesilovače, A/D převodníku a číslicového frekvenčně-fázového demodulátoru. Středová frekvence a fáze demodulátoru je určena jeho zavěšením na výstup z generátoru signálů budícího EOM. Z rozdílu fází mezi signálem z fotodiod a generátoru je potom derivátorem počítána okamžitá frekvence a ta už je přímo úměrná rychlosti měřeného předmětu a prezentována uživateli.

Příklad 3

Jiným příkladem realizace bezdotykového měřiče je odzkoušený laboratorní vzorek, schematicky znázorněný na obr. 3. Zdrojem světla je zdroj 101 koherentního elektromagnetického vlnění s rezonátorem typu DFB a vláknovým výstupem, pracující na vlnové délce okolo 1550 nm. Stabilizace teploty není kritická.

Ze zdroje 101 koherentního elektromagnetického vlnění je odbočena část výkonu do vstupu "LO" kvadraturního telekomunikačního koherentního integrovaného přijímače (OIF DP-QPSK), který je zde zapojen jako kvadraturní interferometr 203. Druhá část signálu ze zdroje 101 koherentního elektromagnetického vlnění pokračuje do vazebního členu 3, stejně jako v příkladu 1. Přijatý signál odražený od měřeného předmětu je veden z vazebního členu do vstupu "Rx" kvadraturního interferometru 203. Elektrické signály na výstupu kvadraturního interferometru 203 jsou digitalizovány A/D převodníky a dále zpracovány číslicově v elektronickém demodulátoru 4.

Z fáze komplexního signálu na výstupu homodynního kvadraturního signálu v číslicové podobě je derivátorem počítána okamžitá frekvence a ta už je přímo úměrná rychlosti měřeného předmětu a prezentována uživateli.

Příklad 4

Dalším příkladem realizace je úprava řešení v příkladu 3 taková, že kvadraturní interferometr 203 byl realizován jako zakázkový planární optický obvod (PLC), ovšem bez střídavě (AC) vázaných fotodetektorů jako je tomu u telekomunikačního koherentního integrovaného přijímače (OIF DP-QPSK). Namísto toho jsou vláknové výstupy PLC připojeny na stejnosměrně (DC) vázané PIN fotodiody.

Tyto stejnosměrně vázané PIN fotodiody jsou zapojeny v obvodu podle obr. 5. Oba vývody fotodiody jsou zapojené na vstup jiného transimpedančního zesilovače (TIA). Katoda je připojena na vysokofrekvenční transimpedanční zesilovač 602, anoda je připojena na nízkofrekvenční transimpedanční zesilovač 601 s technologií aktivního nulování ("chopper"). Výstupy obou TIA jsou sloučeny kombinací filtrů zapojených jako frekvenční výhybka tak, že z transimpedančního zesilovače 601 jsou použity frekvence mezi DC a jednotkami kHz a z transimpedančního zesilovače 602 jsou použity frekvence od kHz do desítek MHz. Zbylé zpracování je shodné s příkladem 3.

Toto řešení umožňuje měřit i pomalé pohyby s Dopplerovým posuvem blízkým DC, s drifty a $1/f$ šumem potlačeným díky použitím transimpedančního zesilovače 601.

Příklad 5

Další odzkoušená modifikace řešení v příkladu 3 je vyobrazena na obr. 4. Modifikace spočívá ve

vložení elektro-optického modulátoru 502 na vstup “LO” telekomunikačního kvadraturního interferometru 203. Elektro-optický modulátor 502 je elektricky buzen ze signálového generátoru sinusového (harmonického) průběhu o frekvenci jednotek až desítek MHz. Signál na výstupu generátoru je rovněž snímán A/D převodníky v elektronickém demodulátoru 4.

Procesu demodulace je předřazen krok, kdy je digitalizovaný fotoelektrický signál amplitudově (DSB) číslicově demodulován a tedy posunut ve frekvenci z frekvence EOM generátoru na frekvenci blízkou DC. Zbytek zpracování, tedy frekvenčně-fázová číslicová demodulace a následné určení rychlosti pohybu derivací fáze zůstává beze změny.

Toto řešení umožňuje měřit i pomalé pohyby s Dopplerovým posuvem blízkým DC díky tomu, že EOM namoduluje v optické oblasti měrné optické signály na frekvenci jednotek až desítek MHz, odkud jsou potom v číslicové oblasti demodulovány zpět. Jedná se tedy o obdobu “chopperu”, ovšem realizovanou opticky pomocí EOM.

Při zkouškách prototypu tohoto technického řešení byly měřeny akustické kmity ve frekvenčním rozsahu 20Hz až 16kHz a světlo laserového svazku bylo odraženo od kmitajícího předmětu vzdáleného 380mm a pokrytého černou lepicí páskou. Za těchto podmínek byl šum měření pohybu v rozsahu $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ až $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$. Rozsah měření je 0,1 mm/s až 10 m/s.

Průmyslová využitelnost

Vynález je určen pro měření rychlosti, případně relativních přírůstků vzdálenosti, mezi předmětem a měřičem. Měřena je složka rychlosti potažmo vzdálenosti promítnutá do osy mezi předmětem a měřičem. Je nutné, aby mezi měřičem a předmětem byla přímá viditelnost a aby předmět odrazil viditelné nebo neviditelné světlo použité v měřiči zpět do měřiče.

Vynález je využitelný v průmyslu, technických zkušebnách a laboratořích pro měření kmitů, rázů, chvění, relativní polohy, házivosti.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Bezdotykový měřič pohybu, **vyznačující se tím**, že obsahuje dva zdroje (101, 102) koherentního elektromagnetického vlnění o odlišné frekvenci, jejichž výstupy jsou napojeny na dva děliče svazku tak, že jeden dělič svazku propojuje výstup zdroje (102) koherentního elektromagnetického vlnění se vstupem interferometru (201) a vstupem interferometru (202), zatímco druhý dělič svazku propojuje výstup zdroje (101) koherentního elektromagnetického vlnění s interferometrem (201) a se vstupem směrového vazebního členu (3) a výstup směrového vazebního členu (3) je zapojen do interferometru (202) a výstupy interferometrů (201, 202) jsou zapojeny na vstup elektronického demodulátoru (4).

2. Bezdotykový měřič pohybu, **vyznačující se tím**, že obsahuje zdroj (101) koherentního elektromagnetického vlnění, jehož výstup je zapojen do děliče svazku, přičemž jeden výstup děliče svazku je zapojen na vstup elektro-optického modulátoru (501), na jehož elektrický vstup je připojen periodický elektrický signál s obsahem sudých harmonických frekvencí, a druhý výstup děliče svazku je zapojen na vstup směrového vazebního členu (3) a výstup směrového vazebního členu (3) je zapojen společně s výstupem elektro-optického modulátoru (501) do interferometru (201) a výstup interferometru (201) je společně s periodickým elektrickým signálem zapojen na vstup elektronického demodulátoru (4).

3. Bezdotykový měřič pohybu, **vyznačující se tím**, že obsahuje zdroj (101) koherentního elektromagnetického vlnění, jehož výstup je zapojen do děliče svazku, přičemž jeden výstup děliče svazku je zapojen na první vstup kvadraturního interferometru (203) a druhý výstup děliče svazku je zapojen na vstup směrového vazebního členu (3), zatímco výstup směrového vazebního členu (3) je zapojen do druhého vstupu kvadraturního interferometru (203), jehož výstupy jsou zapojeny na vstup elektronického demodulátoru (4).

4. Bezdotykový měřič pohybu podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že oba interferometry (201, 202) jsou realizovány jako planární optický obvod.

5. Bezdotykový měřič pohybu podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že zdroje (101, 102) koherentního elektromagnetického vlnění jsou lasery zapojené v zpětnovazební regulační smyčce, jejíž vstup je připojen k výstupu interferometru (201) a výstup smyčky je zapojen na řídicí vstupy ladění frekvence laserů.

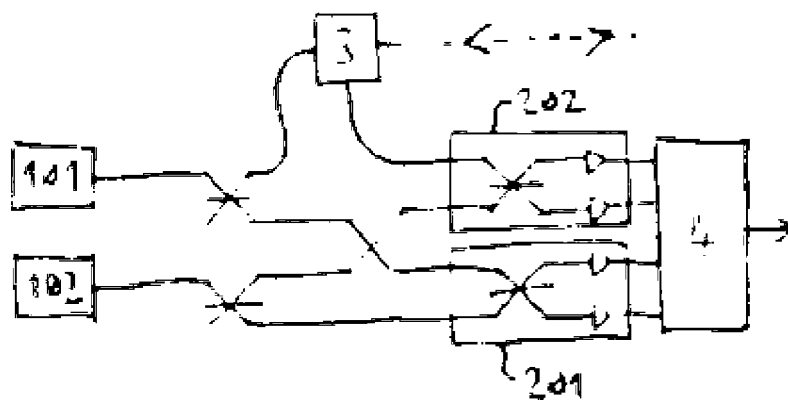
6. Bezdotykový měřič pohybu podle nároku 3, **vyznačující se tím**, že v cestě mezi zdrojem (101) koherentního elektromagnetického vlnění a prvním vstupem kvadraturního interferometru (203) je vložen elektro-optický modulátor (502), jehož elektrický vstup je napojený na periodický elektrický signál, který je rovněž zapojen do elektronického demodulátoru (4).

7. Bezdotykový měřič pohybu podle nároku 3, **vyznačující se tím**, že kvadraturní interferometr (203) je realizován jako planární optický obvod.

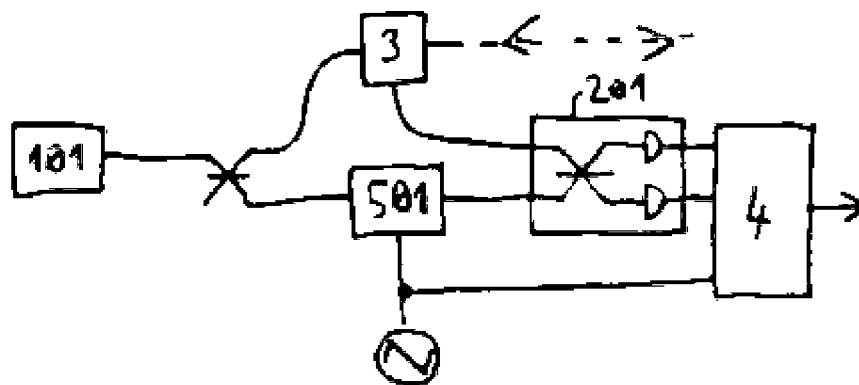
5 8. Bezdotykový měřič pohybu podle nároku 3, **vyznačující se tím**, že optické výstupy kvadraturního interferometru (203) jsou zapojeny na vstupy fotodiod, jejichž výstupy jsou zapojeny do vstupů dvojice elektronických zesilovačů, transimpedančního zesilovače (601) s aktivním potlačováním vstupní nesymetrie a transimpedančního zesilovače (602) s větší zesilovanou šířkou pásma, než jakou zesiluje transimpedanční zesilovač (601).

10 9. Bezdotykový měřič pohybu podle nároku 5, **vyznačující se tím**, že výstup smyčky je zapojen na vstup převodníku elektrického signálu na teplotu a teplotní výstup tohoto převodníku je teplovodivě spojen se zdrojem (101) koherentního elektromagnetického vlnění nebo zdrojem (102) koherentního elektromagnetického vlnění.

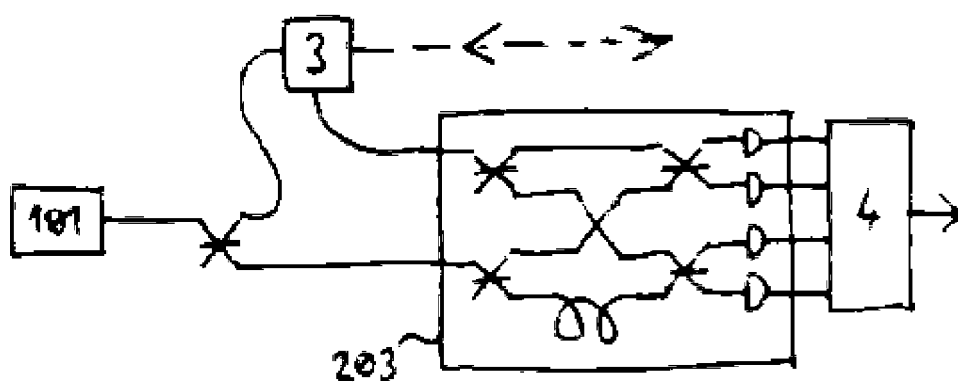
2 výkresy



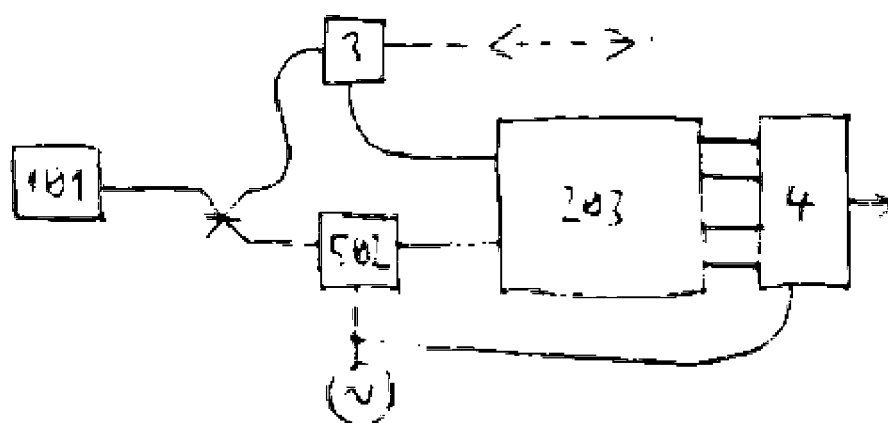
Obr. 1



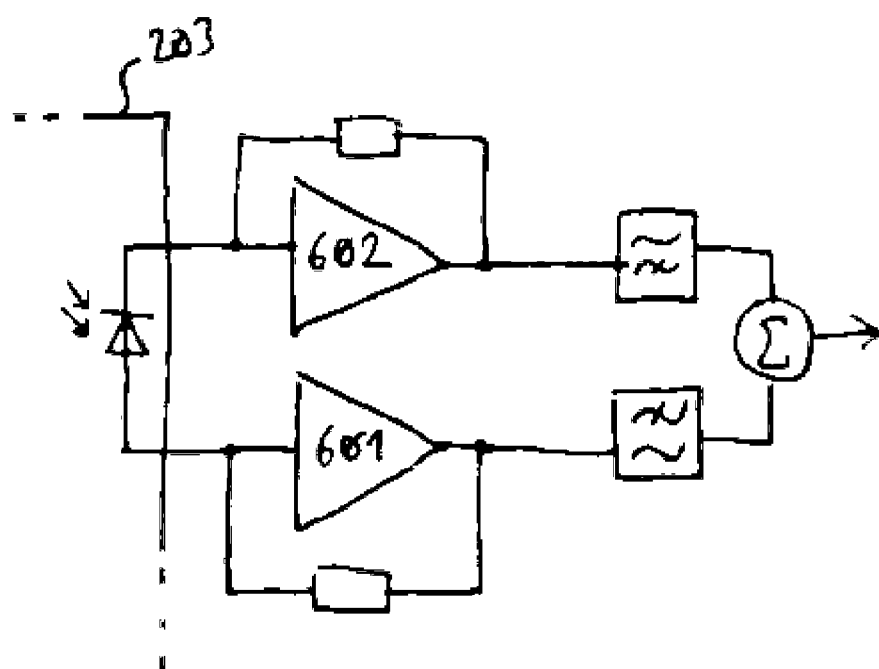
Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4



Obr. 5