

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

306 566

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

G01V 1/16 (2006.01)

G01V 1/20 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2015-960**
(22) Přihlášeno: **31.12.2015**
(40) Zveřejněno: **08.03.2017**
(Věstník č. 10/2017)
(47) Uděleno: **25.01.2017**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **08.03.2017**
(Věstník č. 10/2017)

(56) Relevantní dokumenty:

(Rotaphone, a mechanical seismic sensor system for field rotation rate measurements and its in situ calibration, Johana Brokešová, Jiří Málek, Petr Kolínský, Journal of Seismology, October 2012, Volume 16, Issue 4, pp 603–621), 24.2.2012

US 2014022861 A1; CZ 301217 B6.

(73) Majitel patentu:

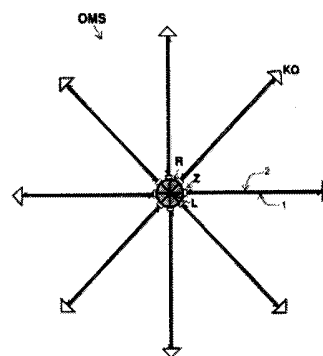
Univerzita Karlova v Praze, Praha 1, CZ
Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i.,
Praha 8, CZ

(72) Původce:

doc. RNDr. Johana Prokop Brokešová, CSc., Zdislav,
CZ
RNDr. Jiří Málek, Ph.D., Praha 8, CZ

(74) Zástupce:

Hák Janeček & Švestka, Patentová a známková
kancelář, RNDr. Roman Hák, patentový zástupce,
U Průhonu 5, 170 00 Praha 7



(54) Název vynálezu:

Opticko-mechanický senzorový systém pro měření seismických pohybů půdy a způsob seismického měření s použitím tohoto systému

(57) Anotace:

Vynález se týká měřicího zařízení kombinovaného seismického senzorového systému, který umožňuje měřit 9 složek seismického pohybu, tj. 3 ortogonální translační složky, 3 složky rotace kolem ortogonálních os a 3 složky deformace v daném měřicím bodě. Systém obsahuje tuhou nedeformovatelnou kostru (K), horizontální a vertikální seismické snímače (Gh, Gv) a optické dálkoměry obsahující alespoň jeden laserový zdroj (L), alespoň 4 laserové interferometry (Z) a alespoň 4 koutové odražeče (KO). Vynález se týká též způsobu seismického měření s použitím tohoto zařízení. Zařízení je vhodné pro měření vlnového pole generovaného jak umělými zdroji (odstřely v lomech, generátor rotačních pohybů) tak přirozenými zdroji (např. lokálními zemětřeseními, důlními otřesy apod.).

CZ 306566 B6

Opticko–mechanický senzorový systém pro měření seismických pohybů půdy a způsob seismického měření s použitím tohoto systému

5 Oblast techniky

Vynález se týká obecně oblasti seismických měření. Konkrétně se týká měřicího zařízení, kombinovaného seismického senzorového systému, který umožňuje měřit 9 složek seismického pohybu, tj. 3 ortogonální translační složky, 3 složky rotace kolem ortogonálních os a 3 složky deformace v daném měřicím bodě. Vynález se týká též způsobu seismického měření s použitím tohoto zařízení. Zařízení je vhodné pro měření vlnového pole generovaného jak umělými zdroji (odštěřly v lomech, generátor rotačních pohybů) tak přirozenými zdroji (např. lokálními zemětřeseními, důlními otřesy apod.).

15

Dosavadní stav techniky

Při seismických měřeních lze v principu měřit tři typy pohybů půdy: translační pohyb (posunutí a odvozené veličiny jako rychlost a zrychlení tohoto pohybu), rotační pohyb (otáčení a odvozené veličiny jako rychlost a zrychlení tohoto otáčení) a deformační (změna vzdálenosti mezi dvěma body odvozené veličiny jako rychlost a zrychlení této změny vzdálenosti). Při seismických měřeních se tradičně registrují translační pohyby. Zatímco měření translačních složek pohybu půdy je v seismologii rutinní záležitostí, měření rotačních složek se rozvíjí teprve v posledních zhruba dvou dekádách (viz např. dvě speciální čísla odborných časopisů věnované rotační seismologii: Bull. Seis. Soc. Am, Vol 99, No. 2B, 2009, special issue on Rotational Seismology and Engineering Applications, a J. Seismol, Vol 16, No. 4, 2012, special issue on Advances in Rotational Seismology: Instrumentation, Theory, Observations, and Engineering). Přitom translační složky jsou do jisté míry ovlivněny rotačním pohybem a naopak. Proto je důležité přesné současné měření obou typů pohybů.

30

Je známo několik základních způsobů měření rotačních seismických pohybů.

Jedním z nich jsou seismické arraye (např. Spudich, P., Steck, L. K., Hellweg, M., Fletcher, J. B., and Baker, M. (1995). Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M 7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR dense seismograph array, J. Geophys. Res., 100(B1):675–690), kdy rotační pohyb se zjišťuje pomocí aproximace prostorových derivací translačních seismických pohybů naměřených jednotlivými seismografy arraye. Nevýhodou této metody je relativně velká vlnová délka, pro kterou je použitelná. Další nevýhodou je větší rozsah území, na kterém se měření provádí, přičemž lokální nehomogenity (rozdílné lokální podmínky pod jednotlivými seismografy v arrayi) mohou značně snížit celkovou přesnost měření. Nevýhodou je i nutnost instalovat větší počet seismografů (který by měl významně překračovat teoretický minimální počet tří), což vede k nárůstu celkových nákladů na měření.

Další možnosti měření seismických rotací jsou laserové gyroskopy založené na tzv. Sagnacově efektu a využívající měření interference dvou protisměrných laserových paprsků (viz např. Schreiber, K.U. et al., Ring Laser Gyroscopes as Rotation Sensors for Seismic Wave Studies, In: Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects, Teisseyre, R., Takeo, M., Majewski E. (Eds.), Springer, 2006). Tyto gyroskopy poskytují velmi přesná měření. Nevýhodou je, že jsou velmi nákladné a vázané na jedno dané místo, neboť jsou velmi rozměrné a musejí být montovány ve speciálně uzpůsobených podmínkách (speciální stavby, podzemní prostory apod.). Tyto gyroskopy měří rotační pohyb vždy jen kolem jedné osy.

Pro velmi silné pohyby půdy se dělají pokusy s gyroskopy a náklonoměry používanými například v letectví, avšak zatím bez jednoznačného aplikačního výstupu. Pro slabší (tedy běžnější) seismické pohyby lze případně použít komerčně dostupné trojosé rotační senzory pracující na elek-

trochemickém principu (Nigbor, R.L. (1994). Six-degree-of-freedom ground motion measurement, Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 84, 1665–1669), které však nejsou použitelné univerzálně a při testech vykazovaly řadu problémů (Nigbor, R. L, Evans, J. R., and Hutt, C. R. (2009). Laboratory and field testing of commercial rotational seismometers. Bull. Seismol. Soc. Am., 99(2B):1215–1227).

Další možností je mechanický sensorový systém využívající geofony připevněné v paralelních párech k tuhé nedeformovatelné kostře podle patentu CZ 301217. Různá provedení tohoto měřicího systému byla využita v řadě několikaměsíčních až několikaletých měřicích kampaní po celém světě. Jako příklady lze uvést aktivní rift v Korintském zálivu v Řecku, Velký východoafrický rift v Etiopii, oblast indukované seismicity v okolí solného dolu v Provadii v Bulharsku, vulkanický komplex Katla–Eyafjalla na jižním Islandu, geotermální elektrárna The Geysers v Kalifornii apod. Tato měření potvrdila existenci měřitelných rotačních seismických pohybů vybuze-
ných menšími zemětřeseními v blízkých ohniskových vzdálenostech (viz např. Brokešová J., Málek J., and Kolínský, P. (2012), Rotaphone, a mechanical seismic sensor system for field rotation rate measurements and its in-situ calibration, *J. Seismol.*, Vol. 16, No.4, 603–621, DOI: 10.1007/s10950-012-9274-y). Velkou výhodou uvedeného zařízení je, že se jak rotační, tak translační složky měří jedním a tímž přístrojem, tj. se stejnou přístrojovou charakteristikou, což velmi usnadňuje interpretaci naměřených dat. Nevýhodou těchto přístrojů pro seismická měření je, že měří maximálně 6 složek seismického pohybu (neumožňují měřit deformace), a dále, že přesnost měření je snížena nedostatečnou vzájemnou kalibrací jednotlivých geofonů. Obě tyto nevýhody řeší opticko-mechanický seismický sensorový systém podle předloženého vynálezu, který je dále popsán.

Deformační pohyb je možné měřit pomocí tzv. strainmetrů nebo dilatometrů. Z těchto přístrojů se pro seismické účely hodí takové, které využívají princip laserové interferometrie, a které umožňují detekovat změnu vzdálenosti ve škálách až stovek metrů (např. Agnew, D.C. a Wyatt, F.K., (2003), Long-Base Laser Strainmeters: A Review; Scripps Institution of Oceanography Technical Report). Dosud se tyto přístroje používaly k měření na nízkých periodách (dny, měsíce). V oboru vyšších frekvencí sahá jejich použitelnost maximálně do několika Hz. V seismické praxi, zejména v nerostné prospekci a strukturálních studiích je třeba uvažovat frekvence několikanásobně vyšší (desítky až stovky Hz). Seismický sensorový systém podle vynálezu to umožňuje, neboť současným a soumístným měřením deformačních, translačních i rotačních složek umožňuje snadnou korekci měřených deformací na vliv kontaminace vysokofrekvenčními translacemi a rotacemi seismického původu.

Konkrétně mechanické zařízení podle patentu a CZ 301217 obsahuje páry vertikálních a horizontálních mechanických senzorů a je určeno pro měření translačních a rotačních složek seismických pohybů (vždy ve 3 směrech, tedy celkem 6 komponent). Naproti tomu zařízení podle předloženého vynálezu kombinuje vertikální a horizontální mechanické senzory s optickými dálkoměry, které se funkčně vzájemně doplňují. Zařízení tak umožňuje měření translačních, rotačních a deformačních složek seismických pohybů (vždy ve 3 směrech, tedy celkem 9 složek). Hlavní výhodou zařízení (a způsobu) podle předloženého vynálezu je, že všech 9 složek seismických pohybů se měří společně jedním zařízením v jednom měřicím bodě, jde tedy o současné a soumístné měření, což kromě větší přesnosti měření přináší i ekonomický efekt, ve srovnání s dosavadním, stavem techniky, kdy se měřily deformační pohyby (např. pomocí tzv. strainmetrů nebo dilatometrů) odděleně od translačních a rotačních pohybů. Díky měření deformace bylo překonáno omezení zařízení podle stavu techniky, kde z rotačních složek nebylo možné efektivně získat parametry podélných seismických vln P.

Rotační seismické vlny byly dosud buzeny většinou běžnými seismickými zdroji, přirozenými zemětřeseními nebo umělými zdroji, například odstřely trhavin, různými vibrátory nebo padostroji. Tyto zdroje však přeměňují pouze jistou (většinou velmi malou) část energie do rotačních složek seismických vln, zbytek seismické energie je vyzařena v běžných (translačních) složkách seismických vln. Patent CZ 301218 popisuje generátor rotačních vln, který má podstatně

- vyšší účinnost při generování rotačních pohybů půdy. Navíc umožňuje opakovatelné generování rotačních pohybů s identickým zdrojovým pulzem. Takový generátor lze s výhodou využít v kombinaci se senzorovým systémem podle vynálezu ke zpřesnění metody kalibrace jednotlivých snímačů v systému. Způsob seismického měření s použitím opticko-mechanického senzorového systému zahrnující kalibraci je též jedním aspektem předloženého vynálezu.

Podstata vynálezu

- Zařízením podle předloženého vynálezu je opticko-mechanický senzorový systém pro měření seismických pohybů půdy a její deformace (celkem devíti složek pohybu půdy) při průchodu seismických vln. Zařízení kombinuje dva typy senzorů – seismické snímače a optické dálkoměry, které se vzájemně doplňují. Centrální část senzorového systému obsahuje tuhou nedeformovatelnou kostru a senzory nebo jejich části pevně spojené s touto kostrou. Koutové odražeče, které jsou součástí dálkoměrů, nejsou spojeny s kostrou a tvoří tak periferní část opticko-mechanického systému. Při měření je zařízení umístěno na jednom místě na povrchu Země a je pevně spojeno s podložím, jehož pohyby a deformace se měří. Koutové odražeče jsou umístěny ve vhodných směrech a vzdálenostech od centrální části a jsou také pevně spojeny s podložím. Systém pro svoji funkci potřebuje elektrické napájení, které je možno zajistit z elektrické sítě, z baterií nebo z lokálního generátoru elektřiny (solární panely, malá větrná elektrárna atd.).

- Základní součástí centrální části systému podle předloženého vynálezu je tuhá nedeformovatelná kostra, která může mít různý tvar, např. výhodně kruhový, a je uzpůsobena k tomu, aby mohla být pevně spojená s podložím, např. pomocí hrotů, nebo s podložkou, která je pevně spojena s podložím. Na kostře jsou umístěny a pevně s ní spojeny seismické senzory a většina dílů dálkoměrů – laserové zdroje, polopropustná zrcátka, přijímač světla a interferometr. Výhodně je možné použít jeden společný laserový zdroj opatřený rozdělovačem paprsků pro všechny dálkoměry. Dalšími součástmi dálkoměrů jsou koutové odražeče laserových paprsků, které nejsou spojeny s kostrou, a jsou součástí periferní části systému. Při měření se umísťují do terénu v určité vzdálenosti od kostry, jsou proto také uzpůsobeny pro pevné spojení s podložím. Dálkoměry se používají pro měření tří složek deformace. K tomu je nutné je rozmístit tak, aby měřily ve čtyřech různých směrech. Signál ze seismických snímačů a dálkoměrů v analogové podobě je výhodně veden do digitizéru a poté v digitálně podobě dále zpracováván, např. zapisován do paměti počítače. Odborník si je vědom i jiných možností přenosu a zpracování signálů.

- Zaznamenané signály jsou dále zpracovávány pomocí speciálního algoritmu v registračním zařízení, např. počítači, čímž je dosaženo výrazného zlepšení charakteristik zařízení podle předloženého vynálezu (citlivost, frekvenční rozsah, snadnost měření) oproti měřením prováděným pomocí zařízení známých ze stavu techniky.

- Impulzní odezva seismických snímačů se může během měření mírně měnit v důsledku změny teploty, vlhkosti nebo stárnutím materiálu, ze kterých jsou vyrobeny pružné součástky snímačů. Proto je třeba provádět kalibraci seismických snímačů v průběhu kontinuálního měření. Metoda takové kalibrace je založena na tom, že počet seismických snímačů na kostře je větší než počet měřených složek. Protože pomocí seismických snímačů se měří tři složky translace a tři složky rotace, musí být počet seismických snímačů alespoň 8, z toho 4 vertikální uspořádané do dvou paralelních párů a 4 horizontální rovněž uspořádané do dvou paralelních párů. Při kalibraci se hledají parametry impulzní odezvy použitých seismických snímačů, které lze považovat v krátkém časovém intervalu za konstantní. Jako naměřená data pro tuto úlohu se používají měřené průběhy seismických pohybů během tohoto časového intervalu. Způsob měření zahrnující tuto kalibraci je dalším aspektem předloženého vynálezu a je podrobně popsán v samostatné části dále.

- Výhodně může být seismický senzorový systém podle vynálezu použit spolu s umělým zdrojem rotačních pohybů, např. generátorem podle patentu CZ 301218, který je schopen opakovaně budít

identické zdrojové pulzy přenášené do půdy. Takové uspořádání se předpokládá při měření pro účely seismické prospekce. Navíc umožňuje další výhodnou možnost kalibrace jednotlivých snímačů při použití otáčení přístroje o přesně definované úhly vůči zdroji mezi dvěma po sobě následujícími okamžiky vybuzení zdrojového signálu. Následné zpracování dat naměřených při tomto otáčení umožňuje zjistit korekce impulzní odezvy jednotlivých snímačů a tím je vzájemně kalibrovat. Tato metoda kalibrace je podrobněji popsána níže a je také dalším aspektem předloženého vynálezu. Tyto korekce odpovídají stavu a fyzikálním podmínkám v době, kdy dané měření a otáčení přístroje probíhalo. Při prospekčních měřeních je možné pro kalibraci využít buď výhradně metodu založenou na otáčení, nebo ji výhodně kombinovat s metodou kalibrace zmíněnou v předchozím odstavci. Pro měření seismických pohybů vybuzených přirozeným, tj. neopakovatelným zdrojem (např. zemětřesení, důlní otřes, apod.), je možné opakovatelný zdroj a metodu otáčení aplikovat v průběhu instalace senzorového systému na začátku měřicí kampaně a takto získané korekce impulzní odezvy jednotlivých snímačů pak využít jako vstupní hodnoty pro kalibrační metodu zmíněnou v předchozím odstavci.

Hlavní výhodou zařízení a způsobu podle předloženého vynálezu je, že všech 9 složek seismických pohybů se měří společně jedním zařízením v jednom měřicím bodě. Tím je dosaženo ekonomické výhodnosti oproti dosud používaným přístrojům, tedy značného zvýšení poměru výkon/cena. Oproti dosud používanému zařízení podle patentu CZ 301217 se měří navíc 3 složky deformace a byl také rozšířen frekvenční obor. Nový způsob zpracování signálu přináší vyšší přesnost měření. Zařazení dvou různých druhů kalibrace zvyšuje flexibilitu zařízení tak, že je možno jej použít jak v prospekční seismice v kombinaci s umělým generováním seismických vln, tak pro výzkum přirozené a indukované seismicity.

Devítisložkové měření umožňuje dekompozici skutečného seismického vlnového pole v horizontální rovině do tří nezávislých typů pohybů: translace, rotace tuhého tělesa a deformace elastického tělesa, a to bez kontaminace jedné druhými. Výsledkem zpracování je mimo jiné určení směru a rychlosti šíření různých typů podélných, příčných a povrchových vln. Díky měření deformace bylo překonáno omezení zařízení podle stavu techniky, kde z rotačních složek není možné efektivně získat parametry podélných vln P.

Podrobný popis vynálezu

Nejprve budou popsány jednotlivé části zařízení podle vynálezu a jejich vzájemné uspořádání a dále bude popsán způsob seismického měření s použitím uvedeného zařízení a způsob zpracování signálu.

Opticko-mechanický senzorový systém pro měření seismických pohybů půdy

Kostra zařízení je tuhé nedeformovatelné těleso, které je uzpůsobeno k tomu, aby pro měření mohlo být snadno spojeno s podložím, jehož pohyby se měří. Výhodně může být například ve tvaru disku. Její rozměry jsou typicky v rozsahu decimetrů až metrů, obvykle do 1 m. Její váha umožňuje snadný převoz a manipulaci, proto je typicky vyrobena z lehkých kovů (např. duralu). Kostra umožňuje montáž seismických snímačů a dálkoměrů, které jsou rozmístěny na různých místech kostry.

Seismické snímače jsou namontovány v různých místech kostry a jsou dvojího druhu, vertikální a horizontální, podle složky seismického pohybu, které měří. Horizontální snímače pak mají různou orientaci tak, aby z nich bylo možno odvodit průběh dvou navzájem kolmých horizontálních seismických složek. Nejmenší počet snímačů, které je třeba rozmístit na kostru pro měření tří translačních a tří rotačních složek s využitím kalibrace na základě tuhosti kostry (viz dále), jsou 4 vertikální snímače a 4 horizontální snímače. Výhodné je však použití většího sudého počtu snímačů, které jsou vždy uspořádány v rovnoběžných párech.

Seismické snímače mohou být různé konstrukce, předpokládá se použití standardních snímačů, které jsou odborníkům známy a které jsou běžně komerčně dostupné. Mohou se využívat jak snímače seismické rychlosti, např. geofony, tak snímače zrychlení, akceleroграфy. Snímače musí mít dostatečnou citlivost (alespoň v řádu $\mu\text{m/s}$ resp. $\mu\text{m/s}^2$) ve frekvenčním pásmu, které je předmětem měření, nízký šum (do 1 promile měřeného signálu) umožňující poměrně náročné následné zpracování signálu a velmi malou citlivost na vibrace na složkách, které jsou kolmé k měřené složce (např. vertikální snímače nesmějí být citlivé na horizontální vibrace více než v řádu 1 %). Pro dobrou funkci zařízení je výhodné, jestliže všechny použité seismické snímače jsou stejného typu, není to však podmínkou.

Optické dálkoměry jsou založeny na interferenci dvou koherentních paprsků laserového světla, které se získají rozkladem na polopropustném zrcátku a obsahují jako základní složky laserový zdroj, interferometr a koutový odražeč. Všechny komponenty optických dálkoměrů, s výjimkou koutových odražečů, jsou upevněny k tuhé kostře. Jeden paprsek se šíří ke koutovému odražeči, který je při měření umístěn v jisté vzdálenosti od kostry a je, stejně jako kostra, pevně spojen s podložím. Po odrazu od koutového odražeče se paprsek šíří zpět a zde interferuje s druhým referenčním paprskem, který se šíří pouze v rámci tuhé kostry. Změna interferenčních proužků je úměrná derivaci vzdálenosti mezi kostrou a koutovým odražečem a tedy také derivaci deformace podloží v tomto směru. Princip tohoto měření je odborníkům všeobecně znám a je používán po několik desetiletí. Přesnost tohoto měření je dána vlnovou délkou použitého laseru a vzdáleností koutového odražeče. Posun interferenčního obrazu o jeden proužek odpovídá změně vzdálenosti o půl vlnové délky.

Interferometr je v oboru známé zařízení, obvykle obsahuje odrazné zrcátko, polopropustné zrcátko a detektor.

Aby bylo možné rekonstruovat časovou derivaci horizontální deformace podloží je třeba alespoň čtyři měření vzdáleností v různých směrech, tzn., že na kostře musí být upevněny alespoň 4 dálkoměry (přičemž laserový zdroj může být výhodně jeden společný). V zařízení podle předloženého vynálezu se ale výhodně užívá větší množství směrů pro měření vzdáleností, které se pak kombinují se seismickými měřeními, a tím se zvyšuje jejich přesnost. Jako zdroje světla se výhodně používá jediného laserového modulu, který je soustavou polopropustných zrcátek, tzv. rozdělovačem, rozdělen do několika paprsků, které se šíří v různých směrech.

Koutové odražeče se používají standardně k zajištění toho, aby se laserový paprsek odrazil v opačném směru, než na koutový odražeč dopadl. Při měření s použitím zařízení podle vynálezu jsou tyto koutové odražeče rozmístěny v různých směrech od kostry a musí být pevně spojeny s podložím. Další důležitou podmínkou je zajištění přímé viditelnosti mezi kostrou a odražeči.

Opticko-mechanický senzorový systém podle předloženého vynálezu tedy obsahuje centrální část obsahující kostru se všemi na ni upevněnými prvky a periferní část obsahující prvky neupevněné ke kostře, tedy zejména koutové odražeče.

Registrační zařízení obsahuje digitizér a vlastní registrační zařízení, výhodně počítač. Signály ze seismických snímačů jsou analogové a je proto nutno je digitalizovat použitím A/D převodníku. Změny proužků interferometru se dají registrovat pomocí digitálních vstupů tak, že tmavý proužek představuje 0 a světlý 1. Měření se ukládá v registračním zařízení, např. výhodně v paměti počítače a poté mohou být data dále zpracována.

Pro plnohodnotné měření, tj. měření všech 9 složek, s využitím kalibrace na základě tuhosti kostry, jsou nutné minimální počty komponent a jejich uspořádání v zařízení podle předloženého vynálezu následující:

Čtyři horizontální snímače jsou na kostře uloženy tak, že spojnice jejich středu s těžištěm kostry je kolmá na směr, ve kterém snímač měří, přičemž jsou uspořádány ve dvou párech tak, že v

rámci jednoho páru jsou osy snímačů rovnoběžné a zároveň směry kolmé na osy snímačů v obou párech nejsou identické. Výhodně jsou od sebe vzdáleny o úhel, který není vysloveně malý; nejvýhodněji je úhel mezi nimi 90° .

- 5 Čtyři vertikální snímače uspořádané ve dvou párech tak, že spojnice snímačů v obou párech svírají navzájem úhel, který výhodně není vysloveně malý, nejvýhodněji je úhel mezi nimi shodný s úhlem mezi horizontálními snímači, tedy 90° .

- 10 Čtyři dálkoměry, obecně v libovolných 4 různých směrech, avšak ne sobě podobných a ne naproti sobě, tak aby pokud možno obsáhly „azimutálně“ celý kruh; přičemž nemusí být rovnoměrně, nemusí ani být shodné se směry párů mechanických snímačů.

Způsob zpracování měření

- 15 Základním vztahem, na němž je založeno zpracování naměřených signálů, je Taylorův rozvoj seismické rychlosti u_i podle prostorových souřadnic x_j v počátku souřadnic, který položíme do těžiště kostry přístroje. Platí přibližně:

$$u_i(x) \cong u_i(0) + \sum_{j=1}^3 u_{i,j}(0)x_j \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

20

Kde $u_{i,j}$ označuje derivaci i -té složky rychlosti u_i podle prostorové souřadnice x_j . Protože se měření odehrává v horizontální rovině na povrchu Země je $x_3 = 0$ a index j v (1) nabývá hodnot pouze 1 a 2.

- 25 Při zpracování signálů ze seismických snímačů je nutno uvážit frekvenční charakteristiku snímačů a určit skutečný pohyb v místě snímače. To je obvykle možné udělat jen v určitém pásmu frekvencí, které je závislé na použitém typu snímačů. Nejprve se proto provede filtrace seismogramů příslušným pásovým filtrem. Určení skutečných pohybů představuje provedení dekonvoluce naměřeného signálu s impulzní odezvou snímače. Tyto impulzní odezvy se získají na základě kalibrace pomocí otáčení přístroje při registraci opakovaných identických pulzů generovaných pomocí speciálního zařízení (např. zařízení podle patentu CZ 301218). Impulzní odezvy jsou poté určeny ještě přesněji na základě kalibrace, která je prováděna neustále během měření a která je umožněna tím, že v zařízení je k dispozici pro měření více seismických snímačů, než je měřených veličin. Podrobněji je způsob kalibrace popsán dále v samostatné části. Výsledkem je nalezení 3 translačních složek $u_i(0)$ a 3 rotačních složek $r_i(0)$ ve středu kostry, které jsou dány vztahy:
- 30
- 35

$$r_1(0) = \frac{1}{2}(u_{2,3} - u_{3,2}) \quad (2)$$

$$r_2(0) = \frac{1}{2}(u_{3,1} - u_{1,3})$$

$$r_3(0) = \frac{1}{2}(u_{1,2} - u_{2,1})$$

- 40 Dále se využijí měření vzdálenosti z dálkoměrů. V tomto případě není třeba provádět nápravu frekvenční charakteristiky. Aby měření bylo kompatibilní s měřením pomocí seismických snímačů, použije se stejný pásový filtr.

- 45 Necht' d je vzdálenost mezi středem kostry a koutovým odražečem a d_0 vzdálenost v nedeformovaném stavu. Tato vzdálenost se určí při instalaci přístroje s uvažováním předpokládaného rozsahu

vlnových délek registrovaných seismických vln tak, aby byla významně menší, než je nejkratší vlnová délka, ale zároveň nebyla vůči vlnové délce zanedbatelná. Ze vzorce (1) plyne:

$$d^2 - d_0^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (u_{i,j}(0)x_j)^2 \quad (3)$$

5

Jestliže se provádějí měření vzdálenosti v k různých směrech, získá se tak k rovnic typu (3), které lze použít pro výpočet.

10

Nyní se vyřeší numericky dohromady soustavy rovnic (2) a (3) a tak se naleznou složky tenzoru $u_{i,j}$. Nelze však najít složky $u_{i,3}$ protože ty se v žádné z rovnic neobjevují. To je dáno tím, že měření se provádí pouze v horizontální rovině a nelze tedy určit derivaci u_i podél hloubky, protože se měří jen na zemském povrchu. Celkem tedy tímto způsobem určíme 3 translační složky, a 6 složek tenzoru prvních derivací, celkem tedy 9 veličin. Na zemském povrchu je $u_{1,3} = u_{3,1}$ a $u_{2,3} = u_{3,2}$.

15

Samotné interferenční měření určí pouze velikost změny vzdálenosti mezi příslušným koutovým odražečem a těžištěm kostry, avšak nikoliv to, zda se vzdálenost zvětšila nebo zmenšila. Tuto informaci však lze snadno získat analýzou translačních složek měřených současně se složkami deformace.

20

Způsob kalibrace jednotlivých snímačů

25

Primárním výstupem seismických snímačů jsou signály z n vertikálních a m horizontálních snímačů, např. geofonů. Výstupy ze snímačů však nereprezentují skutečný pohyb půdy, protože jsou ovlivněny frekvenční charakteristikou snímačů. Cílem je změřit skutečný pohyb půdy v určitém frekvenčním pásmu. Proto se signály ze snímačů filtrují pásmovým filtrem a opravují se o frekvenční charakteristiku. Je výhodné, jestliže se používají seismické snímače stejného druhu. I v tomto případě se však frekvenční charakteristiky snímačů mohou lišit a to přibližně v řádu procent. Vzhledem k tomu, že zejména rotační složky jsou většinou velmi malé veličiny, může takový rozdíl v charakteristikách jednotlivých snímačů představovat vážný problém. Účelem kalibrace je tedy určit co nejpřesněji opravy frekvenční charakteristiky jednotlivých snímačů vzhledem k jednomu referenčnímu snímači v systému. Kalibrace je v takovém případě nedílnou součástí způsobu měření.

30

35

Dalším aspektem vynálezu je způsob kalibrace zařízení podle předloženého vynálezu. Kalibrace může být prováděna dvojím způsobem: 1) s využitím otáčení centrální části systému, resp. její tuhé kostry (zejména na začátku měření), 2) s využitím tuhosti kostry, tedy faktu, že více párů snímačů by díky tuhosti kostry mělo poskytovat stejné časové průběhy rotačních složek.

40

Kalibrace s využitím otáčení

45

Tato metoda využívá zdroje seismických vln, který generuje opakovaně identické pulzy. Další podmínkou je rozmístění seismických snímačů na kostře tak, aby se otočením o určitý úhel menší nebo rovný 180° získalo stejné geometrické uspořádání snímačů. Postup při realizaci této metody je následující. Kostra se umístí na tuhou podložku opatřenou fixačními elementy, např. důlky, která je pevně spojena se zemí. Přitom se spojí komplementární fixační elementy na kostře, např. výčnělky, s fixačními elementy na podložce, např. tedy výčnělky zapadnou do důlků. Do vhodné vzdálenosti od zařízení se umístí opakovatelný zdroj a vybudí se alespoň jeden, výhodně větší počet zdrojových pulzů. Poté se otočí kostra vůči podložce o definovaný úhel tak, aby se opět spojily příslušné fixační elementy a přitom se docílilo stejné konfigurace senzorového systému vůči poloze zdroje (až na pořadí jednotlivých snímačů v systému). Poté se opět vybudí alespoň jeden, výhodně více zdrojových pulzů. Celý postup se opakuje, čímž jednotlivé snímače opisují kruh, až se dostanou opět do výchozí polohy. Aritmetickým průměrem měřených rotací ve všech

50

polohách a pro všechny zdrojové pulzy se získá správná rotace odpovídající danému stále se opakujícímu zdrojovému signálu. Zároveň s tím se také získají opravy charakteristik jednotlivých snímačů tak, aby v každé poloze při otáčení poskytl tuto správnou rotaci.

5 Kalibrace in situ s využitím tuhosti kostry

Charakteristika jednotlivých snímačů je jednoznačně dána buď komplexní frekvenční charakteristikou (ve frekvenční oblasti) nebo impulzní odezvou snímače v časové oblasti. Při zpracování seismického signálu v zařízení podle předloženého vynálezu se výhodně užívá reprezentace pomocí impulzní odezvy.

Ve výhodném provedení vynálezu se používají jako seismické snímače geofony. Je ovšem možno použít i jiný typ seismických snímačů. V dalším popisu však pro jednoduchost bude popsána pouze kalibrace geofonů.

Geofon je tlumený oscilátor, jehož odezva rychlosti kmitání na impuls rychlosti kmitání půdy je dána třemi parametry, citlivostí A , vlastní frekvencí ω a tlumícím faktorem b . Předpokládá se, že geofon má dokritické tlumení. Pak lze impulzní odezvu pro $t > 0$ aproximovat vztahem

$$I(t) = Ae^{-bt} \sin(\omega t),$$

Příklad takové impulzní odezvy je na obr. 5. Parametry A , ω , b jsou blízko hodnotám A_0 , ω_0 , b_0 , které byly nalezeny při kalibraci například na začátku měření s využitím otáčení kostry zařízení nebo odpovídají hodnotám specifikovaným výrobcem. Vlivem změny teploty a tlaku, případně v důsledku stárnutí materiálu se však tyto parametry mohou pomalu měnit.

Vzhledem k tomu, že se používají dva typy geofonů (vertikální a horizontální), je možno úlohu určení 3 translačních a 3 rotačních složek rozdělit na dvě nezávislé dílčí úlohy:

- 1) Určit jednu translační složku (vertikální Z) a dvě rotační složky (náklony) z vertikálních geofonů, při jejich souběžné kalibraci.
- 2) Určit dvě translační složky (horizontální $N-S$ a $E-W$) a jednu rotační složku (torzi) z horizontálních geofonů, při jejich souběžné kalibraci.

Řešení první dílčí úlohy je následující:

Měřený signál z vertikálních geofonů $V(t)$ se nejprve zfiltruje pásmovým filtrem v požadovaném intervalu frekvencí. V prvním přiblížení geofony mají parametry A_0 , ω_0 , b_0 . Provede se dekonvoluce pro všechny vertikální geofony a získá se tak průběh rychlosti kmitání:

$$v(t) = V(t) \otimes A_0 e^{-b_0 t} \sin(\omega_0 t),$$

kde symbol $\otimes$ označuje dekonvoluci a $v(t)$ je skutečný pohyb půdy. Pokud je kalibrace přesná, pak se časový průběh vertikální translační složky v těžišti geofonů, $\bar{v}_3(t)$ určí jako:

$$\bar{v}_3(t) = \frac{\sum_{i=1}^n v^i(t)}{n}.$$

Rotační složky $r_1(t)$, $r_2(t)$ se určí vyřešením soustavy rovnic

$$v^j(t) = \bar{v}_3(t) + r_2(t)x_1^j + r_1(t)x_2^j \quad (4)$$

Kde x_1^i, x_2^i jsou souřadnice i -tého snímače (počátek souřadnic je v těžišti).

Protože snímače jsou alespoň 4, je tato soustava přeurčená. Optimální řešení se nalezne pomocí Newtonovy metody. Pak lze spočítat residua, tj. rozdíl mezi zadanými a vypočtenými hodnotami $v^i(t)$ v soustavě (4). V případě, že je kalibrace správná, jsou všechna residua nulová.

Na tento výpočet lze pohlížet tak, že residua v soustavě (4) jsou funkcí kalibračních parametrů geofonů. Pokud jsou správné kalibrační parametry A, ω, b jsou residua nulová. Tyto parametry jsou navíc stejné pro každý čas t během intervalu měření. Pokud je tedy v seismogramu k bodů, pak existuje kn rovnic pro $3n$ kalibračních parametrů. Další vazební podmínkou je, že výsledné parametry by se neměly příliš lišit od startovacích parametrů A_0, ω_0, b_0 . Tento typ úloh se řeší pomocí numerických metod, založených na teorii obrácených úloh. Jednou z výhodných metod, kterou lze využít, je isometrická metoda (Málek, J., Růžek, B., and Kolář, P. (2007). Isometric method: Efficient tool for solving non-linear inverse problems. Stud. Geophys. Geod., 51:469 – 490.).

Obdobně se postupuje při řešení druhé dílčí úlohy pro horizontální geofony:

Horizontální geofony se umísťují na kostru tak, že spojnice jejich středu s těžištěm je kolmá na směr, ve kterém geofon měří. Zaznamenaný signál z horizontálních geofonů $H(t)$ se nejprve zfiltruje pásmovým filtrem v požadovaném intervalu frekvencí. Opět v prvním přiblížení mají geofony parametry A_0, ω_0, b_0 . Proveďte dekonvoluce pro všechny horizontální geofony a získá se průběh rychlosti kmitání:

$$h(t) = H(t) \otimes A_0 e^{-b_0 t} \sin(\omega_0 t) .$$

Pokud je kalibrace přesná, pak se časový průběh horizontálních translačních složek $\bar{v}_1(t)$ a $\bar{v}_2(t)$ těžišti geofonů určí:

$$\bar{v}_1(t) = \frac{\sum_{i=1}^m h^i(t) \cos(\phi^i)}{\sum_{i=1}^n \cos(\phi^i)} ,$$

$$\bar{v}_2(t) = \frac{\sum_{i=1}^m h^i(t) \sin(\phi^i)}{\sum_{i=1}^n \sin(\phi^i)} ,$$

kde i je index geofonů a ϕ je úhel, který svírá i -tý geofon s osou x_1 .

Dále se určí velikost horizontální složky v místě snímače za předpokladu, že rotační složka $r_3(t)$ je nulová:

$$\bar{h}^i(t) = \bar{v}_1(t) \cos(\phi^i) + \bar{v}_2(t) \sin(\phi^i) .$$

Rotační složka $r_3(t)$ se pak určí ze soustavy rovnic

$$h^i(t) = \bar{h}^i(t) + r_3(t) \rho_i , \tag{5}$$

Kde $\rho_i = \sqrt{(x_1^i)^2 + (x_2^i)^2}$ je vzdálenost středu snímače od těžiště.

Spočítají se residua, tj. rozdíl mezi měřenými a vypočtenými hodnotami $h'(t)$ v soustavě (5). V případě, že je kalibrace správná, jsou všechna residua nulová.

Stejně jako v případě vertikálních geofonů jsou residua v soustavě (5) funkcí kalibračních parametrů geofonů. Pokud jsou správné kalibrační parametry A , ω , b , jsou residua nulová pro každý čas t . Dále se požaduje, aby se výsledné parametry příliš nelišily od startovacích parametrů A_0 , ω_0 , b_0 . Tato úloha se opět řeší pomocí numerických metod, založených na teorii obrácených úloh.

Způsob měření zahrnující alespoň kroky výše popsané kalibrační metody, výhodně obou kalibračních metod, může být výhodně realizován pomocí programu pro počítač.

Objasnění výkresů

Obr. 1: Schematické znázornění výhodného provedení devítisložkového opticko–mechanického sensorového systému pro měření seismických pohybů půdy, kde centrální část systému obsahuje kostru, laser, interferometry a seismické senzory (nejsou znázorněny) a periferní část, nespojená s

Obr. 2: Schematické znázornění výhodného provedení centrální části devítisložkového opticko–mechanického sensorového systému pro měření seismických pohybů půdy, umístěné na podložce pro kalibraci opatřené hroty pro pevné spojení s podloží, kde kostra je pevně, ale rozpojitelně spojena s podložkou. Centrální část systému obsahuje kromě seismických senzorů i laser a interferometry (nejsou znázorněny).

Obr. 3: Schéma výhodného uspořádání dálkoměrů s laserem, interferometrem a koutovým odražečem, kde interferometr obsahuje odrazné zrcátko, polopropustné zrcátko a detektor.

Obr. 4: Schéma výhodného provedení pevné podložky umožňující otáčení centrální části systému, resp. její pevné kostry o přesně definovaný úhel (zde konkrétně 15°) pro kalibraci jednotlivých snímačů za použití opakovatelného zdroje budicího identické zdrojové pulzy.

Obr. 5: Schematické znázornění výhodného způsobu kalibrace za pomoci otáčení tuhé kostry centrální části systému při využití stabilně umístěného opakovatelného zdroje seismických pulzů.

Obr. 6: Příklad impulzní odezvy jednotlivého snímače v mechanické části sensorového systému.

Obr. 7: Porovnání dvou metod kalibrace: metoda s využitím opakovatelného zdroje a otáčení tuhé kostry vůči podložce (tečkovaná čára) a metoda využívající tuhost kostry přístroje (plná čára).

Příklady uskutečnění vynálezu

Příklad 1

Opticko–mechanický sensorový systém pro měření seismických pohybů půdy

Výhodné provedení zařízení, opticko–mechanického seismického sensorového systému OMS, který umožňuje měřit 9 stupňů volnosti seismického pohybu, je schematicky znázorněno na obr.

1 a obr. 2. Systém je tvořen centrální částí R a periferní částí KO. Centrální část R obsahuje tuhou nedeformovatelnou kostru K, laserový zdroj L (TTL modrý 1000 mW 445 nm, ECLIPSE s.r.o., Česká republika) s rozdělovačem paprsků, osm horizontálních snímačů Gh a osm vertikálních snímačů Gv (geofony SM-6, 3500 Ohm, ION GX Technology, Nizozemsko), které jsou rozmístěny v rovnoběžných párech po obvodu kruhové pevné kostry K ve vrcholech pravidelného osmiúhelníku. Dále je kostra K osazena osmi laserovými interferometry Z (10715A Differential Interferometer, Keysight Technologies, USA), pro měření změny vzdálenosti mezi kostrou K a příslušnými osmi koutovými odražeči KO (CCP-15B-2, Lambda Research Optics Inc., USA). Koutové odražeče KO jsou součástmi periferní části systému OMS a při měření spojenými s podloží. Kostra K centrální části R je ve tvaru disku o průměru 44,5 cm a tloušťce 5 cm a je vyrobena z duralu včetně držáků, ve kterých jsou upevněny geofony Gh, Gv. Držáky jsou ve tvaru válcových objímek.

Laserový zdroj L s rozdělovačem paprsků rozděluje paprsky do osmi směrů v úhlu 45°. Na obr. 1 je také znázorněn paprsek 1 jdoucí od zdroje směrem ke koutovému odražeči KO a paprsek 2 odražený od koutového odražeče KO jdoucí zpět k interferometru Z.

Detail provedení interferometru Z je uveden na obr. 2. Laserový paprsek je rozdělen na polopropustném zrcátku PZ na dva paprsky. První se odráží od zrcátka OZ, které je upevněno ke kostře K. Druhý se odráží od koutového odražeče KO, který je při měření upevněn k podloží a pohybuje se tedy společně s podložím. V detektoru D vznikají interferencí obou paprsků interferenční proužky, jejichž pohyb závisí na pohybu koutového odražeče KO. Princip vzniku těchto proužků a jejich interpretace pro měření vzdálenosti je známý ve stavu techniky.

Systém OMS dále výhodně obsahuje 24bitový digitizér (není znázorněn na obrázku, Embedded Electronics & Solutions, Ltd., Česká republika), který je také připevněn k centrální části R, resp. její kostře K. Z digitizéru jsou data přenášena do registračního počítače CPU Intel Atom Dual Core N2600 (Embedded Electronics & Solutions, Ltd., Česká republika) pomocí kabelu USB, který slouží zároveň k napájení celého zařízení R.

Pro kalibraci, případně i pro vlastní měření, je centrální část R uložena na pevnou podložku P. Výhodné provedení takové pevné podložky P je znázorněno na Obr. 4. Podložka P ve tvaru kruhové desky o poloměru 40 cm je vyrobena z duralu s předvrtanými otvory O1, O2, O3 a O4 a důlky D umožňující otáčení pevné kostry K o přesně definovaný úhel (zde konkrétně 15°), což se využívá při kalibraci jednotlivých snímačů Gv a Gh za použití opakovatelného zdroje budícího identické zdrojové pulzy. Důlky D jsou rozmístěny v blízkosti vnějšího okraje podložky. Otvory O1, O2, O3 a O4 mají navzájem různé průměry a jejich sekvence se pravidelně třikrát opakuje po obvodu kruhové podložky P. Toto uspořádání je výhodné kvůli použití tří hrotů H (viz obr. 3) s pravidelným úhlovým rozestupem 60° vůči středu podložky P určených k fixaci podložky P k zemi, podlaze apod. průchozími hroty o různé tloušťce vhodné pro různé materiály nacházející se pod podložkou P. Ve středu podložky P je otvor O5 pro šroub S (viz obr. 3) sloužící pro fixaci tuhé kostry K k podložce P.

Příklad 2

Měření s kalibrací zařízení

Metoda kalibrace systému OMS popsaného v příkladu 1, která využívá otáčení centrální části R při opakovaném generování identických seismických pulzů ze speciálního zařízení (výhodně generátoru rotačních seismických pulzů podle patentu CZ 301218), je demonstrována na obr. 4. Během kalibrace projde každý z vertikálních geofonů Gv a horizontálních geofonů Gh osmi polohami. Jak ukazuje obr. 4, vertikální snímač Gv a horizontální snímač Gh (na obr. 3 zvýrazněny tmavší barvou) při postupném otáčení do osmi poloh o úhel 45° opíší celý kruh vůči fixní polo-

ze zdroje. Šipka G naznačuje neměnný směr od stabilně umístěného zdroje opakovatelných seismických pulzů.

- 5 Sečtením všech měření se získá osm seismogramů, které jsou ekvivalentní měření s identickými snímači s průměrnou frekvenční charakteristikou. Porovnáním s jednotlivými měřeními se pak získají frekvenční charakteristiky jednotlivých geofonů Gv, Gh.

- 10 K tomuto měření je potřeba podložka P, která zajišťuje přesné otáčení centrální části R systému OMS. Výhodné provedení podložky bylo popsáno v příkladu 1 a je znázorněno na obr. 5. V podložce P po obvodu dĺlky D po 15 stupních, do kterých zapadají při otáčení tři výčnělky na spodní straně kostry K. Kostra K se pootočí vždy o 45° (tedy o 3 dĺlky). Podložka P se připevňuje do půdy pomocí hrotů H, např. speciálních půdních vrutů. Kostra K je k podložce P fixována šroubem S procházejícím otvorem O5. Příklad impulzní odezvy geofonů, který reprezentuje kalibraci pro konkrétní geofon Gv, Gh je uveden na obr. 6. Geofon se chová jako tlumený oscilátor s do-
15 kritickým tlumením, jehož odezva rychlosti kmitání na impuls rychlosti kmitání půdy je pro $t > 0$ dána třemi parametry, citlivostí A , vlastní frekvencí ω a tlumícím faktorem b

$$I(t) = Ae^{-bt} \sin(\omega t).$$

- 20 Obr. 6. demonstruje průběh časové závislosti impulzní odezvy geofonů s parametry $A = 3,5$ mm/s, $\omega = 1$ rad/s, $b = 0,9$, které se následně mohou použít při metodě kalibrace jednotlivých snímačů s využitím tuhosti kostry. Naměřené impulzní odezvy jsou pak startovacím modelem při kalibraci *in situ* během provozu zařízení R.
- 25 Signály z geofonů Gv, Gh jsou pomocí stíněných kabelů přenášeny do 24-bitového digitizéru (který je také výhodně připevněn ke kostře K). Z digitizéru jsou data přenášena do registračního počítače pomocí kabelu USB, který slouží zároveň k napájení celé centrální části R systému OMS.
- 30 Po výše popsané kalibraci byl měřicí systém OMS připraven pro měření. Byla provedena úspěšně zkušební měření. Příklad porovnání rotačního seismogramu, který byl získán při použití obou způsobů kalibrace, je uveden na obr. 7. Tečkovaná čára znázorňuje časový průběh rychlosti rota-
ce půdy kolem vertikální osy získaný při kalibraci metodou s využitím opakovatelného zdroje a
otáčení tuhé kostry K vůči podložce P pevně fixované k zemi a plnou čárou je znázorněn tentýž
35 časový průběh, avšak získaný při kalibraci metodou využívající tuhosti kostry K centrální části R systému OMS.

40

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Opticko-mechanický seismický senzorový systém (OMS) obsahující tuhou nedeformovatelnou kostru (K), alespoň čtyři horizontální seismické snímače (Gh) a alespoň čtyři vertikální seismické snímače (Gv) pevně spojené s kostrou (K), **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že obsahuje alespoň čtyři optické dálkoměry, obsahující alespoň jeden laserový zdroj (L), alespoň 4 laserové interferometry (Z) a alespoň čtyři koutové odražeče (KO), kde alespoň jeden laserový zdroj (L) a laserové interferometry (Z) jsou pevně spojeny s tuhou kostrou (K), která tak se všemi s ní pevně
50 spojenými prvky (Gh, Gv, L, Z) tvoří centrální část (R) senzorového systému (OMS), a koutové odražeče (KO) nejsou spojeny s kostrou (K) a tvoří periferní část senzorového systému (OMS), přičemž horizontální snímače (Gh) jsou na kostře (K) uloženy tak, že spojnice jejich středu s těžištěm kostry (K) je kolmá na směr, ve kterém snímač (Gh) měří, přičemž jsou uspořádány v párech tak, že v rámci jednoho páru jsou osy snímačů (Gh) rovnoběžné a zároveň směry kolmé
55 na osy snímačů (Gh) v párech nejsou identické, vertikální snímače (Gv) jsou uspořádány v pá-

rech tak, ze spojnice snímačů (Gv) v párech svírají navzájem úhel, který je shodný s úhlem mezi horizontálními snímači (Gh), a dálkoměry jsou uspořádány pro měření v libovolných navzájem odlišných směrech.

5 **2.** Opticko–mechanický seismický sensorový systém (OMS) podle nároku 1, **v y z n a ě u j í - c í s e t í m**, že obsahuje centrální část (R) obsahující osm horizontálních snímačů (Gh), osm vertikálních snímačů (Gv), osm interferometrů (Z) a jeden společný laserový zdroj (L) opatřený rozdělovačem, a periferní část obsahující osm koutových odražečů (KO), přičemž snímače (Gh, Gv) a interferometry (Z) jsou rozmístěny po obvodu tuhé kostry (K) ve tvaru disku ve vrcholech pravidelného osmiúhelníku.

3. Opticko–mechanický seismický sensorový systém (OMS) podle nároku 1 nebo 2, **v y - z n a ě u j í c í s e t í m**, že všechny senzory (Gh, Gv) jsou geofony stejného typu.

15 **4.** Opticko–mechanický seismický sensorový systém (OMS) podle nároku 1 nebo 2, **v y - z n a ě u j í c í s e t í m**, že všechny senzory (Gh, Gv) jsou akcelerometry stejného typu.

5. Opticko–mechanický seismický sensorový systém (OMS) podle kteréhokoliv z nároků 1 až 4, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že kostra (K) je opatřena alespoň jedním prostředkem pro pevné spojení s podložím a/nebo pevné, ale rozpojitelné spojení s tuhou nedeformovatelnou podložkou (P).

25 **6.** Opticko–mechanický seismický sensorový systém (OMS) podle kteréhokoliv z předchozích nároků 1 až 5, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že dále obsahuje tuhou nedeformovatelnou podložku (P), která je pevně spojitelná s podložím, přičemž kostra (K) a podložka (P) jsou opatřeny vzájemně komplementárními fixačními elementy a alespoň jedním prostředkem (S) pro pevné, ale rozpojitelné spojení kostry (K) s podložkou (P).

30 **7.** Způsob seismického měření, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že se použije opticko–mechanický seismický sensorový systém (OMS) podle kteréhokoliv z předchozích nároků 1 až 6 pro současné a souměrné měření translačních, rotačních a deformačních složek seismických pohybů.

8. Způsob seismického měření podle nároku 7, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že dále obsahuje kroky kalibrace, kdy

35 a) kostra (K) centrální části (R) systému (OMS) se umístí na tuhou podložku (P) pevně spojenou s podložím, do vhodné vzdálenosti od systému (OMS) se umístí opakovatelný zdroj seismických pulzů, výhodně generátor rotačních seismických pulzů, a vybudí se alespoň jeden zdrojový pulz,

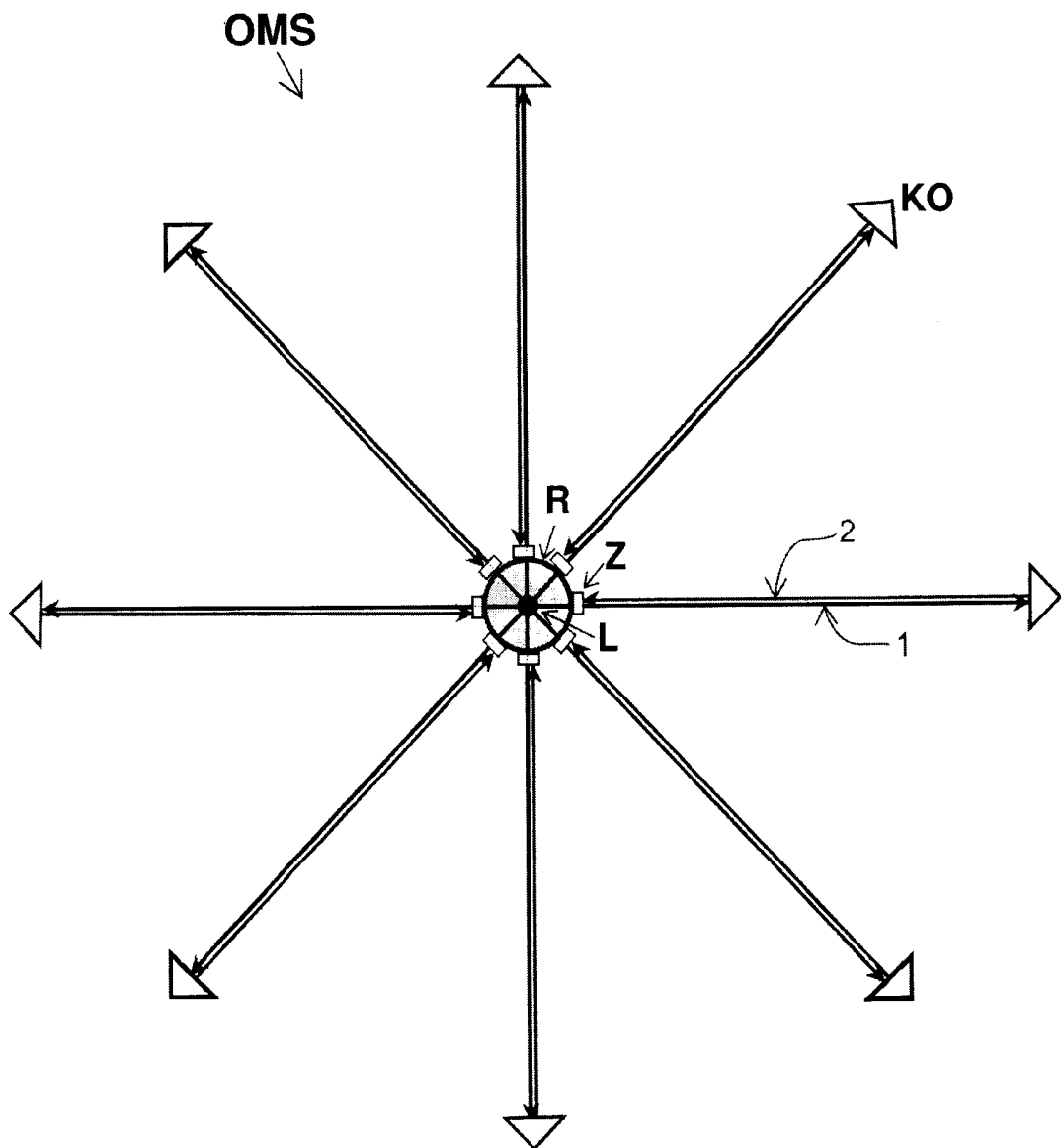
40 b) kostra (K) se otočí vůči podložce (P) o definovaný úhel tak, že je dosaženo stejné konfigurace centrální části (R) vůči poloze zdroje seismických pulzů, až na pořadí jednotlivých snímačů (Gh, Gv), a poté se opět vybudí alespoň jeden zdrojový pulz,

c) postup podle bodu b) se opakuje pro všechny polohy, čímž jednotlivé snímače (Gh, Gv) opisují kruh, až se dostanou opět do výchozí polohy,

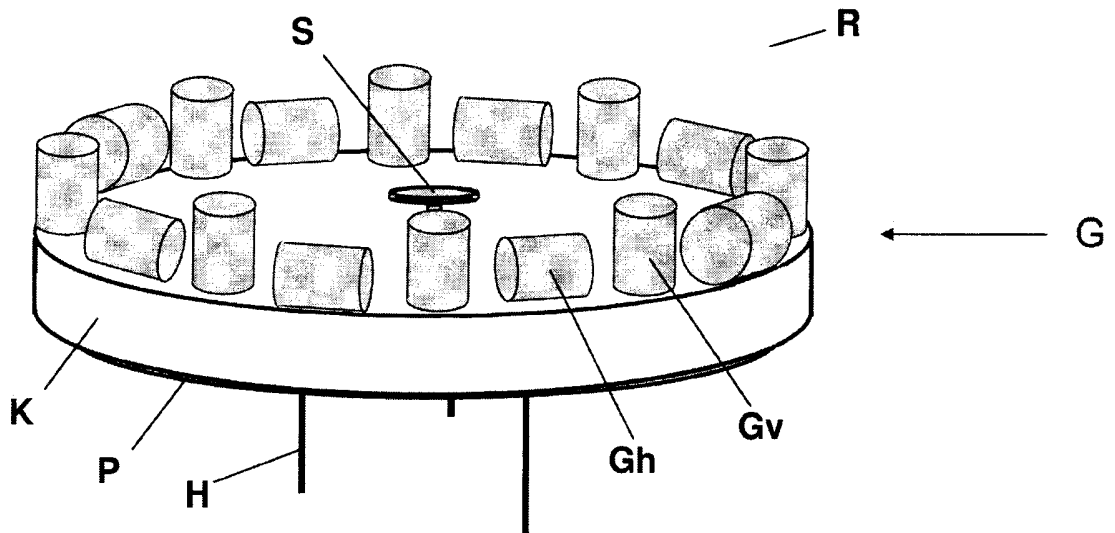
45 d) správná hodnota rotace odpovídající danému stále se opakujícímu zdrojovému signálu se získá aritmetickým průměrem měřených rotací ve všech polohách a pro všechny zdrojové pulzy a charakteristiky jednotlivých snímačů (Gh, Gv) se opraví tak, že v každé poloze při otáčení poskytují tuto správnou rotaci.

50

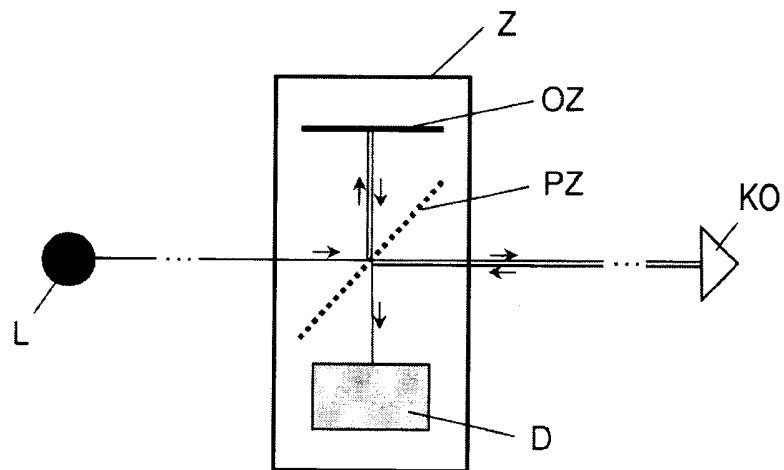
Obr. 1



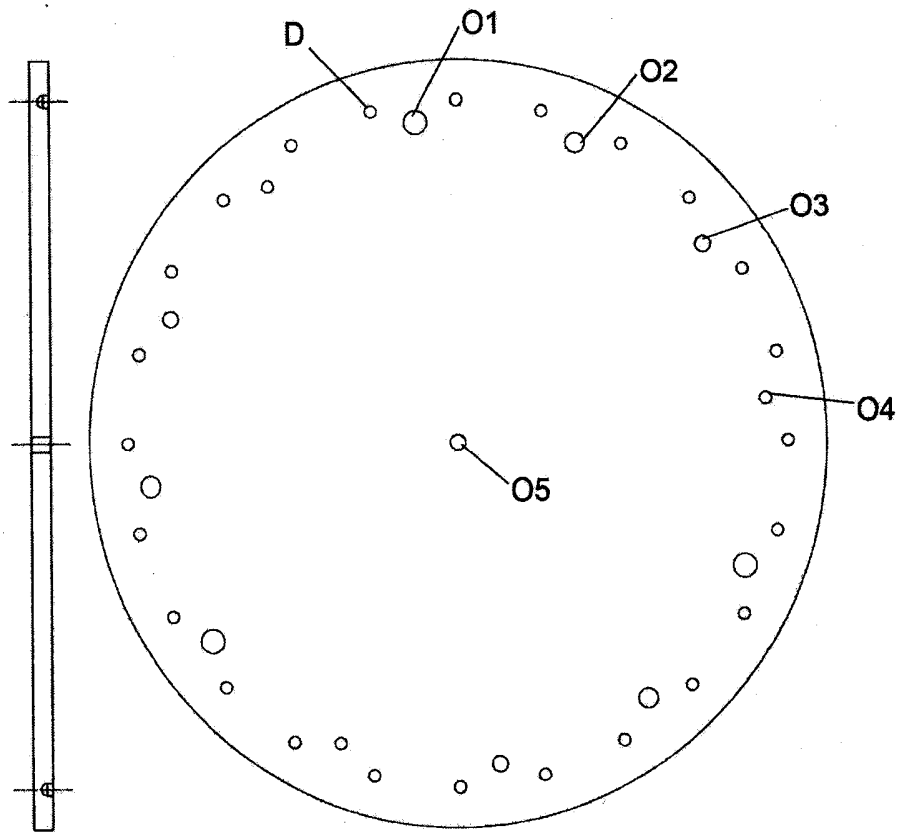
Obr. 2



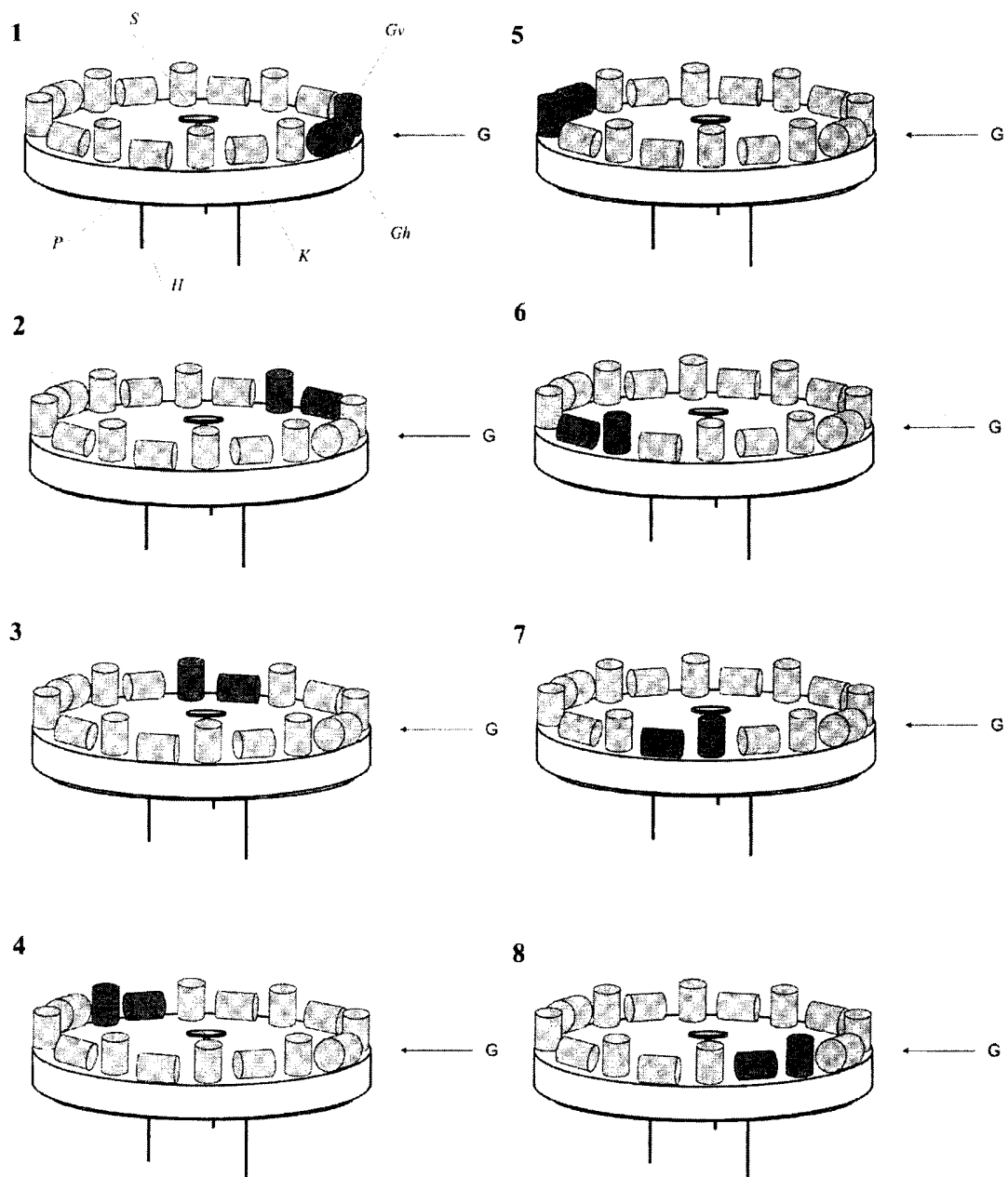
Obr. 3



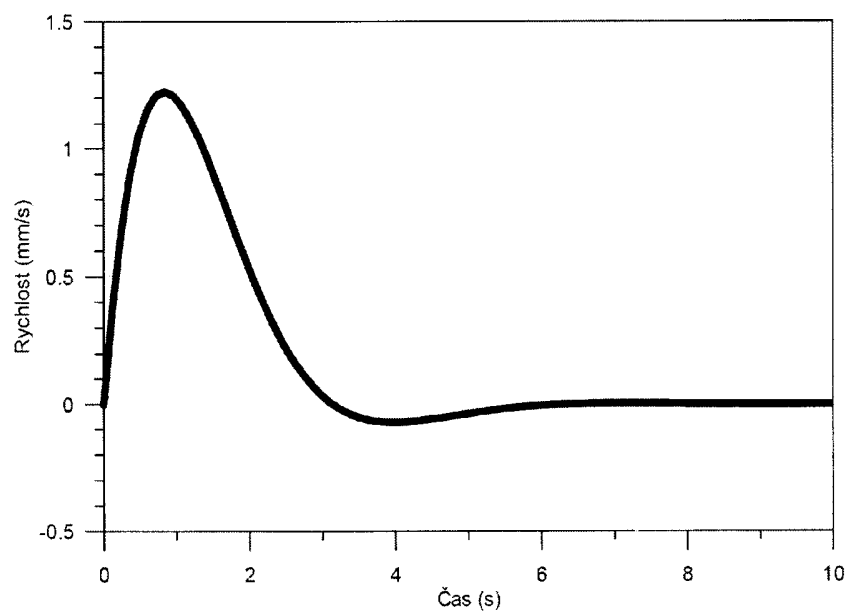
Obr. 4



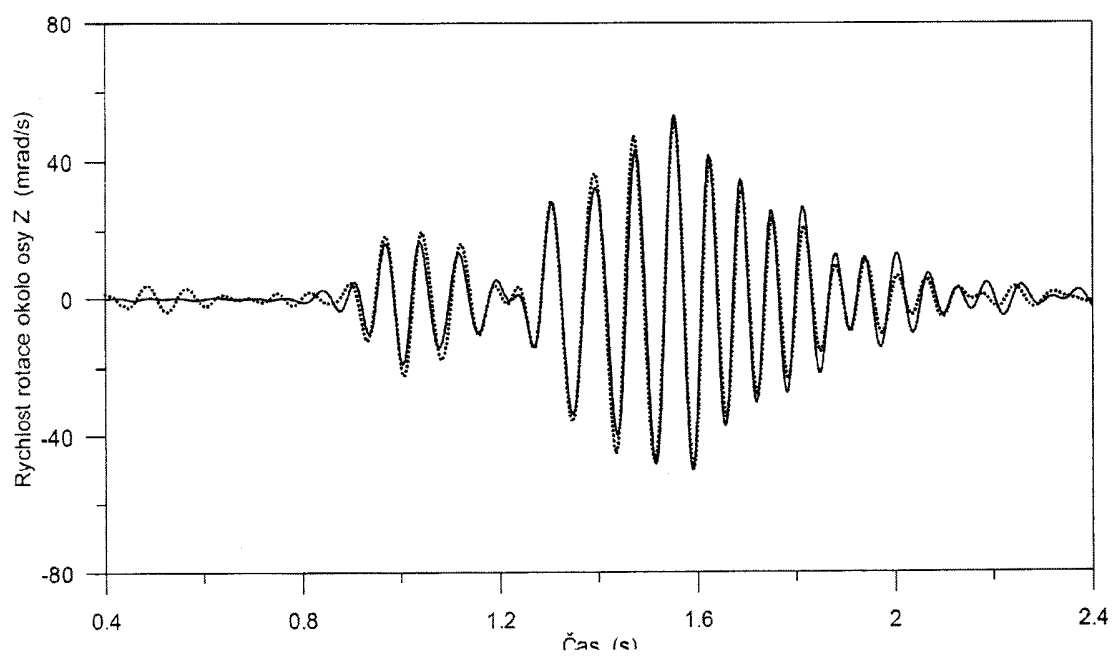
Obr. 5



Obr. 6



Obr. 7



Konec dokumentu