

Principy simultánního použití dvou radarů pro učení průhybů mostních konstrukcí pomocí radarové interferometrie

Ing. Milan Talich, Ph.D.,
Ing. Jan Havrlant, Ph.D.,
Ing. Filip Antoš, Dr. Ing. Lubomír Soukup,
Ústav teorie informace a automatizace,
Akademie věd České republiky

Abstrakt

V posledních 10 letech se stala pozemní radarová interferometrie často používanou technologií pro určování dynamických průhybů mostních konstrukcí vyvolaných průjezdem vozidel. Při měření pouze jednou radarovou aparaturou je nutné předpokládat průhyb konstrukce v jednom konkrétním směru, obvykle vertikálním. Tento předpoklad však nemusí vždy odpovídat skutečnosti. Pokud jsou použity dva radary, může být nezbytný předpoklad průhybů ve zvoleném směru redukován na předpoklad průhybů ve zvolené rovině. V příspěvku je uvedena nezbytná teorie a praktický příklad určení průhybu mostních konstrukcí měřením dvěma radarovými aparaturami v terénu.

Principles of Simultaneous Use of Two Radars in Determining the Deflection of Bridge Structures by Radar Interferometry

Abstract

Over the past 10 years, ground-based radar interferometry has become a frequently used technology for determining dynamic deflections of bridge structures induced by vehicle passages. When measuring with only one radar device, the deflection of the structure in one particular direction, usually vertical, is assumed. However, this assumption may not always correspond to reality. If two radars are used, the necessary deflection assumption in the selected direction can be reduced to the deflection assumption in the selected plane. The necessary theory and the practical examples of deflection determination of bridge structures by measuring with two radar devices in the field are presented.

Keywords: bridge monitoring, interferometric radar, GB-RAR, structural health monitoring (SHM), dynamic deformation monitoring

1. Úvod

Pozemní radarová interferometrie s reálnou aperturou (GB-RAR nebo GB InRAR) se za posledních 10 let stala často používanou technologií pro stanovení dynamických průhybů mostních konstrukcí vyvolaných průjezdy vozidel. Tato metoda má schopnost měřit v reálném čase průhyby pro krátkodobé a dlouhodobé zatížení v běžném provozu (např. průjezd vozidel nebo naopak stojící kolony vozidel či zátěžové testy). Dále dokáže dynamicky zachytit a detekovat frekvenci a amplitudu vibrační sledovaného objektu ve frekvenčním rozsahu od 0 do 50 Hz. Tato metoda má schopnost určit velikost průhybu s přesností lepší než 0,1 mm. Průhyby mostu lze současně měřit na více místech. Je možné získat obecné i podrobné informace o chování konstrukce při jejím dynamickém zatížení. Například na mostě o délce 100 m je možné současně sledovat až cca 100 bodů (např. příčných nosníků). Základní principy a příklady použití technologie GB-RAR pro stanovení průhybu mostů jsou uvedeny např. v [1]; [2]; [3]; [4]; [5]. Příklad použití technologie GB-RAR pro stanovení průhybů kovových konstrukcí železničních mostů způsobených jak teplotními změnami, tak průjezdy vozidel (dynamickým zatížením) je uveden v [6]. Tato technologie je však velmi často využívána i pro sledování dalších objektů. Například monitorování komunikačních věží a městských budov je uvedeno v [7]; [8] a monitorování vodojemů, továrních komínů a stožárů větrných elektráren je uvedeno v [9]. Společné použití pozemního laserového skeneru (TLS) konfigurovaného v režimu profilového skeneru a technologie GB-RAR pro monitorování frekvencí vynuceného kmitání

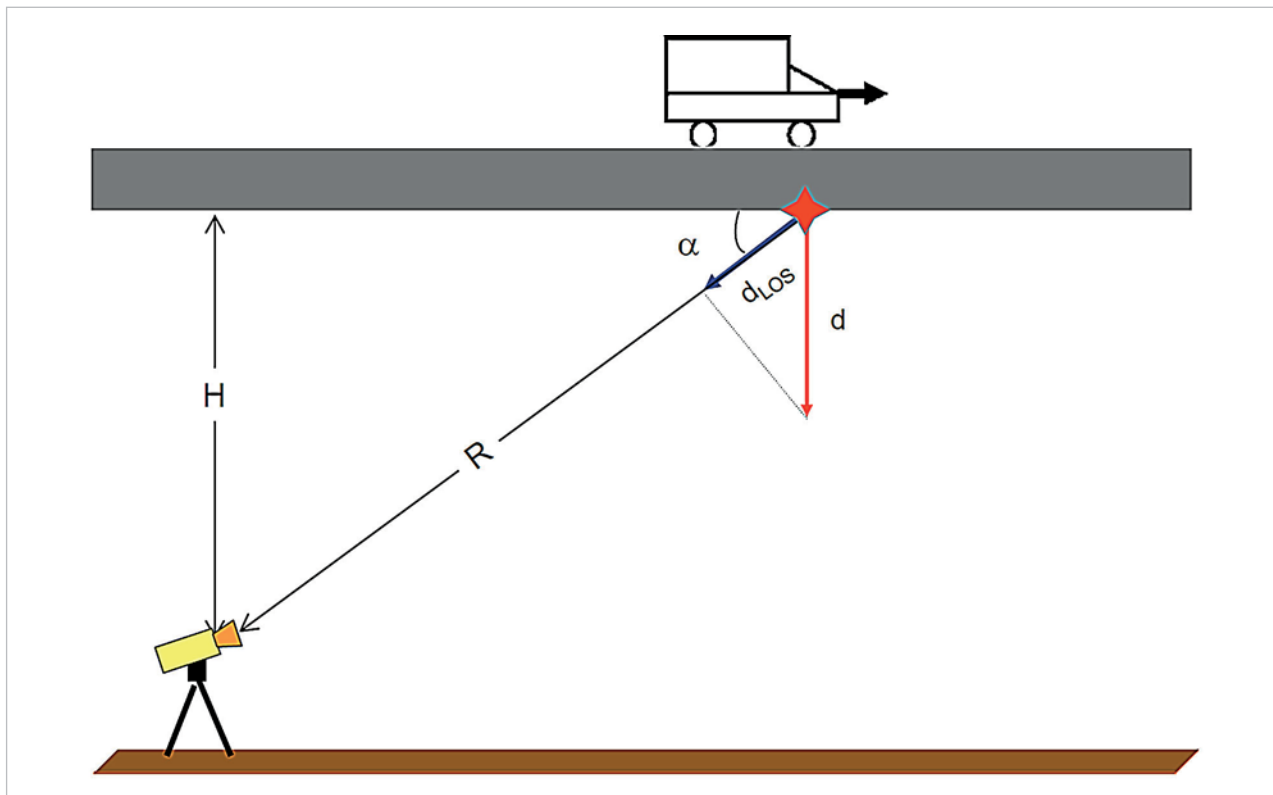
a amplitud vynuceného kmitání vysokých konstrukcí je uvedeno v [10]. Velmi dobrý přehled o schopnosti používat technologii globálních navigačních družicových systémů (GNSS) pro dynamické monitorování stavu staveb spolu s dalšími technologiemi jako jsou akcelerometry a robotické totální stanice (RTS) je uveden v [11].

Příspěvek je zaměřen na měření průhybů mostů dvěma interferometrickými radary IBIS-FS italského výrobce IDS - Ingegneria Dei Sistemi. Více podrobností o tomto přístroji je například v [12] nebo [13].

Jedním ze základních nedostatků metody GB-RAR je, že radar měří pouze posuny bodů ve směru záměry (line of sight - LOS) a ty jsou přepočítávány do očekávaného směru posunů. V případě mostů je očekávaný směr obvykle svislý. Geometrická situace je znázorněna na obr. 1. Předpokládané skutečné posunutí se vypočítá podle vzorce:

$$d = d_{LOS} \cdot \frac{R}{H} \quad (1)$$

Předpoklad pouze svislého posunu však nemusí být splněn a zpravidla splněn ani není. Důvodem je například to, že mosty často nejsou vodorovné nebo nejsou přímé. Pak dochází současně k výrazným podélným nebo příčným posunům v důsledku kroucení při vertikálním průhybu. Je proto nutné navrhnout nové postupy pro měření a zpracování naměřených posunů LOS, aby bylo možné detekovat a určit skutečné směry a velikosti skutečných posunů. Schopnost měřit dvěma nebo více radarovými aparaturami současně by tento nedostatek dokázala překonat pravděpodobně neúčinnějším způsobem. I tento nedostatek je možné odstranit pomocí výpočtového mo-



Obr. 1 Posuny ve směru měření (dLOS) a skutečné (svislé) posuny (d)

delu mostu. Ten však v drtivě většině případů není dostupný, a i tak jsou jeho možnosti omezené a méně přesné. Souběžná měření dvěma radary jsou v běžně dostupné odborné literatuře zmíněna jen zřídka. V [13] je uveden pouze princip výpočtu skutečných posunů při měření dvěma radary. Není zde zmíněna problematika časové synchronizace měření, která je klíčová pro správný výpočet reálných (celkových) posunů.

2. Základní principy GB-RAR s dvěma radary IBIS-S

Současné měření dvěma radary přináší několik technických problémů, které je třeba vyřešit. Jde především o určení prostorové konfigurace radarů a měřeného mostu umožňující výpočet skutečných posunů. Dále je to časová synchronizace měření obou radarů.

2.1 Metoda výpočtu podélných a svislých posunů

Pokud předpokládáme, že se mostovka pohybuje pouze ve svislém směru, je nutné naměřená posunutí ve směru LOS přepočítat do skutečného posunutí ve svislém směru. Pro výpočet posunutí je třeba pro každý bod měření použít vzorec (1). Tento jednoduchý výpočet může být snadno automaticky proveden softwarem radaru IBIS FS.

Pokud předpokládáme, že se mostovka pohybuje ve dvou směrech (v podélném a svislém), je možné současným měřením dvěma radary určit skutečné posuny a jejich jednotlivé složky. Obr. 2 ukazuje geometrické vztahy mezi posuny LOS a skutečnými posuny bodu měření z dvou různých radarových pozic.

Podélné a vertikální složky vektoru posunutí jsou funkcí vertikálních úhlů radarových směrů a naměřených posunů v těchto směrech (posuny LOS). Lze je vypočítat pomocí vzorců (2):

$$s_x = \frac{t_1 \sin(\psi_2) - t_2 \sin(\psi_1)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}$$

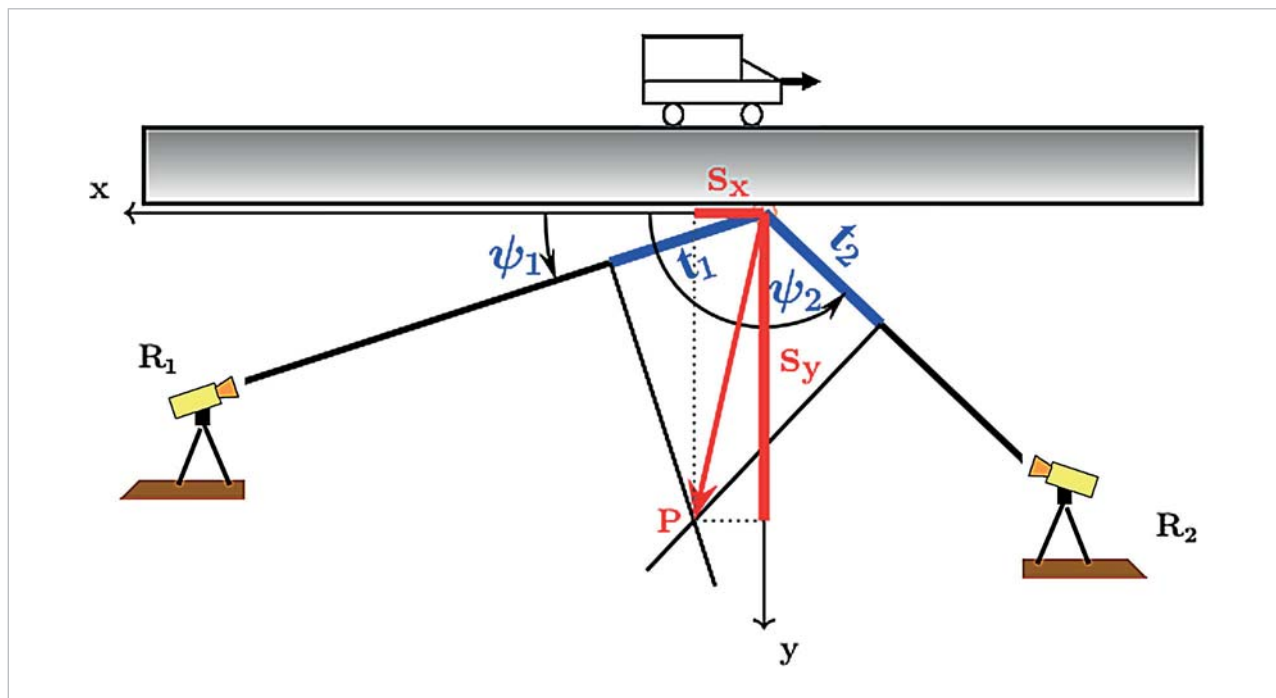
$$s_y = \frac{-t_1 \cos(\psi_2) + t_2 \cos(\psi_1)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}$$
(2)

kde s_x a s_y jsou složky posunů (podélné a svislé), t_1 a t_2 jsou měřené posuny ve směru LOS, ψ_1 a ψ_2 jsou svislé úhly směru radaru.

Souřadnicový systém použitý pro složky skutečného vektoru posunutí má osu X horizontální (ve směru osy mostu) a osu Y vertikální (směřující dolů).

Tímto způsobem je možné určit podélnou a svislou složku skutečného posunutí sledovaného bodu. Protože však software IBIS Data Viewer dodávaný s radarovým zařízením neumožňuje vyhodnocení multiradarových měření, je nutné data (posuny LOS) exportovat ze softwaru IBIS a následně je zpracovat jiným vhodným softwarem.

Podstatným omezením tohoto postupu měření je možnost interakce signálů obou radarů. K této interakci může dojít především tehdy, když jsou radarové antény nasměrovány přibližně proti sobě. V takovém případě je každý radar ovlivněn signálem druhého radaru a nedokáže rozlišit cizí signál od vlastního signálu odraženého od objektu. Tento efekt je sice možné částečně snížit umístěním radarů v pozici za sebou a v dostatečné vzdálenosti, ale přináší to zase snížení přesnosti v určení výsledných posunů.



Obr. 2 Určení svislých (S_y) a podélných (S_x) složek skutečných posunů dvěma radary

2.2 Časová synchronizace dvou radarů

Při měření dvěma radary vzniká praktický problém, jak k sobě přiřadit odpovídající si posuny měřené současně ve dvou různých časových řadách s dvěma různými hodinami. Aby se zjistila časová korespondence získaných posunů LOS, musí se proto obě časové řady synchronizovat. Pokud se měření provádí se vzorkovací frekvencí 200 Hz, pak musí být synchronizace provedena s odpovídající přesností, tedy $\pm 0,0025$ s.

Jedno z možných řešení synchronizace je založeno na identifikaci maximálních hodnot výchylek v obou časových řadách. Polohy těchto maxim pravděpodobně odpovídají stejnému okamžiku jejich dosažení. Synchronizace by tedy mohla být provedena jednoduše jako časový posun získaný po přizpůsobení vrcholů obou časových řad, popřípadě přesněji použitím korelace pro vzájemnou synchronizaci časových řad. Tato metoda má ale podstatnou nevýhodu. Hodnoty průhybů získané v obou časových řadách nemusí dosáhnout svých maxim ve stejném okamžiku z důvodu různého prostorového umístění radarů, kdy z pohledu každého radaru dochází k maximální výchylce v jiný okamžik. Proložení časové řady je tedy pouze přibližné a nemusí dosáhnout požadované přesnosti 0,0025 s.

Vzhledem k uvedené nevýhodě byl navržen přesnější způsob synchronizace. Tato metoda využívá systémové časy notebooků, pomocí kterých se ovládá měření radary a na kterých jsou ukládána naměřená data. Synchronizace obou radarů tedy znamená synchronizaci systémového času jejich notebooků. Obslužný software radaru získá přesný čas z operačního systému notebooku a uloží čas zahájení měření do souboru s naměřenými hodnotami z radaru. Porovnáním časových údajů uložených v souborech měření je tedy možné identifikovat naměřené hodnoty, které byly pořízeny ve stejnou dobu.

Když je notebook zapnutý, operační systém získává reálný čas z modulu Real Time Clock (RTC) a poté měří čas pomocí hodinového signálu procesoru, který je přesnější než RTC. Aby byla odchylka od reálného času dostatečně malá, synchronizují současné operační systémy v pravidelných intervalech své hodiny se speciálními časovými servery na internetu. K tomu slouží Network Time Protocol (NTP), který umožňuje synchronizaci hodin v paketové síti s proměnným zpožděním. Tento protokol NTP lze také použít k synchronizaci radarových notebooků. Takový synchronizační proces vyžaduje fyzické propojení obou operačních notebooků ethernetovým kabelem nebo bezdrátovou komunikací. Časové rozdíly mezi notebooky lze uložit do souboru. Pomocí těchto hodnot je pak možné synchronizovat naměřená data (LOS posuny) obou radarů. I když synchronizaci hodin obslužných notebooků je možné takto provést s přesností cca $\pm 0,001$ s, tak synchronizaci vlastních časových řad naměřených dat lze provést pouze s přesností cca $\pm 0,0025$ s při měření se vzorkovací frekvencí 200Hz.

3. Experimentální případová studie měření posunů dvěma radary

Pro ověřovací experimentální měření byla vybrána lávka přes řeku Berounku v Dobřichovicích. Dynamické účinky pěšího provozu na lávce byly známy již z předchozích měření [14]. Lávka je důležitou pěší komunikací mezi dvěma částmi města Dobřichovice oddělenými řekou – městem a železniční stanicí. Lávka byla postavena v roce 2003 jako náhrada za původní, která byla zničena při velké povodni v srpnu 2002. Z tohoto důvodu přemostňuje i záplavové území na levém břehu Berounky (viz obr. 3).



Obr. 3 Lávka přes řeku Berounku v Dobřichovicích s radary umístěnými pod lávkou

Jedná se o lanovou lávku o 2 polích o délce 88 m a 92 m. Vodorovná nosná konstrukce je spřažená se dvěma hlavními ocelovými nosníky a spodní železobetonovou mostovkou. Šířka vodorovné nosné konstrukce je 3,80 m a její celková délka je 180,60 m. Šířka volného prostoru pro chůzi je 3,00 m. Podélný sklon mostovky se pohybuje od + 2,55 % do - 0,4 %. Více podrobností o lávce je v [14].

3.1 Metoda výpočtu podélných a svislých posunů

Měření se uskutečnilo 3. 12. 2019. Radary byly umístěny pod mostovkou každý na jiném břehu řeky cca 70 m od sebe a namířeny přibližně proti sobě. Měření trvalo asi 30 minut se vzorkovací frekvencí 200 Hz. Pro synchroni-

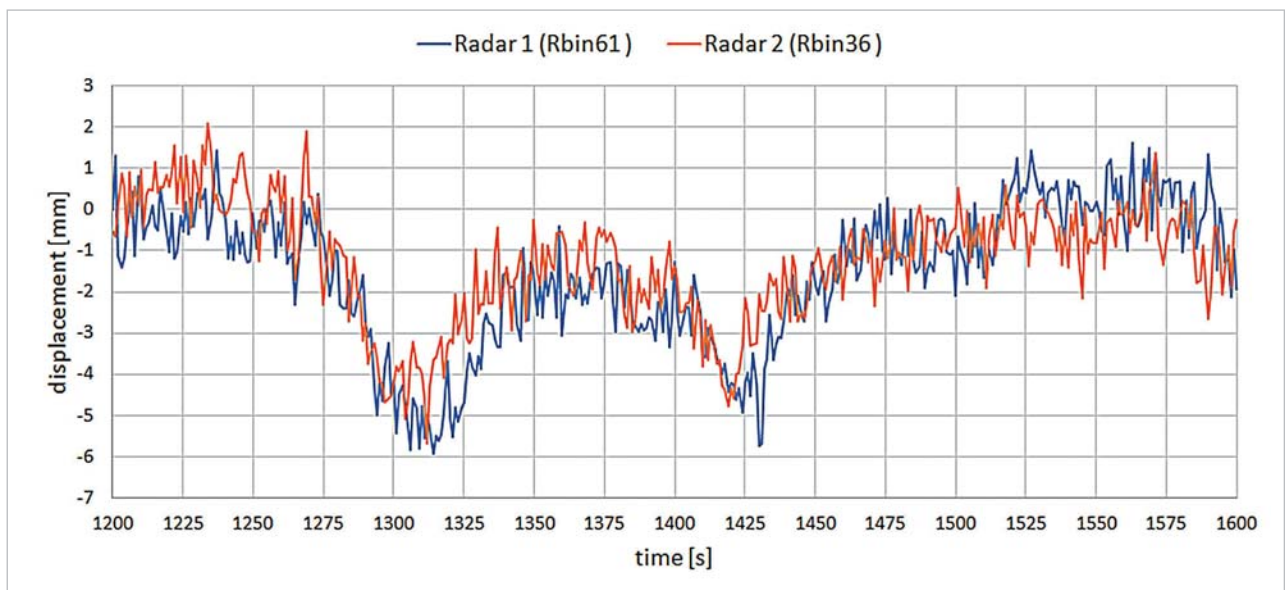
zaci času byly notebooky ovládající radary propojené optickým kabelem.

Během měření byl laserovým skenerem vytvořen i 3D model lávky (viz obr. 4). Důvodem pro vytvoření 3D modelu je potřeba přesné identifikace částí měřeného objektu (příčníků) umístěných v konkrétních R-binech. Pro interpretaci posunů byl v průběhu měření pořízen i videozáznam lávky, aby mohly být identifikovány i příčiny posunů lávky.

Nejprve byla provedena časová synchronizace měření a export naměřených dat z programu IBIS Data Viewer. Pro vyhodnocení byly vybrány R-biny odpovídající stejnému místu přibližně ve středu lávky. Obr. 5 ukazuje srovnání svislého posunu prvků vodorovné nosné konstrukce (příčníků) měřeného jednotlivými radary ve stejném bodě.



Obr. 4 3D model lávky vytvoření laser skenerem



Obr. 5 Porovnání svislých posunů naměřených oběma radary na identickém místě

V obou případech byly předpokládány posuny ve svislém směru a výpočty byly provedeny nezávisle. Jedná se tedy o zcela nezávislé ověření.

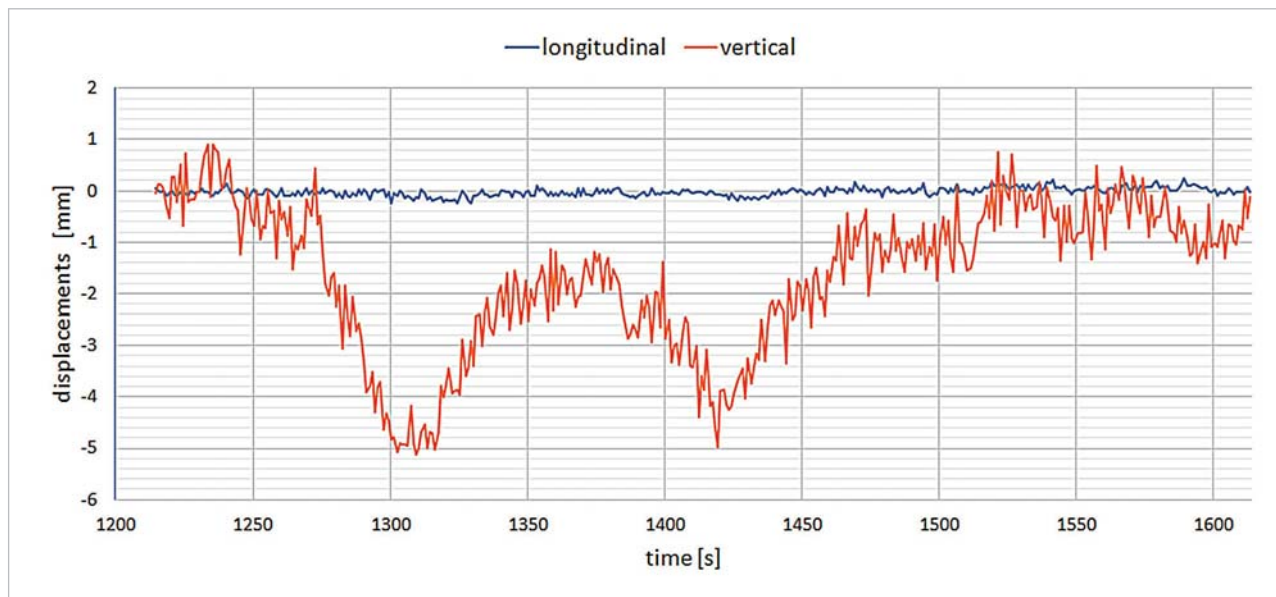
Protože byla lávka měřena současně dvěma radary, je možné vypočítat posuny v podélném i vertikálním směru. Obr. 6 ukazuje výsledné podélné a vertikální posuny vypočtené z měření obou radarů podle uvedených vzorců (2). Zatížení lávky bylo vyvoláno průchodem skupin několika osob.

Vibrace lávky byly současně s radarovým měřením měřeny také piezoelektrickými snímači zrychlení Brüel & Kjær Type 8344. Pracovní rozsah těchto snímačů je od 0,2 Hz do 3 kHz a mají velmi vysokou citlivost cca 2 500 mV/g a přirozenou frekvenci 10 kHz. Účelem tohoto měření bylo nezávisle zkontrolovat a porovnat tyto výsledky s výsledky z radarové interferometrie. Více podrobností o tomto měření piezoelektrickými snímači zrychlení a jeho výsledcích je uvedeno v [14].

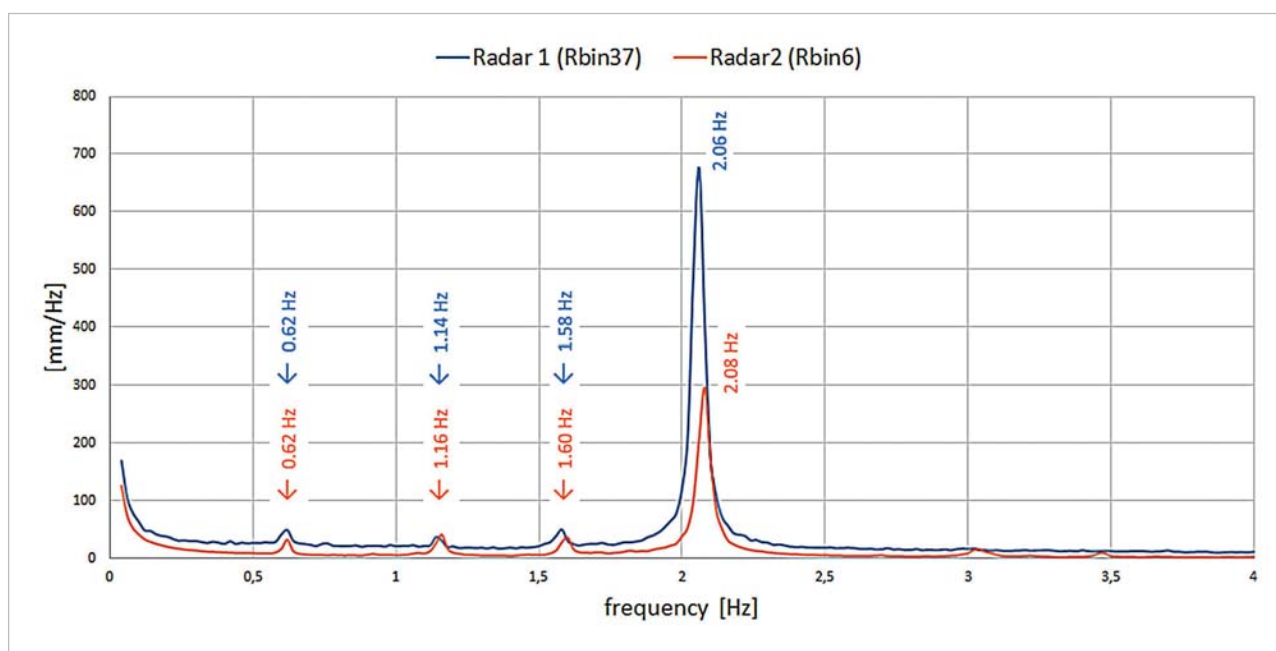
Zajímavé je také srovnání naměřených vlastních frekvencí kmitání lávky. Obr. 7 ukazuje periodogramy frekvenční analýzy měření obou radarů ve dvou vybraných R-binech s dobrou odrazivostí radarového signálu. Tab. 1 ukazuje srovnání vlastních frekvencí lávky naměřených radarovou interferometrií a piezoelektrickými snímači zrychlení s teoretickými hodnotami. Teoretické hodnoty a hodnoty naměřené piezoelektrickými snímači zrychlení byly získány z [14].

4. Diskuse nad výsledky

Za nezávislé ověření lze považovat porovnání dvou svislých posunů vodorovné příčné nosné konstrukce (příčniku) měřených jednotlivými radary ve stejném bodě. Vzhle-



Obr. 6 Svislé a vodorovné podélné posuny měřené na lávce



Obr. 7 Výsledek frekvenční analýzy pro dva vybrané R-biny s dobrou odrazivostí

Tab. 1 Vlastní frekvence lávky

Charakter vlastního tvaru svislého ohybového kmitání	Radar 1 (Rbin37) [Hz]	Radar 2 (Rbin6) [Hz]	Piezoelektrický akcelerometr (Polák 2020) [Hz]	Teoretické hodnoty (Polák 2020) [Hz]
1. tvar	0,62	0,62	0,61	0,60
2. tvar	1,14	1,16	1,14	1,13
3. tvar	1,58	1,60	1,58	1,66
4. tvar	2,06	2,08	2,06	2,09

dem k tomu, že posuny jsou předpokládány pouze ve svislém směru, jsou výsledné hodnoty vertikálních posunů ovlivněny chybami způsobenými možnými posuny i v jiných směrech. Při porovnávání časových řad hodnot jednotlivých posunů mají vliv i chyby způsobené nepřesnou synchronizací času na noteboocích. Na **obr. 5** je vidět, že rozdíly v hodnotách jednotlivých posunů mohou být až 2 mm. Celková charakteristika časové řady posunů bodů je však stejná. Příčiny těchto rozdílů v hodnotách posunu jsou především v zanedbání vlivů horizontálních složek skutečných (celkových) posunů na svislé posuny.

Při pohledu na **obr. 6** je patrné, že celkové charakteristiky časové řady vertikálních posunů zjištěné z měření oběma radary odpovídají výsledkům vertikálních posunů z jednotlivých radarů. Je také patrné, že velikost podélných posunů je výrazně menší ve srovnání s posuny vertikálními a pohybuje se pouze v rozmezí hodnot $\pm 0,3$ mm. Tyto poznatky odpovídají teoretickým předpokladům o odezvě vodorovné nosné konstrukce lávky na vertikální zatížení.

Při porovnání výsledků frekvenční analýzy (viz **tab. 1**) je vidět, že hodnoty zjištěné oběma radary se velmi dobře shodují. Stejně tak hodnoty zjištěné radarovou interferometrií se velmi dobře shodují jak s hodnotami zjištěnými současně v doplňkových měřeních piezoelektrickými snímači zrychlení, tak i s hodnotami teoretickými [14]. Z **obr. 7** je také vidět, že určení vlastní frekvence příslušné k 4. vlastnímu tvaru svislého ohybového kmitání je zřetelnější než určení zbývajících tří vlastních frekvencí svázaných se svislým ohybovým kmitáním.

5. Závěr

Výsledky výzkumu potvrdily, že je možné úspěšně využít dvojici interferometrických radarů pro určení dynamických posunů mostů. Potvrdilo se, že tímto způsobem je možné zjišťovat současně podélné i svislé posuny mostovky. Je také možné určit vlastní frekvence kmitání mostovky. To bylo potvrzeno současným ověřovacím měřením jinou technologií (piezoelektrickými snímači zrychlení) a také i porovnáním s teoretickými výpočty. Výsledky tak potvrzují očekávané přínosy současného měření dvěma radarovými aparaturami pro určení průhybů mostní konstrukce pomocí radarové interferometrie.

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory Ministerstva vnitra ČR, program „Program bezpečnostního výzkumu ČR 2015-2022“, projekt „Pokročilá technologie rychlého určování deformací mostů radarovou interferometrií a její využití v diagnostice“, grant č. VI20192022167.

LITERATURA:

- [1] PIERACCINI, M.-FRATINI, M.-PARRINI, F.-ATZENI, C.: Dynamic Monitoring of Bridges Using a High-Speed Coherent Radar. In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 44, no. 11, pp. 3284-3288, Nov. 2006, doi: 10.1109/TGRS.2006.879112. [online]. Dostupné na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1717722>.
- [2] GENTILE, C.: Application of Radar Technology to Deflection Measurement and Dynamic Testing of Bridges. in Radar Technology, ed.: Guy Kouemou, ISBN 978-953-307-029-2, pp. 141-162, December 2009, INTECH, Croatia, DOI 10.5772/7178.
- [3] OWERKO, T.-ORTYL, Ł.-KOCIERZ, R.-KURAS, P.-SALAMAK, M.: Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry - Case study. In Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. Proceedings of the Sixth International IABMAS Conference, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8-12 July 2012, pp. 181-188, ISBN: 978-041562124-3, DOI 10.1201/b12352-19. [online]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/256472325_Investigation_of_displacements_of_road_bridges_under_test_loads_using_radar_interferometry_-_Case_study.
- [4] LIPTÁK, I.-ERDÉLYI, J.-KYRINOVIČ, P.-KOPÁČIK, A.: Monitoring of Bridge Dynamics by Radar Interferometry, in INGEO 2014, 6th International Conference on Engineering Surveying, Prague 2014, pp. 211-216.
- [5] LIU, X.-TONG, X.-DING, K.-ZHAO, X.-ZHU, L.-ZHANG, X.: Measurement of Long-Term Periodic and Dynamic Deflection of the Long-Span Railway Bridge Using Microwave Interferometry. in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, no. 9, pp. 4531-4538, Sept. 2015, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2464240. [online]. Dostupné na: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7210147>.
- [6] TALICH, M.: The Effect of Temperature Changes on Vertical Deflections of Metal Rail Bridge Constructions Determined by the Ground Based Radar Interferometry Method In WMESS 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 221 (2019) 012076, doi: 10.1088/1755-1315/221/1/012076. [online]. Dostupné na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/221/1/012076>.
- [7] LUZI, G.-CROSETTO, M.-FERNÁNDEZ, E.: Radar Interferometry for Monitoring the Vibration Characteristics of Buildings and Civil Structures: Recent Case Studies in Spain. Sensors (Basel, Switzerland). 2017, 17(4):669, doi: 10.3390/s17040669.
- [8] TALICH, M.: Monitoring of horizontal movements of high-rise buildings and tower transmitters by means of ground-based interferometric radar. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-3/W4, 499-504, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-499-2018, 2018. [online]. Dostupné na: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-3-W4/499/2018/isprs-archives-XLII-3-W4-499-2018.pdf>.
- [9] TALICH, M.: Using Ground Radar Interferometry for Precise Determining of Deformation and Vertical Deflection of Structures. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 95(3):032021, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/95/3/032021.
- [10] ARTESE, S.-NICO, G.: TLS and GB-RAR Measurements of Vibration Frequencies and Oscillation Amplitudes of Tall Structures: An Application to Wind Towers. Applied Sciences. 2020; 10(7):2237. doi: 10.3390/app10072237. [online]. Dostupné na: http://cdn.intechopen.com/pdfs/6887/InTech-Application_of_radar_technology_to_deflection_measurement_and_dynamic_testing_of_bridges.pdf.
- [11] YU, J.-MENG, X.-YAN, B.-XU, B.-FAN, Q.-XIE, Y.: Global Navigation Satellite System-based positioning technology for structural health monitoring: a review. Struct Control Health Monit. 2020, 27:e2467. doi: 10.1002/stc.2467.
- [12] GENTILE, C.-BERNARDINI, G.: An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. Structure and Infrastructure Engineering. Vol. 6, 2010 - Issue 5: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, pp. 521-534, 2009, doi: 10.1080/15732470903068557.
- [13] IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.: Static and Dynamic testing of bridges: use of IBIS-FS for measuring deformation and identifying modal analysis parameters. Config.: IBIS FS-PRCS-OUT-DT. N doc.: DT/2016/032. Rev. 1.0. Pisa, 14/04/2016, p. 56.
- [14] POLÁK, M.-PLACHÝ, T.-ČÍTEK A.-BERKOVÁ, K.-HÁJKOVÁ, P.-ČÁP, M.: experimental dynamic analysis of the existing footbridge in Dobřichovice town. MATEC Web Conf., 313 (2020) 00002. doi: 10.1051/mateconf/202031300002.

Do redakce došlo: 30. 11. 2022

Lektoroval:
prof. Ing. Michal Polák, CSc.,
České vysoké učení technické v Praze