

NEJNOVĚJŠÍ VÝSLEDKY VE VÝZKUMU RADAROVÉ INTERFEROMETRIE U DOPRAVNÍCH STAVEB

THE LATEST RESEARCH RESULTS OF RADAR INTERFEROMETRY IN TRAFFIC STRUCTURES

Milan Talich¹

Abstrakt

Pozemní radarová interferometrie se za posledních 10 let stala často používanou technologií pro určování dynamických průhybů mostních konstrukcí vyvolaných průjezdy vozidel. Při měření pouze jedním radarovým zařízením se značně zvyšuje tzv. chyba interpretace (E_I). Při použití dvou radarů je možné současně určit např. vertikální a podélné posuny a eliminovat chybu interpretace. Cílem článku je seznámit s nejnovějšími výsledky výzkumu, které vedou ke stanovení vhodné strategie pro určování dynamických a kvazistatických odezev mostních konstrukcí na základě analýzy přesnosti měření dvěma radary.

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 so-called Interpretation Error (E_I) considerably rises. When using two radars, it is possible to simultaneously determine, for example, vertical and longitudinal displacements and to eliminate the Interpretation Error. The aim of the article is to introduce the latest research results, which lead to the determination of a suitable strategy for determining the dynamic and quasi-static responses of bridge structures based on the analysis of the accuracy of measurements by two radars.

1 Úvod do problematiky

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

¹ Talich Milan, Ing. Ph.D., Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., Pod Vodárenskou věží 1143/4, 182 00 Praha 8, e-mail: Milan.Talich@utia.cas.cz

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 vibrací 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 [11]; [2]; [10]; [5]; [6]. Příklad použití technologie GB-RAR pro stanovení průhybů kovových konstrukcí železničních mostů způsobených jak teplotními změnami, tak průjezdy vozidel (dynamickým zatížením) je uveden v [14].

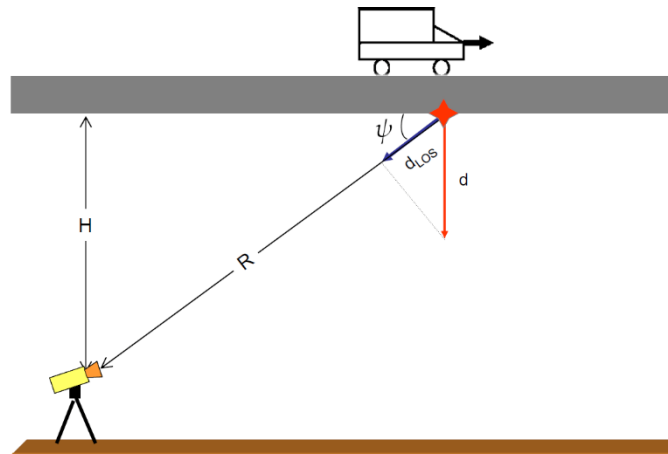
Tato technologie je však velmi často využívána i pro sledování dalších objektů. Například monitorování komunikačních věží a městských budov je uvedeno v [7]; [13] a monitorování vodojemů, továrních komínů a stožárů větrných elektráren je uvedeno v [12]. Společné použití pozemního laserového skeneru (TLS) konfigurovaného v režimu profilového skeneru a technologie GB-RAR pro monitorování frekvencí vynuceného kmitání a amplitud vynuceného kmitání vysokých konstrukcí je uvedeno v [1]. Velmi dobrý přehled o schopnosti používat technologii GNSS pro dynamické monitorování stavu staveb spolu s dalšími technologiemi jako jsou akcelerometry a RTS (robotické totální stanice) je uveden v [16].

Tento příspěvek je zaměřen na měření průhybů mostů dvěma interferometrickými radary IBIS-S a IBIS-FS italského výrobce IDS - Ingegneria Dei Sistemi. Více podrobností o tomto přístroji je například v [3] nebo [4].

Jedním ze základních nedostatků metody GB-RAR je, že radar měří sice velice přesně, dle údajů výrobce s přesností cca $\pm 0,01$ mm, ale pouze posuny bodů ve směru záměry (line of sight - LOS) a ty je nutné následně přepočítat do očekávaného směru skutečných posunů. V případě mostních konstrukcí je očekávaný směr obvykle svislý, protože se předpokládají především svislé průhyby způsobené zátěží při průjezdu vozidel. Geometrická situace je znázorněna na Obr. 1.

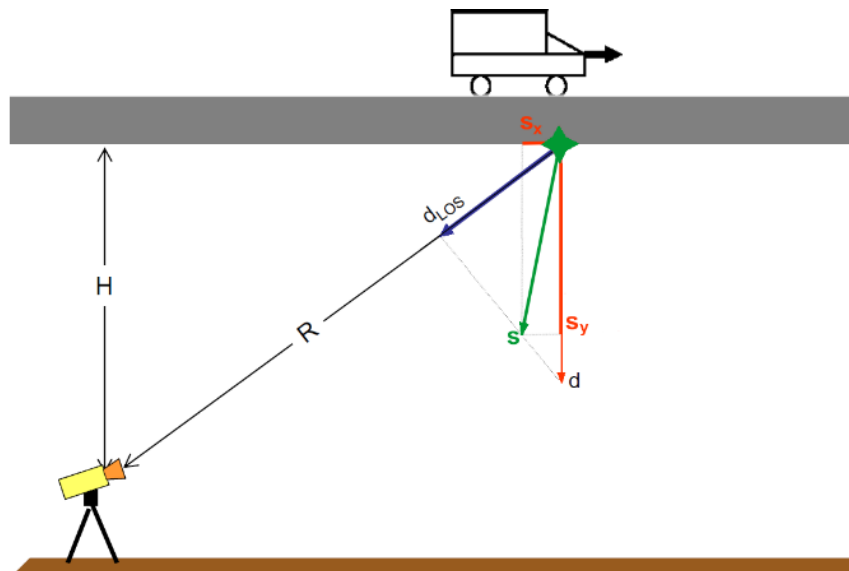
Předpokládané skutečné (svislé) posunutí se vypočítá podle vzorce

$$d = d_{\text{LOS}} R/H. \quad (1)$$



Obr. 1 Posuny ve směru měření (d_{LOS}) a skutečné (svislé) posuny (d)

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 a také vozidla během svých průjezdů generují obvykle podélné a příčné horizontální síly (např. brzdné síly nebo odstředivé síly). V [8] je poukázáno na chyby plynoucí z chybného předpokladu pouze svislých posunů. Jinými slovy, jedná se o chyby z nezohlednění horizontálních posunů při určování vertikálních posunů metodou GB-RAR pouze s jedním radarem. Tato chyba je podrobněji popsána v [9], kde se nazývá Interpretation Error E_I (chyba z interpretace). Geometrická situace objasňující původ chyby interpretace E_I je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 2 Původ interpretační chyby E_I při měření pouze jedním interferometrickým radarem: s – celkový posun; s_y – vertikální složka celkového posunu; s_x – horizontální složka celkového posunu; d_{LOS} – měřený posun ve směru záměry; d – vypočítaný svislý posun; R – vzdálenost radaru od měřeného bodu; H – vzdálenost radaru od měřeného bodu ve vertikálním směru.

V souladu s [9] lze interpretační chybu E_I definovat následovně:

$$E_I = (d - s_y)/d . \quad (2)$$

Potom může být interpretační chyba E_I vypočtena na základě geometrie znázorněné na obrázku 2 podle vztahu

$$E_I = \frac{s_x}{s_y} \sqrt{\left(\frac{R}{H}\right)^2 - 1} . \quad (3)$$

Rovnice (3) tedy názorně udává vztah mezi interpretační chybou E_I a poměry R/H (radarová vzdálenost od měřeného bodu/radarová vzdálenost od měřeného bodu ve vertikálním směru) a s_x/s_y (podélný nebo příčný horizontální posun/vertikální posun). Při v praxi obvyklé velikosti poměru horizontálních posunů k vertikálním $s_x/s_y = 0,10$ je hodnota chyby interpretace $E_I = 23 \%$ již při poměru $R/H = 2,50$. Při poměru $R/H = 5,00$, je pak $E_I = 49 \%$. S větším poměrem vodorovných a svislých posunů, ke kterému v některých případech může dojít, jsou hodnoty E_I dokonce ještě výrazně větší. Velikost chyby interpretace tedy může nabývat velmi významných hodnot a v běžné praxi může zcela znehodnotit výsledky měření a vést k chybným závěrům ohledně stavu testované konstrukce. Nejdůležitějším zjištěním ohledně vlivu chyby interpretace E_I tedy je, že až na výjimky, **není možné spoléhat na výsledky měření vertikálních posunů pouze jedním radarem.**

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 nejúčinnějším způsobem. I tento nedostatek je možné odstranit pomocí výpočtového modelu mostu. Ten však v drtivé 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. Kromě již zmíněného [9], je v [4] 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. Teprve v [15] je uvedeno jednak univerzální řešení problematiky časové synchronizace, dále pak především podrobný rozbor přesnosti při měření dvěma radary, umožňující i jeho plánování s ohledem na požadovanou přesnost výsledných posunů.

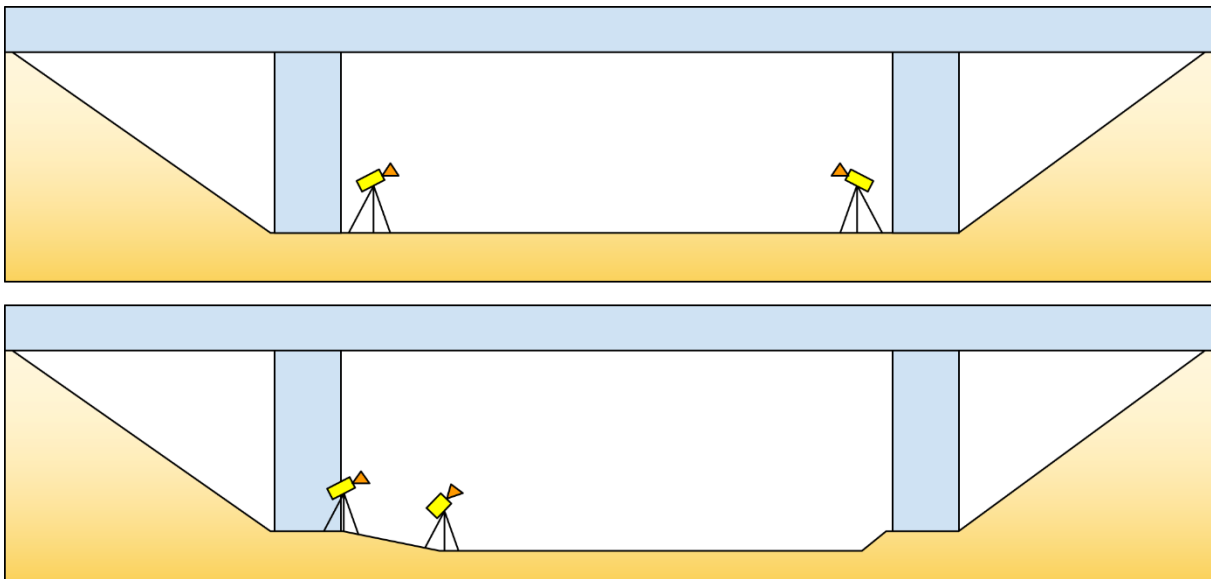
2 Základní principy GB-RAR s dvěma radary IBIS-S resp. IBIS-FS

Současné měření dvěma radary přináší několik technických problémů, které je třeba vyřešit. Jde především o určení prostorové konfigurace radarů

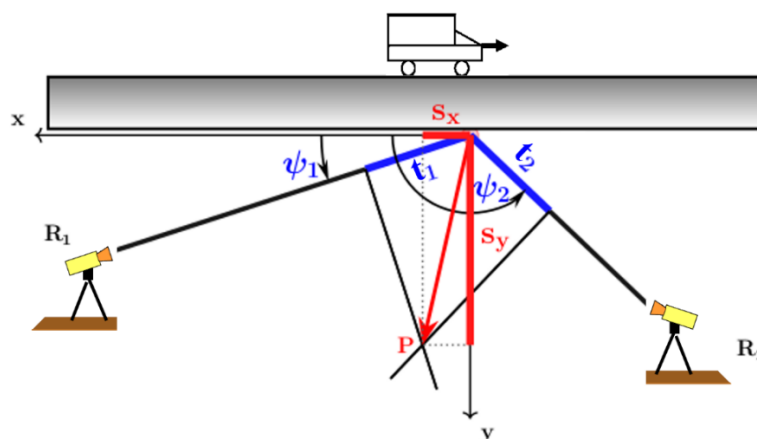
a měřeného mostu, umožňující výpočet skutečných posunů. Dále je to časová synchronizace měření obou radarů.

2.1 Metoda výpočtu podélných a svislých posunů

Pokud předpokládáme, že se mostovka pohybuje ve dvou směrech (v podélném a svislém), je možné současným měřením dvěma radary určit skutečné posuny a jejich jednotlivé složky. Obrázek 3 ukazuje dvě základní konfigurace polohy dvou radarů při měření mostů. Obrázek 4 pak geometrické vztahy mezi posuny LOS a skutečnými posuny bodu měřenými ze dvou různých radarových pozic.



Obr. 3 Dvě základní konfigurace polohy dvou radarů při měření mostů: radary měří proti sobě – nahoře, nebo radary měří z jedné strany (radary jsou umístěny za sebou) – dole.



Obr. 4 Vztah vektoru posunutí $[s_x, s_y]$ k naměřeným posunům LOS t_1, t_2 a svislým úhlům ψ_1, ψ_2 z radarů R_1, R_2 ke sledovanému bodu.

Podélné a svislé složky vektoru posunutí jsou funkcí svislých úhlů radarových směrů a naměřených posunů v těchto směrech (posunů LOS). Lze je vypočítat pomocí vzorců (4), jejichž odvození je uvedeno v [15].

$$\begin{aligned} s_x &= \frac{t_1 \sin(\psi_2) - t_2 \sin(\psi_1)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)} \\ s_y &= \frac{-t_1 \cos(\psi_2) + t_2 \cos(\psi_1)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)} \end{aligned} \quad (4)$$

kde jsou:

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

Tímto způsobem je možné určit podélnou a svislou složku skutečného posunu 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 interference signálů obou radarů. Rušení bylo pozorováno pro jakoukoli konfiguraci a polohu radarů. K většímu rušení dochází, když jsou antény radarů proti sobě, ale záleží také na pozorovaném objektu. Velikost rušení závisí také na typu radaru. Radar IBIS-FS je obecně rušen méně než IBIS-S. Velikost interference je také menší, pokud je hodnota *NumberOfDeadTonesBetweenTwoSweeps* co možná nejmenší. Tuto hodnotu lze nalézt v souboru ini uloženém s měřením. Hodnota závisí na vzorkovací frekvenci a maximální vzdálenosti měření. Interference je vyjádřena periodickými vrcholy. Jejich frekvence závisí na nastavení radarů. Pokud je rušení větší, je potřeba ho odfiltrovat. Pokud bychom chtěli měřit bez rušení, musely by mezi sebou radary přímo komunikovat, což běžné radary IBIS-S a IBIS-FS neumožňují.

2.2 Časová synchronizace dvou radarů

Při měření dvěma radary vzniká praktický problém, jak k sobě přiřadit odpovídající si LOS 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 $\pm 0,0025$ s.

Vzhledem k výše uvedené nevýhodě byl navržen přesnější způsob synchronizace, využívající 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. Takový synchronizační proces vyžaduje fyzické propojení obou operačních notebooků ethernetovým kabelem nebo bezdrátovou komunikací. Synchronizaci hodin obslužných notebooků je možné takto provést s přesností cca $\pm 0,001$ s. Tento způsob časové synchronizace lze navíc využít i při synchronizaci radarových měření s měřeními prováděnými jinými klasickými metodami, například pomocí akcelerometrů nebo fotogrammetrie. Další podrobnosti k časové synchronizaci jsou v [15].

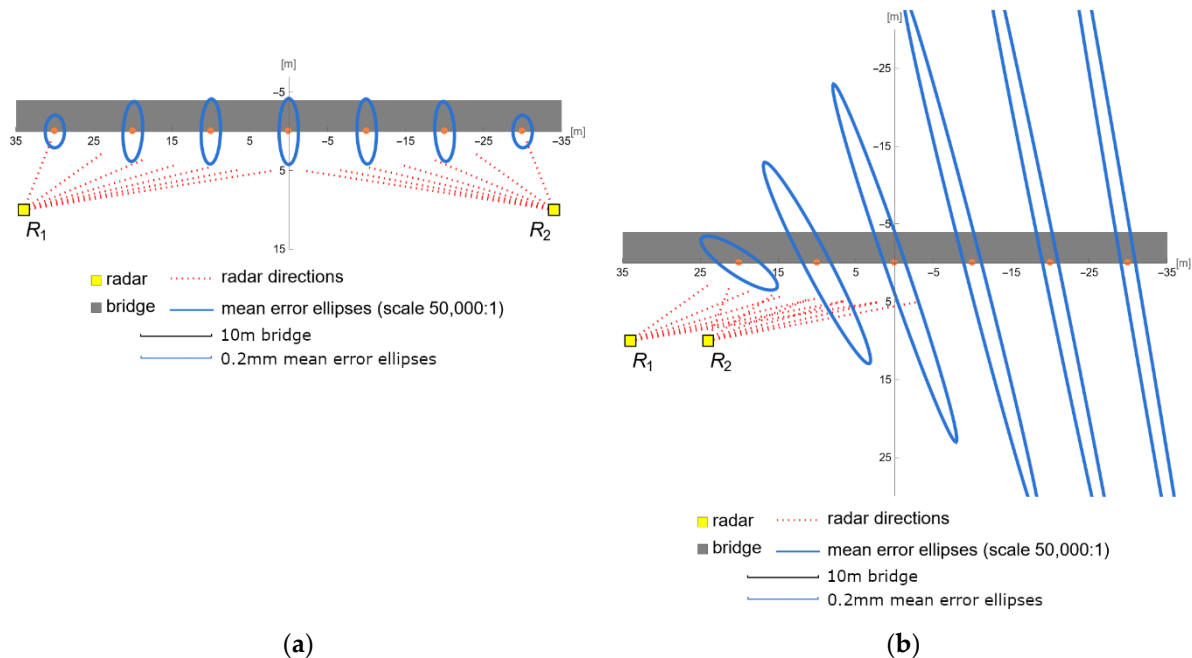
2.3 Analýza přesnosti určení podélné a svislé složky celkového posunu

Analýza přesnosti posunů $[s_x, s_y]$ vychází z rovnice (4). Kovarianční matici vektoru posunů $[s_x, s_y]$ lze odhadnout pomocí dobře známého vzorce přenášení středních chyb, pokud jsou předem dány přesnosti (střední chyby) posunů LOS t_1, t_2 a radarových směrů ψ_1, ψ_2 . Proto je možná předpověď přesnosti výsledných posunů, která je důležitá zejména pro plánování vhodného umístění radarů v terénu. Vlastní odvození rozsáhlých výsledných vzorců pro výpočet přesnosti je uvedeno v [15]. Zde pro nedostatek místa uvedeme pouze názorné ukázky závěrů plynoucích pro praxi.

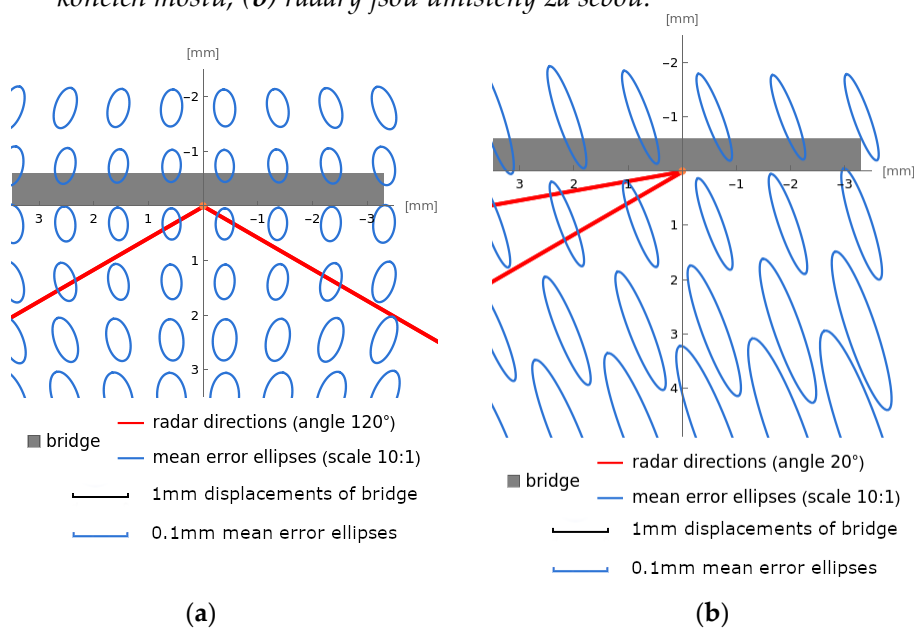
Příklad středních elips chyb zobrazujících výslednou přesnost celkových posunů v různých místech monitorovaného mostu je znázorněn na obrázku 5. Je vidět, že postavení radarů proti sobě dává mnohem přesnější výsledky než postavení za sebou, které lze chápat jen jako nouzové řešení neumožní-li situace v terénu jinak. Dále, že nejpřesnější výsledky jsou v tom místě na mostovce, kde jsou záměry radarů na sebe kolmé, tedy při postavení radarů proti sobě jsou na okrajích mostu přesnější než uprostřed. Znamená to, že u mostů s malou výškou nad terénem nelze dosáhnout vysoké přesnosti v určení posunů.

Příklad středních elips chyb zobrazujících výslednou přesnost celkových posunů v závislosti na jejich velikosti je znázorněn na obrázku 6. I zde je vidět, že postavení radarů za sebou dává výrazně horší výsledky dosažené přesnosti než postavení proti sobě. Současně je vidět, že přesnost určení výsledných

posunů klesá s nárůstem jejich velikosti. Tudiž u mostů s větším průhybem, např. delších ocelových mostů, je přesnost určení průhybu v okamžiku jeho maximální hodnoty při průjezdu vozidla nižší než v době mimo průjezd. Malé deformace vlivem teplotních změn tak budou určeny přesněji než velké dynamické vlivem průjezdů vozidel.



Obr. 5 Přesnost vektoru posunu $[s_x, s_y] = [0, 0 \text{ mm}, 5, 0 \text{ mm}]$ v různých bodech mostu. Polohy radarů jsou určeny s přesností $\pm 0,2 \text{ m}$. Směrodatná odchylka naměřených posunů LOS je $\pm 0,02 \text{ mm}$. Měřítko středních chybových elips je $50\,000 : 1$. (a) radary jsou umístěny na opačných koncích mostu; (b) radary jsou umístěny za sebou.



Obr. 6 Přesnost vektoru posunu $[s_x, s_y]$ v závislosti na jeho velikosti, když směrodatná odchylka naměřených posunů LOS je $\pm 0,02 \text{ mm}$. Měřítko středních chybových elips je $10 : 1$. (a) radary jsou umístěny na opačných koncích mostu a vertikální úhly radarových směrů jsou 30° a 150° , (b) radary jsou umístěny za sebou a vertikální úhly radarových směrů jsou 10° a 30° .

3 Experimentální měření za účelem ověření teorie

Jako příklad k ověření teorie přesnosti určení podélné a svislé složky celkového posunu a k demonstraci jejich praktických dopadů uvedeme experiment provedený v září 2021 na novém ocelovém obloukovém železničním mostě v Púchově na Slovensku. Byly použity tři metody měření:

- obvyklý přístup realizovaný pouze piezoelektrickými akcelerometry, protože standardní snímače pro stanovení relativního svislého průhybu mostovky nebylo možné kvůli hluboké vodě instalovat pod most,
- pozemní radarová interferometrie GB-RAR s dvěma synchronizovanými interferometrickými radary IBIS-S a IBIS-FS v umístění za sebou,
- metoda fotogrammetrie s digitální korelací obrazu (DIC).



Obr. 7 Měřené třetí pole o rozpětí 124,8m železničního mostu v Púchově.



(a)



(b)

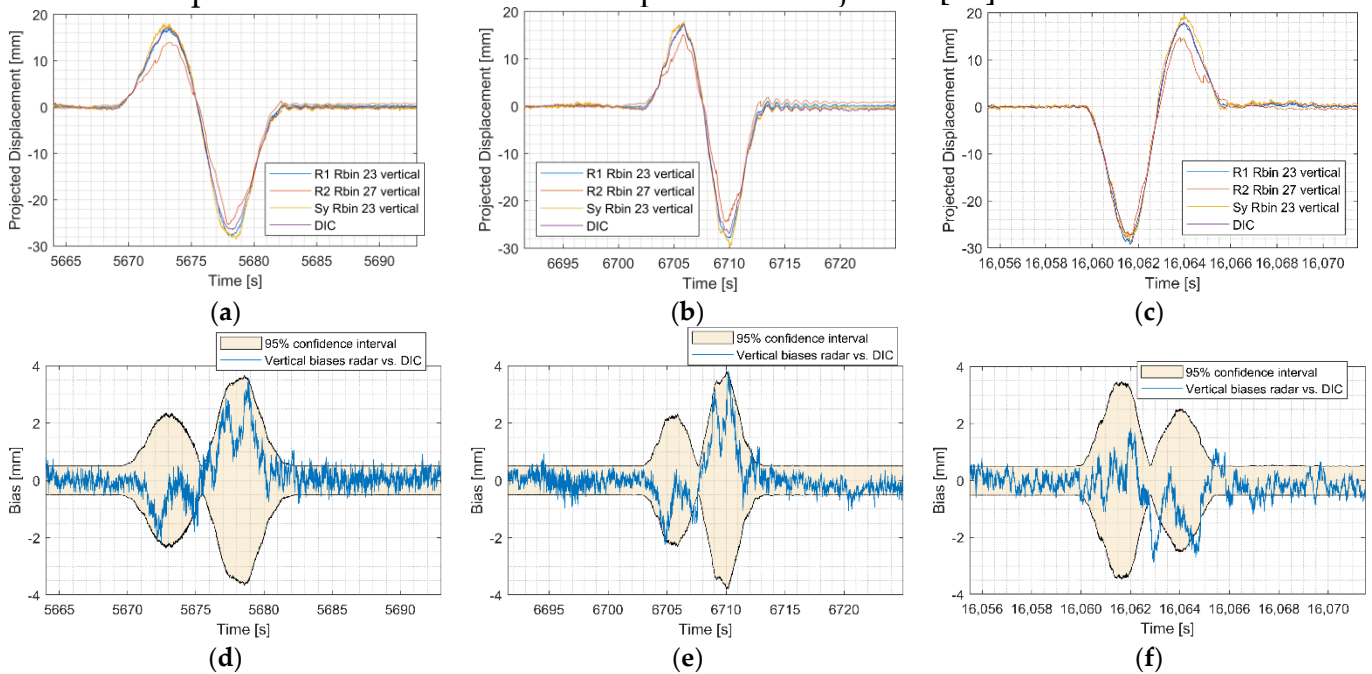
Obr. 8 Použité interferometrické radary: (a) Pohled zdola na mostovku s ocelovými příčníky z pozice radaru R1; (b) Pohled na oba radary: R1 je na fotografii v popředí a R2 je v pozadí.

Z údajů naměřených oběma radary byl pro účely tohoto článku vyhodnocen pouze jeden bod (příčník) v 1. čtvrtině mostu. Ukázalo se, že porovnávání radarových měření s akcelerometrickými není v tomto případě vhodné, protože použité akcelerometry Brüel & Kjær typ 8344 nedetekují zde

dominantní kvazistatické složky pohybu. Z tohoto důvodu bylo provedeno porovnání výsledků radarového měření s výsledky fotogrammetrické digitální korelace obrazu (DIC).

Obrázek 9 ukazuje na prvním řádku srovnání samostatně vypočtených vertikálních posunů dle vzorce (1), které byly měřeny radary R1 a R2, s vertikálními (S_y) posuny vypočtenými kombinací obou radarových měření těchto radarů dle vzorce (4) a s výsledky měření DIC na stejném místě. Na 2. řádku je porovnání odchylek vertikálních posunů mezi radarovými (S_y) a DIC měřeními s intervaly spolehlivosti. V tomto případě je vliv velikostí posunů na velikost intervalů spolehlivosti významný, neboť posuny na tomto železničním mostě jsou relativně velké.

Další podrobnosti k ověřovacím experimentům jsou v [15].



Obr. 9 První řádek: porovnání vertikálních posunů při průjezdu zkušebního vlaku včetně 2 lokomotiv: (a) při 40 km/h – směr Bratislava; (b) rychlostí 50 km/h – směr Bratislava; (c) rychlostí 90 km/h – směr Žilina; druhý řádek: porovnání intervalů spolehlivosti s odchylkami mezi radarovým a DIC měřením vertikálních posunů: (d) pro rychlost vlaku 40 km/h. Četnost odchylek padnoucích do 95% intervalu spolehlivosti je 96 %; (e) 50 km/h, 94 %; (f) 90 km/h, 84 %.

4 Závěr

Využití současného měření dvěma radary je nutné pro eliminaci tzv. Interpretation Error E_I , ke které dochází až na výjimky při měření pouze jedním radarem. Tato chyba dokáže zcela znehodnotit dosažené výsledky měří-li se jen jedním radarem. Provedením analýzy přesnosti výsledků měření dvěma radary bylo dosaženo několika poznatků pro praxi. Nejdůležitější z nich je, že umístění radarů proti sobě je mnohem vhodnější než umístění

radarů za sebou. Dále, že je možné předem odhadnout a naplánovat dosažitelnou přesnost výsledných posunů pro dané konkrétní konfigurace radaru ve vztahu k mostní konstrukci. Odvozené vzorce pro výslednou přesnost stanovených posunů, uvedené v [15], lze předem použít k modelování a výpočtu dosažitelné přesnosti. To umožní stanovit optimální strategii měření se dvěma interferometrickými radary a tím snížit finanční náklady na provádění měřicích a monitorovacích prací.

Tento příspěvek vznikl s podporou Strategie AV21 – program č. 23 „Město jako laboratoř změny; Stavby, kulturní dědictví a prostředí pro bezpečný a hodnotný život“.

Literatura

- [1] *Artese S. and Nico G. (2020). 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. <https://doi.org/10.3390/app10072237>*
- [2] *Gentile C. (2009). 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] *Gentile C. and Bernardini G. (2009). "An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests" Structure and Infrastructure Engineering, Volume 6, 2010 - Issue 5: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, pp 521-534, 2009, <https://doi.org/10.1080/15732470903068557>*
- [4] *IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. (2016). 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.*
- [5] *Lipták I., Erdélyi J., Kyrinovič P., Kopáček A. (2014). Monitoring of Bridge Dynamics by Radar Interferometry, in INGENEO 2014, 6th International Conference on Engineering Surveying, Prague 2014, pp. 211-216.*
- [6] *Liu X., Tong X., Ding K., Zhao X., Zhu L. and Zhang X. (2015). "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.*

- [7] Luzi G., Crosetto M. and Fernández E. (2017). "Radar Interferometry for Monitoring the Vibration Characteristics of Buildings and Civil Structures: Recent Case Studies in Spain." *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2017;17(4):669. <https://doi.org/10.3390/s17040669>
- [8] Miccinesi, L.; Beni, A.; Pieraccini, M. Multi-Monostatic Interferometric Radar for Bridge Monitoring. *Electronics* 2021, 10, 247.
- [9] Olaszek, P.; Świercz, A.; Boscagli, F. The Integration of Two Interferometric Radars for Measuring Dynamic Displacement of Bridges. *Remote Sens.* 2021, 13, 3668.
- [10] Owerko T., Ortyl Ł., Kocierz R., Kuras P., Salamak M. (2012). "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.
- [11] Pieraccini M., Fratini M., Parrini F., Atzeni C. (2006). 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. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1717722>
- [12] Talich M. (2017). "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,
- [13] Talich M. (2018a). 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, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-499-2018>, 2018.
- [14] Talich M. (2018b). 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,
- [15] Talich, M.; Havrlant, J.; Soukup, L.; Plachý, T.; Polák, M.; Antoš, F.; Ryjáček, P.; Stančík, V. (2023) Accuracy Analysis and Appropriate Strategy for Determining Dynamic and Quasi-Static Bridge Structural Response Using Simultaneous Measurements with Two Real Aperture Ground-Based Radars. *Remote Sens.* 2023, 15, 837. <https://doi.org/10.3390/rs15030837>

- [16] Yu, J., Meng X., Yan B., Xu B., Fan Q., Xie Y. (2020). *Global Navigation Satellite System?based positioning technology for structural health monitoring: a review*. *Struct Control Health Monit.* 2020; 27:e2467.
<https://doi.org/10.1002/stc.2467>

Recenzoval: doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně