

PŘESNÉ MONITOROVÁNÍ SVISLÝCH PRŮHYBŮ MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ METODOU POZEMNÍ RADAROVÉ INTERFEROMETRIE

PRECISE MONITORING VERTICAL DEFLECTION OF BRIDGE STRUCTURES USING METHOD OF GROUND RADAR INTERFEROMETRY

Milan Talich¹

Summary

The contactless determination of vertical deformations of bridge structures with accuracy up to 0.01 mm in real time can also be used in practice the technology of ground based radar interferometry. It is also possible in real time to capture oscillations of the object with a frequency up to 50 Hz. Deformations can be determine simultaneously in multiple places of the object, for example a bridge structure at points distributed on the bridge deck at intervals of one or more meters. This allows to obtain both overall and detailed information about the behavior of the structure during the dynamic load and monitoring the impact of movements either individual vehicles or groups. In addition to the necessary theory are given practical examples.

1 Úvod

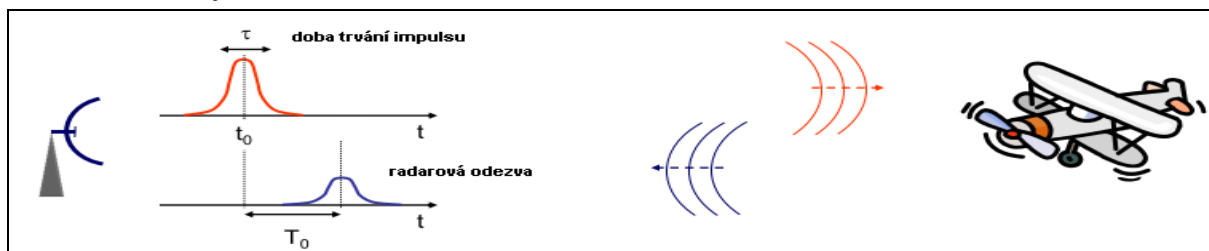
Budeme-li hledat metody bezkontaktního sledování průhybů mostních konstrukcí (mostovek) pak je zapotřebí si definovat i další požadavky, které by měly tyto metody splňovat. Takovými požadavky mohou být například možnost sledovat průhyby v reálném čase při krátkodobém i dlouhodobém zatížení (např. průjezdy vozidel nebo naopak stání kolon vozidel či zátěžové zkoušky). Dále dynamicky zachytit a odhalit frekvence a amplitudy kmitání sledovaného objektu ve frekvenčním rozsahu např. od 0,05 až po 50 Hz. Schopnost určit velikosti průhybů s přesností v řádu setin mm, protože vlastní velikost průhybů se obvykle pohybuje v řádech od několika desetin mm po několik málo mm. Možnost určovat průhyby na více místech mostovky současně (paralelně), tak aby bylo možné získat jak celkovou tak i detailní informaci o chování konstrukce při jejím dynamickém zatížení například v určité části mostu.

¹ Talich Milan, Ing., Ph.D., Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., Pod vodárenskou věží 4, 182 08 Praha 8, tel: 266 052 440, e-mail: Milan.Talich@utia.cas.cz

Všem těmto požadavkům vyhovuje metoda měření vycházející z principů pozemní radarové interferometrie. Přitom její velká síla spočívá v tom, že je možno současně určovat na mnoha místech téže mostovky různé průhyby. Například v bodech o vzdálenostech cca po jednom metru. To znamená na mostě o délce např. 100 m je možno sledovat současně až cca 100 bodů. V tomto příspěvku se zaměříme na měření svislých průhybů betonových mostů interferometrickým radarem IBIS-S (IBIS-FS) italského výrobce IDS - Ingegneria Dei Sistemi.

2 Základní principy radarové interferometrie s IBIS-S

Radar je elektronický přístroj umožňující identifikaci, zaměření a určení vzdáleností objektu od měřicího aparátu. Princip fungování pulsního radaru ilustruje následující obrázek (Obr. 1). Radar IBIS využívá technologii souvislé frekvenční stupňovité vlny (angl. stepped frequency continuous wave, zkráceně SFCW), a diferenční interferometrii (angl. differential interferometry).



Obr. 1 – Princip radarové diferenční interferometrie (IDS)

Technologie souvislé frekvenční stupňovité vlny slouží k určení vzdálenosti cílového objektu od radaru. Mikrovlnné frekvence jsou vysílány ve velmi krátkých impulzech o velkém výkonu. Vzdálenost detekovaných předmětů je určována na základě časové korelace vyslaného a přijímaného signálu. Využitím této technologie IBIS vytváří jednorozměrný obraz, nazývaný **radiální profil odrazivosti**. Cíle ve snímaném území jsou rozděleny do **radiálních spádových oblastí** s konstantním rozpětím nezávislým na vzdálenosti, který nazýváme **radiální rozlišení ΔR** .

Vzdálenost je určena pomocí rychlosti světla c podle vztahu

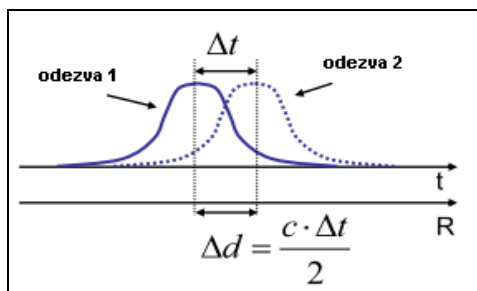
$$R_0 = \frac{cT_0}{2} \quad (1)$$

kde T_0 představuje opoždění odezvy. Koncepti radiálního rozlišení vyjadřuje vzorec

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \quad (2)$$

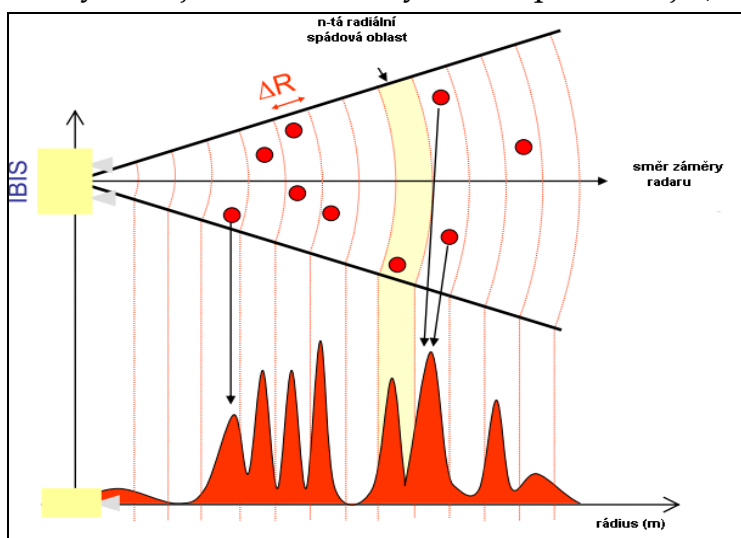
kde τ je doba trvání vysílaného impulsu. Radar je tedy schopný rozeznat různě vzdálené cíle za předpokladu, že délka časového intervalu mezi dvěma

odezvami je delší než doba trvání vyslaného impulsu. Musí tedy platit vztahy $\Delta t > \tau$, $\Delta d > \Delta R$. Radiální rozlišení je proto limitováno dobou trvání vyslaného impulsu.



Obr. 2 – Radiální rozlišení radaru (Δd) (IDS)

Na následujícím obrázku je znázorněn radiální profil odrazivosti generovaný radarem IBIS S. Vodorovná osa znázorňuje radiální vzdálenost od radaru. Radar typu IBIS-S dokáže rozlišovat detekované objekty jen v jenom rozměru, a to ve směru záměry. Nachází-li se více detekovaných objektů v jedné radiální spádové oblasti, nelze je od sebe odlišit a posuny měřené na jednotlivých objektech se ve výsledku průměrují (viz Obr. 3).



Obr. 3 – Skládání odrazů od více objektů (IDS)

Osa y vyjadřuje poměr přijatého signálu k šumu (angl. signal to noise ratio, zkráceně SNR nebo někdy též S/R):

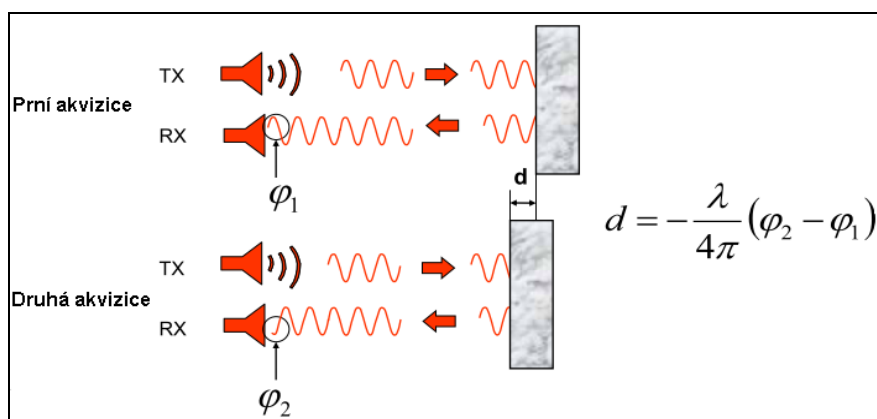
$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2 \quad (3)$$

kde P_{signal} je výkon přijatého signálu, $P_{\text{šum}}$ je výkon přijatého šumu, A_{signal} je amplituda přijatého signálu a $A_{\text{šum}}$ je amplituda přijatého šumu.

Poměr signálu k šumu je častěji uváděn v logaritmické podobě, pak se nazývá odstup signálu k šumu:

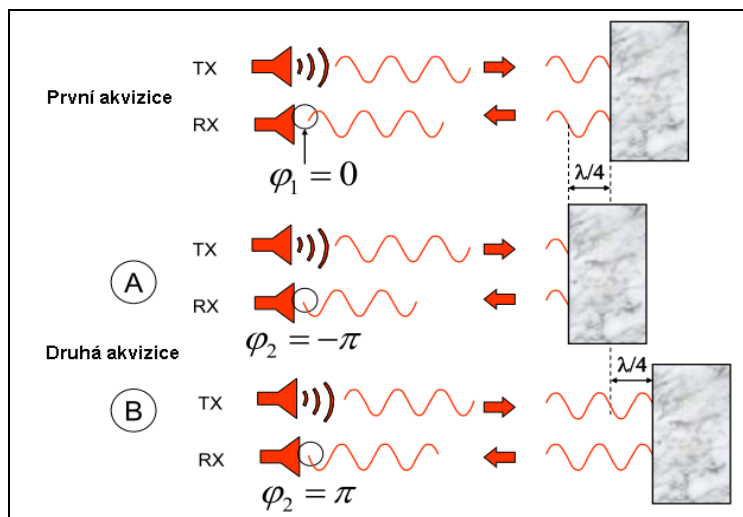
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{sum}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{sum}} \right) \quad (4)$$

Diferenční interferometrie poskytuje údaje o posunech objektů porovnáváním fázové informace získané v různých časových obdobích z vln odražených od objektů. Tento princip je patrný z Obr. 4. Každá odražená vlna z každé radiální spádové oblasti nese informaci o amplitudě $|A(n)|$ a fázi φ_n . Přístroj IBIS je schopen vyhodnotit posunutí pro každou radiální spádovou oblast. Kvalita vyhodnoceného posunu je úměrná množství odraženého signálu.



Obr. 4 – Princip diferenční interferometrie (IDS)

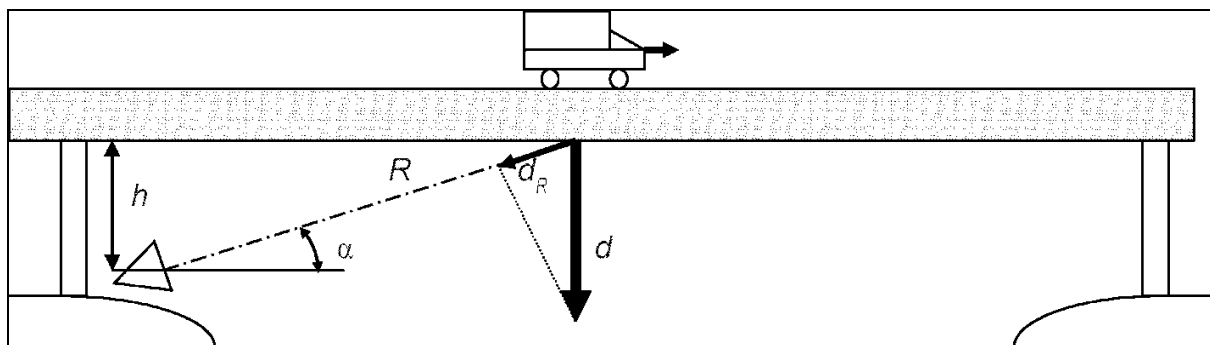
Maximální měřitelný posun mezi dvěma akvizicemi je ohraničen nejednoznačností měřené fáze. Tento princip je znázorněn na Obr. 5. Pro IBIS činí $\pm\lambda/4 = 4,38$ mm.



Obr. 5 – Nejednoznačnost měření fáze (IDS)

Veškeré posuny jsou přístrojem měřeny ve směru záměry. Protože obvykle není záměra orientována přesně ve směru očekávaného posunu ale konfigurace přístroj - objekt odpovídá obrázku 6, je potřeba skutečné posuny dopočítat dle vzorců $d = d_R / \sin(\alpha)$, kde $\sin(\alpha) = h/R$ a tudíž $d = d_R \cdot R/h$, kde poměr R/h je projekční faktor (angl. projection factor). Délka R je měřena radarem,

převýšení h je třeba určit dodatečným geodetickým měřením, např. laserovým dálkoměrem, pásmem apod. Projekce radarem naměřeného pohybu d_R do svislého směru je znázorněna na Obr. 6.



Obr. 6 – Promítání přímo měřeného pohybu d_R do svislého směru (IDS)

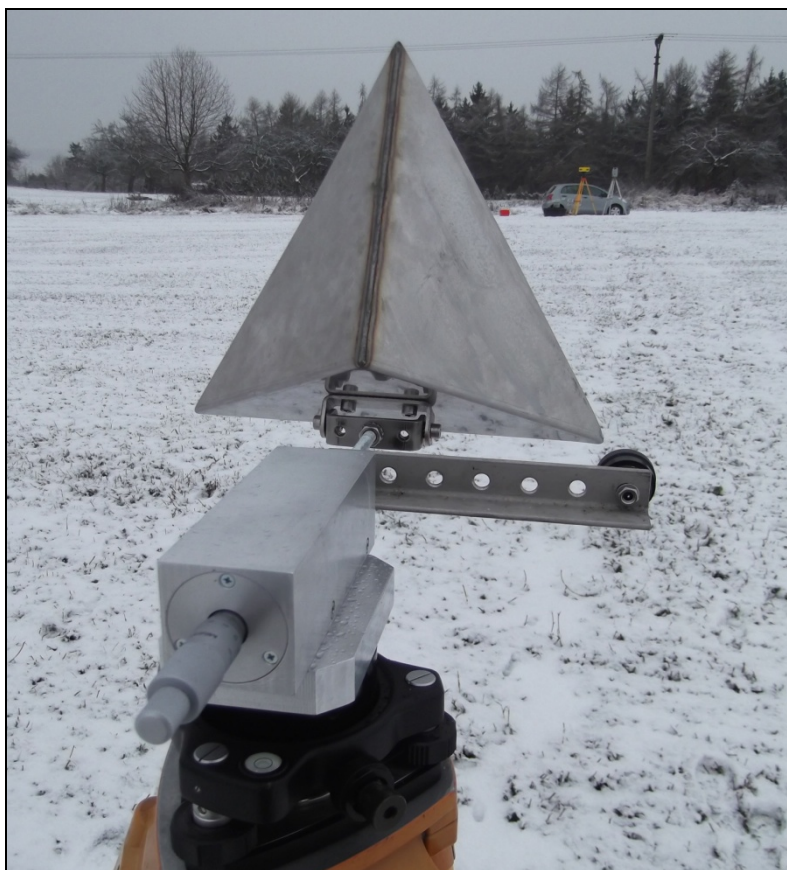
3 Technické parametry a ověření technologie radarové interferometrie

Pro měření lze použít vysoce stabilní koherentní pozemní interferometrický radar IBIS-S. Radar pracuje v mikrovlnném pásmu se střední frekvencí 17 GHz. Při měření lze radar nastavit do dvou pracovních režimů: statického a dynamického. Při dynamickém režimu radar snímá odražené signály s frekvencí 1 až 200 Hz. Tuto tzv. snímací frekvenci lze zvolit podle požadovaných nároků na podrobnost výsledků zaměření. Směrodatná odchylka radarem zaměřených pohybů dle údajů výrobce je až 0,01 mm a závisí zejména na velikosti koutových odražečů, vzdálenosti koutových odražečů od radaru a úhlu mezi směrem záměry a směrem, do něhož jsou pohyby promítány. Rozlišovací schopnost (vzdálenost) jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, (tzn. šířka radiální spádové oblasti) je 0,75 m. Maximální dosah radaru je až 1 km, závisí ovšem na velikosti odrazné plochy cíle a vyzařovacím úhlu použité antény. K radaru je standardně dodávána anténa s horizontálním vyzařovacím úhlem 12° při ztrátě 3dBi a 25° při ztrátě 10dBi. Vertikální vyzařovací úhel je 39° při ztrátě 3dBi a 69° při ztrátě 10dBi. K radaru je v případě potřeby možno připevnit i další výrobcem dodávané typy antén, které se liší zejména horizontálním a vertikálním vyzařovacím úhlem. Ovladač radaru tvoří odolný notebook s příslušným SW.

K ověření technologie radarové interferometrie bylo prováděno měření pracovníky geodetické firmy Geodézie Ledec nad Sázavou s.r.o. dvěma nezávislými metodami. Jedna metoda je založena na **radarovém interferometrickém měření změny délky testovací základny**. Druhá metoda se opírá o **geodetické určení délky téže testovací základny dálkoměrem totální**

stanice SOKKIA NET1AX. Oba přístroje byly zacíleny na speciální mikrometrické zařízení, na němž byl umístěn kovový koutový odražeč pro radar a skleněný odrazný minihranol pro dálkoměr. Oba odrazné prvky byly pevně spojeny a společně připevněny k mikrometrickému šroubu, který ovládal jejich posuvný pohyb vůči oběma zacíleným přístrojům. Rozlišovací schopnost mikrometrického šroubu je 0.01 mm, což umožňuje dostatečně přesně nastavovat posuny pro radar i dálkoměr. Konstrukce mikrometrického zařízení s koutovým odražečem a minihranolem je patrná na Obr. 7.

Testování probíhalo v polních podmínkách (Obr. 8). Cílem bylo ověřit funkčnost technologie v terénu. Parametry snímání radaru byly nastaveny následovně: frekvence 10 Hz, dosah 50 m, rozlišení vzdálenosti 75 cm. Délka testovací základny byla zvolena na 39 m. Totální stanice byla nastavena na přesné měření vzdálenosti a cílení. Záznam měření vzdálenosti probíhal jenom při změně měřené vzdálenosti.



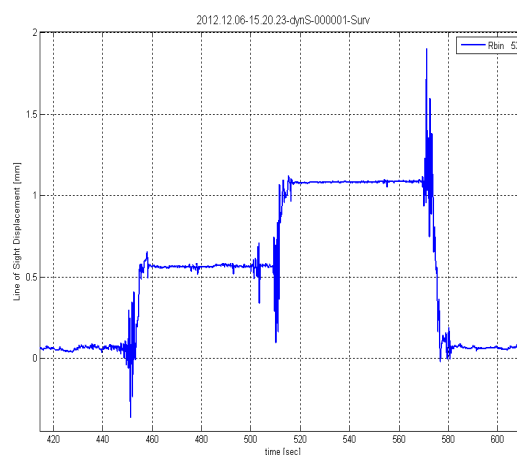
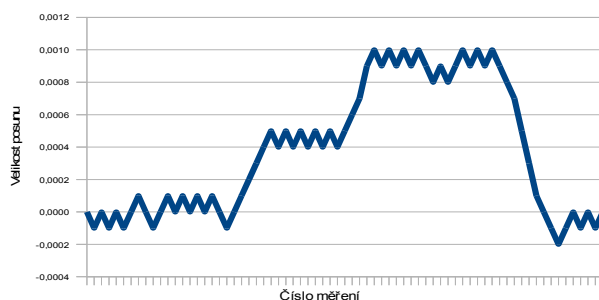
Obr. 7 – Mikrometrické zařízení opatřené koutovým odražečem

V průběhu testovacího měření byly mikrometrickým šroubem vyvolány 2 posuny o velikosti 0,5 mm ve směru od radaru a pak posun o 1 mm zpátky k radaru. Dále bylo vyvoláno 5 posunů o velikosti 0,1 mm ve směru od radaru a jeden posun o 0,5 mm ve směru k radaru.



Obr. 8 – Pohled na místo ověření ve směru záměry

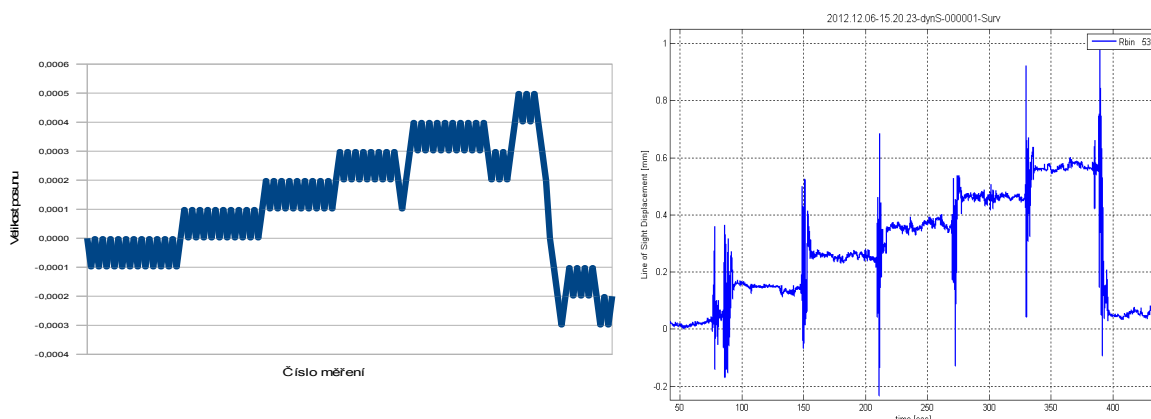
Posuny byly vyvolávány v intervalu 60 sekund. Výsledek prvního měření je zobrazen na Obr. 9. V levé části je graf posunů měřených totální stanicí, v pravé části jsou zobrazeny posuny měřené technologií radarové interferometrie. Je patrné, že přesnost dosažená technologií pozemní radarové interferometrie překonává klasickou geodetickou metodu a to velmi výrazně.



Obr 9 – Grafy posunů o velikosti 0,5 mm měřeny totální stanicí (vlevo) a radarem (vpravo)

Výsledek měření vynucených posunů o velikostech 0,1 mm je zobrazen na Obr. 10. Klasická metoda geodetickou totální stanicí při měření takto malých posunů již zcela selhává, jak je patrné z předposledního posunu.

Technologie radarové interferometrie spolehlivě změřila posuny o velikosti 0,1 mm a to s maximálním rozptylem 0,05 mm.

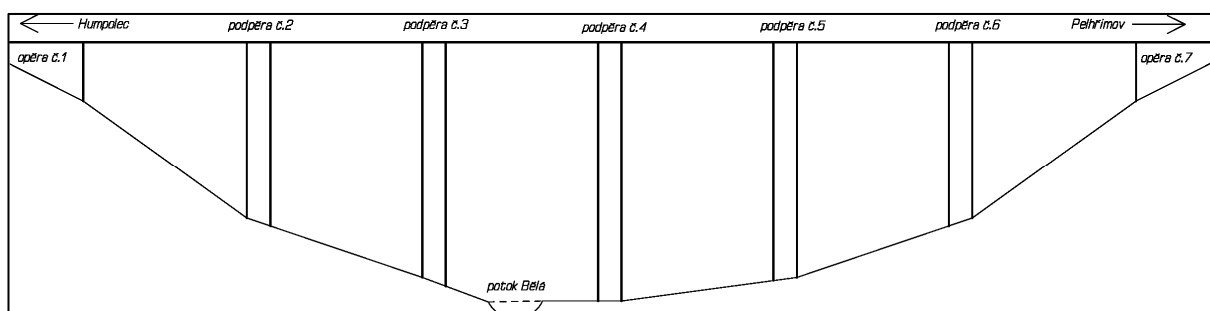


Obr. 10 – Grafy posunů o velikosti 0,1 mm měřeny totální stanicí (vlevo) a radarem (vpravo)

Výrazné změny posunů vyskytující se v době, kdy byly posuny vyvolávány mikrometrickým šroubem, jsou způsobeny přítomností figuranta vyvolávajícího posuny a jeho dotykem ruky na mikrometrický šroub. Větší výchylky v klidové době mimo realizace posunů byly způsobeny projížděním aut na blízké silnici. Funkčnost technologie byla ověřena v nepříznivých polních podmínkách. Testovacím měřením byla dosažena požadovaná přesnost a je proto možno konstatovat, že tuto technologii lze použít k bezkontaktnímu sledování posunů s dosažením přesnosti v řádu setin mm s maximálním rozptylem 0,05 mm.

4 Příklad sledování svislých průhybů silničního betonového mostu

V rámci ověřování přínosů technologie pozemního interferometrického radaru pro určování deformací rizikových objektů a lokalit bylo provedeno pracovníky geodetické firmy Geodézie Ledec nad Sázavou s.r.o. sledování svislých průhybů silničního **betonového mostu na silnici I/19 u Pelhřimova** za běžného provozu [2].



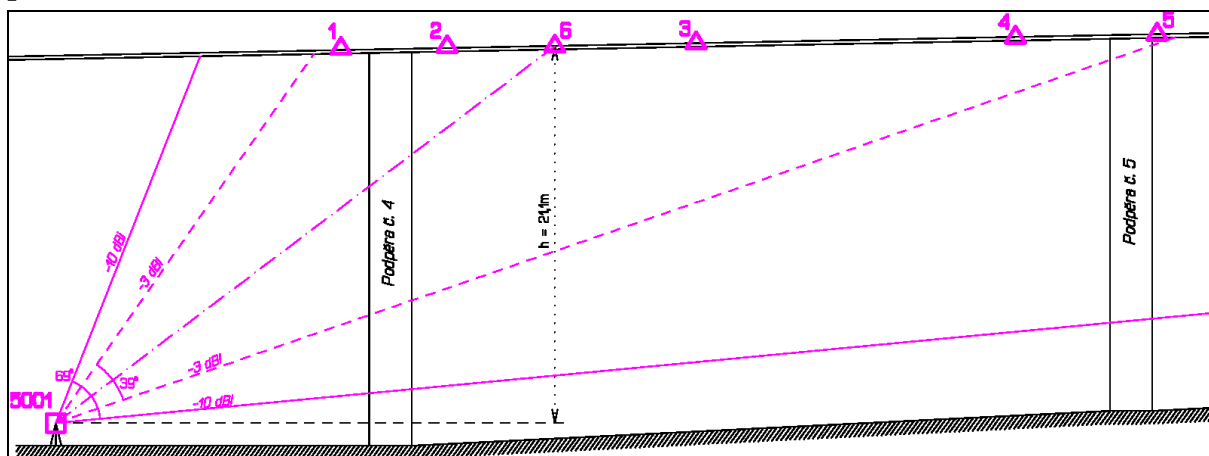
Obr. 11 – Schematické znázornění mostu a údolí pod ním - bokorys

Most na silnici I/19 stojí nad údolím potoka Bělá severně od Pelhřimova, vede přibližně západovýchodním směrem a je tvořen mírným obloukem se středem oblouku severně od mostu. Směrem od západu na východ most mírně stoupá. Most je betonový a tvoří jej šest mostních polí mezi pěti podpěrami a dvěma opěrami. Každá podpěra se skládá ze dvou sloupů. Nejvyšší střední podpěra je vysoká 22 m. Po obou stranách mostu se nachází úzký bezpečnostní chodník z vnější strany ohraničený zábradlím a z vnitřní strany svodidlem. Sloupky zábradlí mají obdélníkový průřez a zábradlí není vybaveno výplní z plexiskla, což umožňuje snadné uchycení nosných tyčí koutových odražečů na sloupky zábradlí. Na mostě je v průběhu dne středně hustý provoz osobních i nákladních vozidel. Schéma mostu je na Obr. 11.



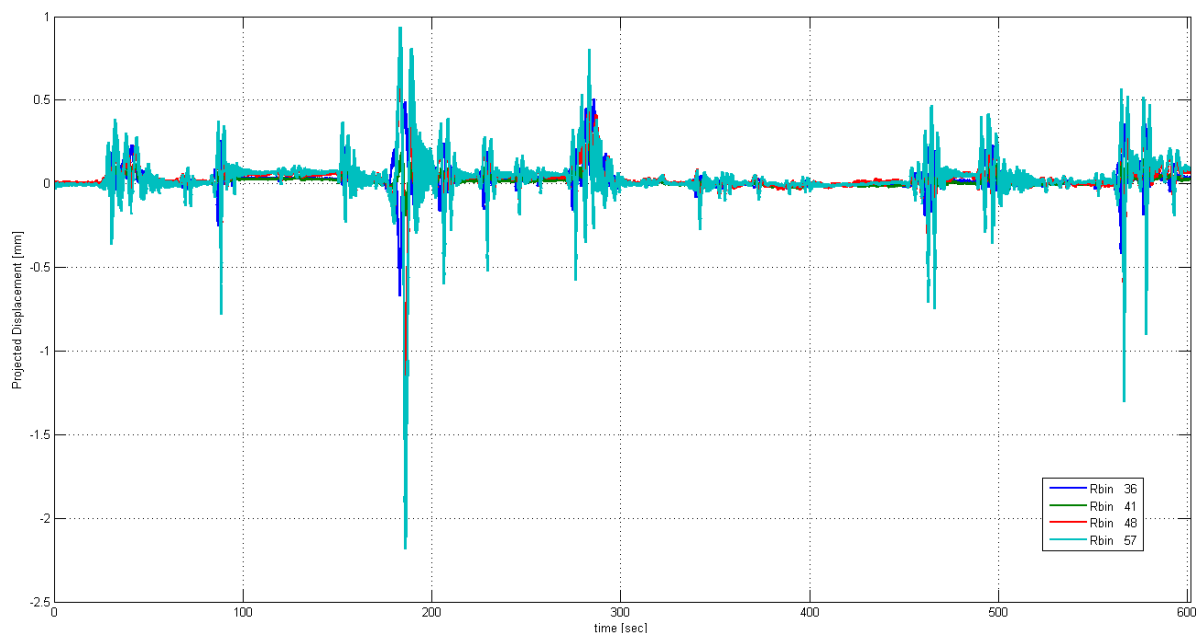
Obr. 12 – Situace při měření a koutový odražeč upevněný na zábradlí mostu

Situace při měření a způsob upevnění koutových odražečů na zábradlí u severního okraje mostu pomocí nosných tyčí je zřejmá z Obr. 12. Sledování pohybů mostu bylo provedeno v dynamickém režimu měření se snímací frekvencí 100 Hz. Měření bylo zahájeno v 11:39:14 místního času a trvalo 10 minut. Umístění a orientace radaru a koutových odražečů v bokorysu je patrná z Obr. 13.



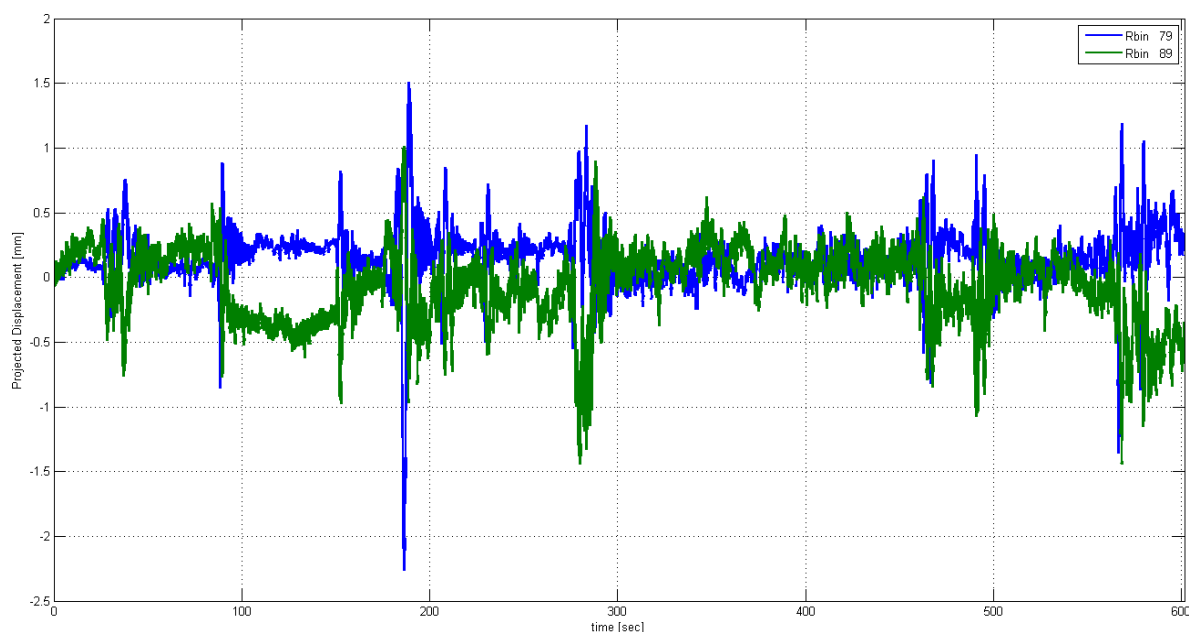
Obr. 13 – Umístění a orientace radaru a koutových odražečů - bokorys

Po vyhodnocení kvality naměřených dat bylo možno přistoupit k vyhodnocení vlastních výsledků měření, kterými jsou průhyby mostu. K tomu slouží grafy na Obr. 14 a 15 svislých pohybů sledovaných koutových odražečů.



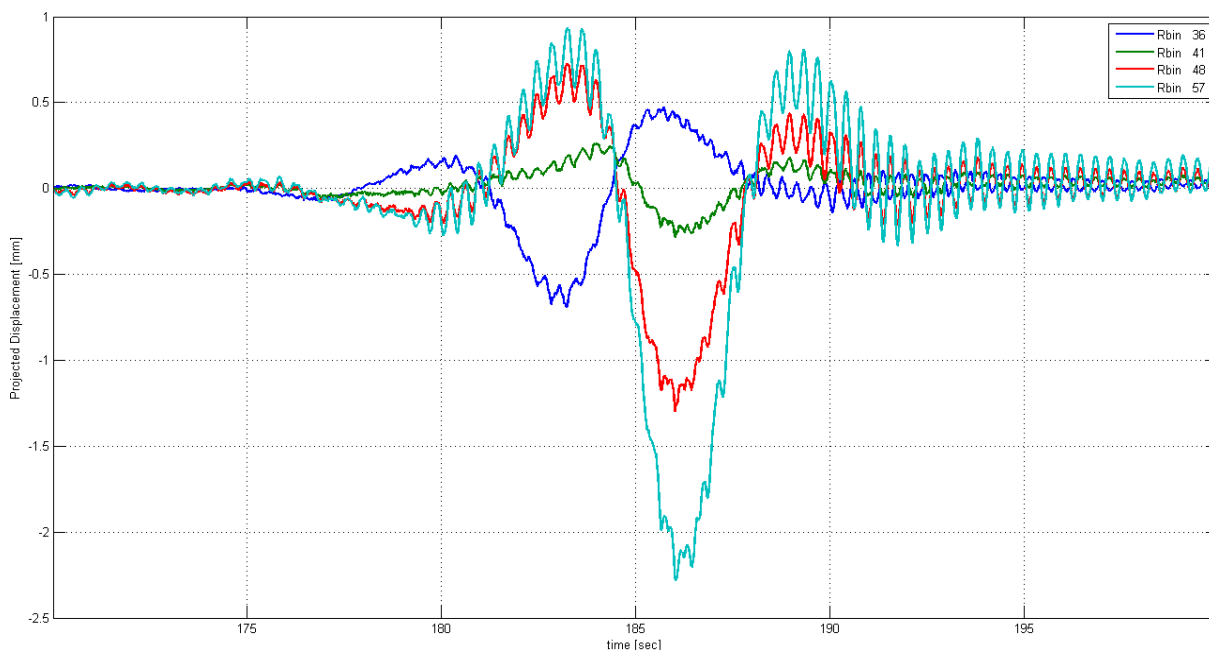
Obr. 14 – Svislé pohyby koutových odražečů č. 1, 2, 6 a 3 během 10 minut měření

Na těchto grafech jsou patrné průhyby i zvedání mostu při průjezdu vozidel po mostě. Velikost průhybu závisí na hmotnosti projíždějícího vozidla. Největší průhyby jsou způsobeny naloženými nákladními vozidly projíždějícími v severním pruhu, kde jsou na okraji mostu upevněny koutové odražeče, tj. od Pelhřimova směrem na Humpolec. Menší průhyby jsou pak způsobeny lehčími vozidly a případně vozidly projíždějícími v opačném směru.



Obr. 15 – Svislé pohyby koutových odražečů č. 4 a 5 během 10 minut měření

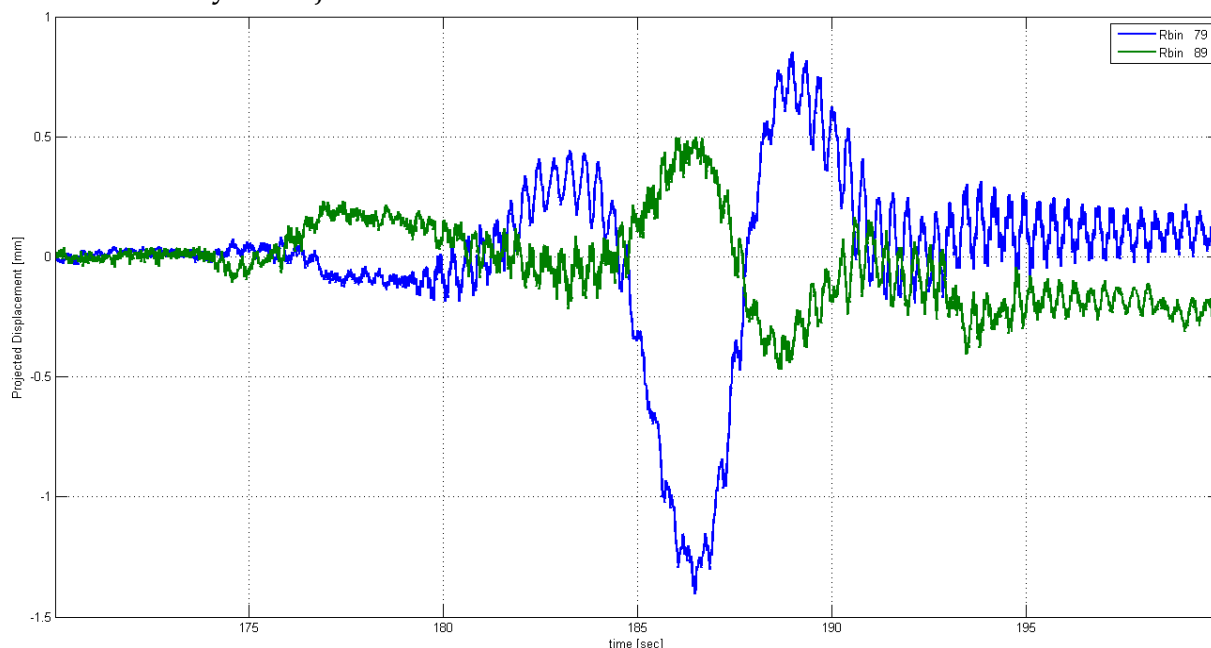
K podrobnějšímu vyhodnocení byl vybrán časový úsek, během něhož došlo k největšímu průhybu mostu. K tomu došlo při průjezdu vozidla mostním polem pokrytým odražeči č. 1, 2, 6, 3 (Rbin 36, 41, 48, 57) v čase 170 s až 200 s. Tuto situaci zachycuje graf na Obr. 16.



Obr. 16 – Svislé pohyby koutových odražečů č. 1, 2, 6 a 3 v čase 170 s až 200 s od začátku měření

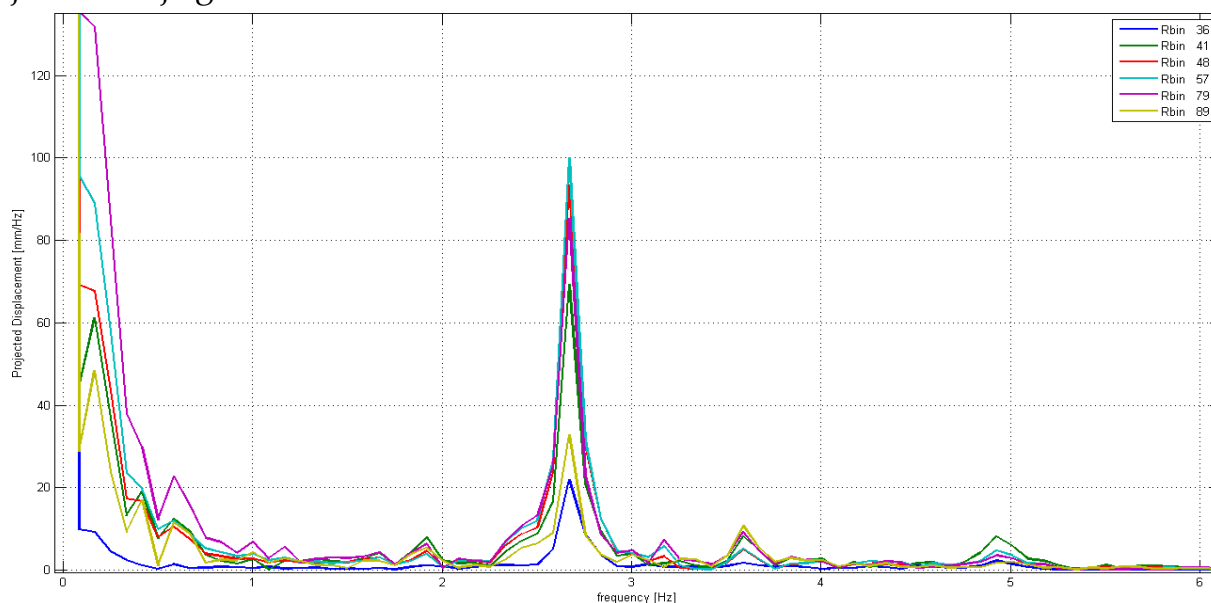
V grafu svislých pohybů první skupiny koutových odražečů (Rbin 36, 41, 48, 57) na Obr. 16 je možno rozeznat několik fází průhybu. Nejvýraznější je průhyb v čase cca 186 s, kdy vozidlo projíždí sledovaným mostním polem mezi podpěrami č. 4 a 5. Největší průhyb je zaznamenán na koutovém odražeči č. 3 (Rbin 57), který je umístěn přibližně uprostřed sledovaného mostního pole, na koutových odražečích č. 6 (Rbin 48) a č. 2 (Rbin 41) je průhyb také zaznamenán, snižuje se ale úměrně snižující se vzdálenosti koutového odražeče k podpěře č. 4. Koutový odražeč č. 1 (Rbin 36), umístěný před podpěrou č. 4, se naopak při průjezdu vozidla sledovaným mostním polem zvedá, tj. pohybuje se opačným směrem než koutové odražeče umístěné na sledovaném mostním poli za podpěrou č. 4. Na grafu je dále patrná fáze průjezdu vozidla mostním polem před podpěrou č. 4, kde jsou pohyby koutových odražečů opačné a dokonce i fáze průjezdu vozidla předchozím mostním polem. Na grafu jsou znatelné i vibrace koutových odražečů, které jsou výraznější při průjezdu mostních polí sousedících se sledovaným polem a na koutových odražečích č. 3 a 6 upevněných uvnitř sledovaného mostního pole. Tyto vibrace po průjezdu vozidla přetrvávají za pomalého utlumování.

V grafu svislých pohybů koutových odražečů č. 4 a 5 na Obr. 17, které jsou umístěny před a za podpěrou č. 5 jsou patrné pohyby obdobné pohybům koutových odražečů č. 1 a 2 nad podpěrou č. 4 s tím rozdílem, že vibrace jsou zde značně výraznější.



Obr. 17 – Svislé pohyby koutových odražečů č. 4 a 5 v čase 170 s až 200 s od začátku měření

Frekvenci vibrací koutového odražeče je možno znázornit periodogramem. Z periodogramů odpovídajících koutovým odražečům č. 1, 2, 6, 3, 4, 5 lze odečíst nejvýraznější frekvence kmitání mostu při průjezdu vozidla sledovaným mostním polem v čase 188 s až 200 s od začátku měření, jak ukazuje graf na Obr. 18.



Obr. 18 – Periodogram svislých pohybů v čase 188 s až 200 s od začátku měření

Na něm je na všech sledovaných koutových odražečích zřetelná výrazná **frekvence 2,671 Hz**, tj. cca 27 kmitů za 10 sekund. Tato frekvence odpovídá

kmitání znázorněnému v grafech svislých pohybů koutových odražečů na Obr. 16 a 17.

5 Závěr

Výše popsaným měřením konkrétního mostu byla v praxi za běžného silničního provozu ověřena technologie umožňující pozemním interferometrickým radarem IBIS-S úspěšně sledovat svislé pohyby (průhyby) betonových mostů. Při dostatečné výšce mostu je tak možno dodržet příznivé geometrické parametry při měření a tím malé hodnoty projekčních faktorů u sledovaných bodů, které musí být v případě betonových mostů signalizovány koutovými odražeči. Svislé pohyby bližších koutových odražečů č. 1, 2, 6 a 3 byly určeny s vysokou přesností. Směrodatná odchylka určená na základě odhadnutého poměru signálu k šumu dosahuje dokonce hodnot menších než jedna setina mm. Svislé pohyby vzdálenějších koutových odražečů č. 4 a 5 byly určeny relativně méně přesně ($\sigma_d = 0,04$ mm a $0,03$ mm), což je však i v tomto případě naprosto dostačující přesnost s ohledem na velikosti svislých pohybů těchto bodů, které jsou minimálně o jeden řád vyšší. V případě osazení mostovky větším počtem koutových odražečů bychom obdrželi další informace o chování mostu jako celku a mohli analyzovat při dynamickém zatížení i vzájemné vlivy mezi jednotlivými oblouky.

Potvrdila se tak teoretická východiska této zcela nové metody sledování posunů rizikových objektů. S ohledem na rychlost měření a kvalitu obdržených výsledků v reálném čase, lze konstatovat, že jen těžko se najde jiná metoda, která by dokázala poskytnout stejně kvalitní výsledky ve stejném čase a ve stejném rozsahu jako je metoda pozemní radarové interferometrie.

Literatura

- [1] TALICH, M., HANKUS, D., SOUKUP, L., HAUSER, T., ANTOŠ, F., HAVRLANT, J., BÖHM, O., ZÁVRSKÁ, M., ŠOLC, J.: *Ověřená technologie určování svislých průhybů betonových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem*. ÚTIA, 2012, 13 s., Dostupné z: www.p-insar.cz
- [2] HANKUS, D.: *Zpráva o provedených ověřovacích měřeních* *Ověřené technologie určování svislých průhybů betonových mostních konstrukcí*. ÚTIA, 2012, 11s, Dostupné z: www.p-insar.cz
- [3] *Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBIS-S v. 1.0. - User Manual*, Pisa, January 2012.
- [4] *Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBIS-S Controller v 02.02.000 - User Manual*, Pisa, January 2012.

- [5] *Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBISDV v.03.04.005 - User Manual, Pisa, March 2012.*
- [6] *BERNARDINI, G., GALLINO, N., GENTILE, C., RICCI, P.: Dynamic Monitoring of Civil Engineering Structures by Microwave Interferometer, Italy, 2007.*
- [7] *GENTILE, C.; BERNARDINI, G.; 2008. Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements. NDT & E International. Oct2008, Vol. 41 Issue 7, p544-553. 10p. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.04.005.*
- [8] *BENEDETTINI, F.; GENTILE, C.; Operational modal testing and FE model tuning of a cable-stayed bridge, Engineering Structures; Jun2011, Vol. 33 Issue 6, p2063-2073, 11p.*
- [9] *TALICH, M.: Možnosti přesného určování deformací a průhybů stavebních konstrukcí metodou pozemní radarové interferometrie. In: 49. geodetické informační dny, Brno, 19.- 20. 2. 2014, ISBN 978-80-02-02509-2.*
- [10] *LIPTÁK, I., ERDÉLYI, J., KYRINOVICH, P., KOPÁČIK, A.: Monitoring of Bridge Dynamics by Radar Interferometry, In: INGEO 2014, 6th International Conference on Engineering Surveying, Prague 2014, pp. 211-216.*
- [11] *LIPTÁK, I., ERDÉLYI, J., KYRINOVICH, P., KOPÁČIK, A.: Testování terestrických radarových systémů, In: Geodézie ve stavebnictví a průmyslu, Brno 2014, s. 34-42.*

*Lektoroval: prof. Ing. Jiří Pospíšil, CSc.
(ČVUT v Praze)*