

MOŽNOSTI PŘESNÉHO URČOVÁNÍ DEFORMACÍ A PRŮHYBŮ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ METODOU POZEMNÍ RADAROVÉ INTERFEROMETRIE

POSSIBILITIES OF PRECISE DETERMINING OF DEFORMATION AND VERTICAL DEFLECTION OF STRUCTURES USING GROUND RADAR INTERFEROMETRY

Milan Talich¹

Abstract

The contactless determination of deformations and deflections of 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 100 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 loading. In addition to the necessary principles are given practical examples.

1 Úvod

Budeme-li hledat metody bezkontaktního sledování deformací a průhybů stavebních konstrukcí pak je zapotřebí si definovat i další požadavky, které by měly tyto metody splňovat. Takovými požadavky mohou být například možnost sledovat deformace a průhyby v reálném čase při krátkodobém i dlouhodobém zatížení. Například v případě mostů průjezdy vozidel nebo naopak stání kolon vozidel či zátěžové zkoušky. V případě výškových staveb pak třeba poryvy větru. Dále dynamicky zachytit a odhalit frekvence a amplitudy kmitání sledovaného objektu ve frekvenčním rozsahu např. až do 100 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 sledovaného objektu současně (paralelně), tak aby

¹ Milan Talich, 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

bylo možné získat jak celkovou tak i detailní informaci o chování konstrukce při jejím dynamickém zatížení například v určité části.

Všem těmto požadavkům vyhovuje metoda měření vycházející z principů pozemní radarové interferometrie. Přitom její velká síla spočívá v tom, že je možno současně určovat různé průhyby na mnoha místech téhož objektu o vzájemných vzdálenostech ve směru měření alespoň 0,75m. To znamená například na mostě o délce 100 m je možno sledovat současně až cca 100 bodů. V tomto příspěvku se pro ilustraci možností technologie radarové interferometrie zaměříme na určování deformací a průhybů několika různých typů objektů interferometrickým radarem IBIS-S (IBIS-FS) italského výrobce IDS - Ingegneria Dei Sistemi. Bude to měření svislých průhybů betonových mostů a vodorovných pohybů věžových vodojemů.

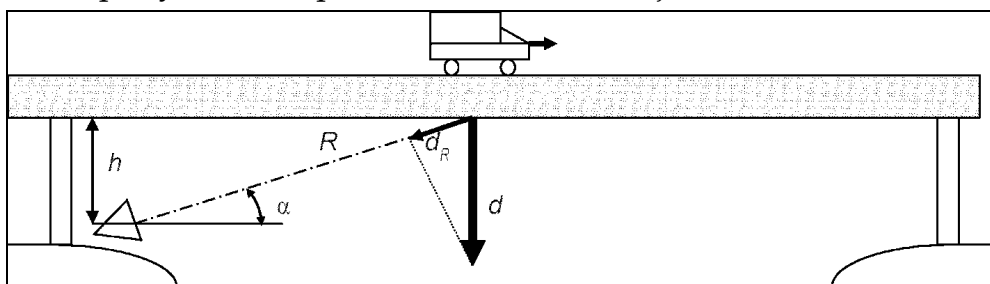
2 Zásady použití radarové interferometrie

Základní principy radarové interferometrie s IBIS-S jsou podrobně popsány například v [1]. Zde uvedeme pouze několik zásad a technických parametrů, které je nutné při používání této technologie dodržovat.

- Pozemní interferometrický radar je senzor, který měří pouze relativní pohyby ve směru záměry vztažené k počáteční příp. jiné hodnotě pohybu v průběhu měření.
- Radar není schopen zaznamenat pohyby kolmé na záměrnou přímku.
- Maximální hodnota určovaného pohybu mezi dvěma po sobě následujícími časy záznamu je dána maximální hodnotou fázového rozdílu, kterou je možno vyhodnotit, tj. $\Delta\phi = \pm\pi$ a činí například v případě radaru IBIS-S $\pm 4,38\text{mm}$. Při překročení této hodnoty dojde k chybnému výpočtu velikosti pohybu a znehodnocení výsledku měření. Tuto chybu nelze odhalit. Frekvence záznamů může být až 200Hz, tj. lze sledovat pohyby o rychlosti až 0,876 m/s.
- Umožňuje obsluhu provádět monitorování objektu ze vzdáleného místa až 1km. Přitom v případě dobré odrazivosti signálu radaru není nutná instalace odražečů nebo optických cílů na sledovaném území. Není-li přirozená odrazivost objektu dostatečná je třeba na objekt umístit do sledovaných míst koutové odražeče signálu.
- Lze sledovat současně mnoho bodů na objektu, tedy získat podrobnou informaci o dynamickém chování objektu jako celku. Rozlišovací schopnost (vzdálenost) jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, (tzv. šířka radiální spádové oblasti) je 0,75m.

- Přímé měření posunů bodů na zájmovém objektu v reálném čase.
- Možnost měření ve dne i v noci, a téměř ve všech klimatických podmínkách.
- Směrodatná odchylka určení pohybů dle výrobce je až 0,01 mm a závisí zejména na kvalitě odraženého signálu, tj. velikosti koutových odražečů a jejich vzdálenosti od radaru. Základní ověření přesnosti určování pohybů radarem bylo provedeno porovnáním dvou nezávislých metod (IBIS-S a stanice SOKKIA NET1AX) s posuny vyvolanými mikrometrem. Průběh testu s výsledkem je uveden například v [1]. Bylo ověřeno, že tuto technologii lze použít ke sledování posunů s dosažením přesnosti v řádu setin mm s maximálním rozptylem 0,05 mm.

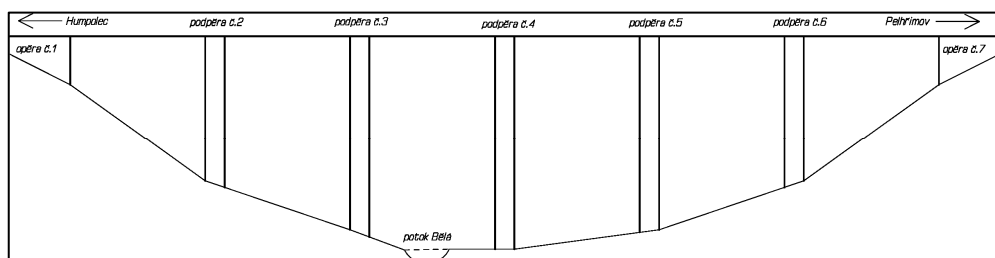
Veškeré posuny jsou přístrojem měřeny ve směru záměry. Protože obvykle není záměra orientována přesně ve směru očekávaného posunu ale konfigurace přístroj - objekt odpovídá obdobně jako je např. obrázku 1, je potřeba skutečné posuny dopočítat dle vzorců $d = d_R / \sin(\alpha)$, kde $\sin(\alpha) = h/R$ 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 apod. Projekce radarem naměřeného pohybu d_R do požadovaného směru je znázorněna na obrázku 1.



Obrázek 1 – Promítání přímo měřeného pohybu d_R do požadovaného směru

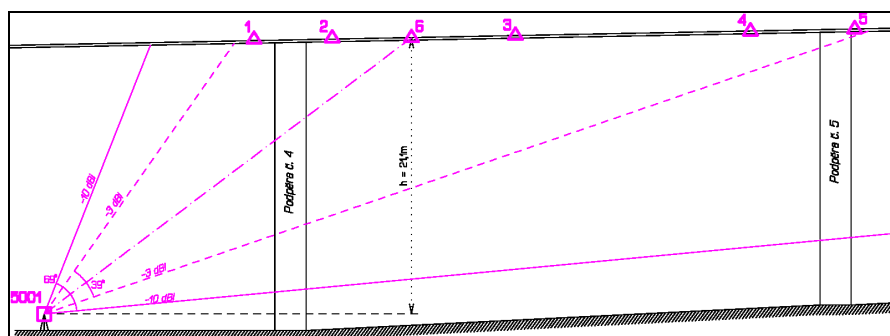
3 Sledování svislých průhybů silničního betonového mostu

Sledování svislých průhybů silničního betonového mostu za běžného provozu lze ukázat na příkladě mostu na silnici I/19 u Pelhřimova [1,2].

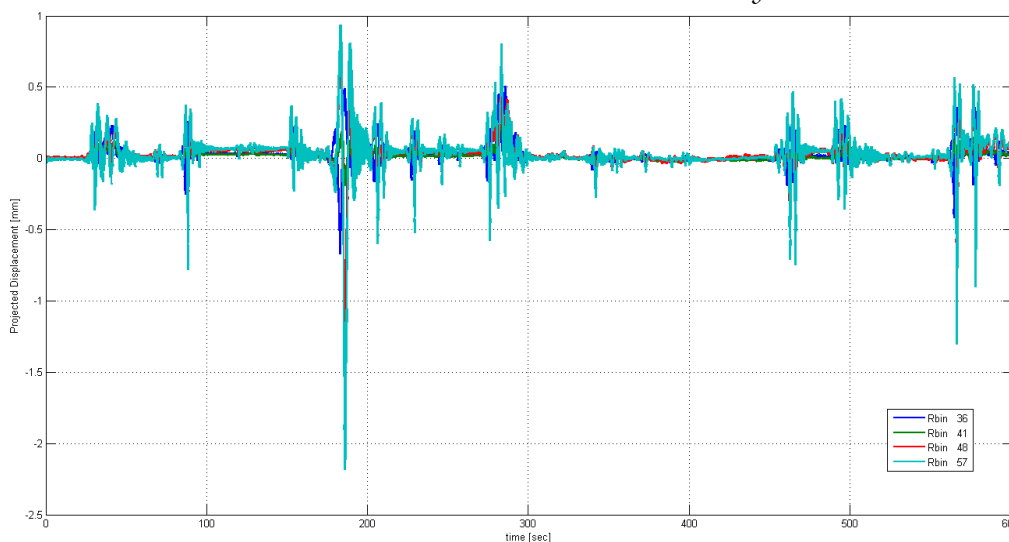


Obrázek 2 – Schematické znázornění mostu a údolí pod ním

Situace při měření a způsob rozmístění koutových odražečů je zřejmá z obrázku 3. Po vyhodnocení kvality naměřených dat bylo možno přistoupit k vyhodnocení vlastních výsledků měření, kterými jsou poklesy mostu. K tomu slouží grafy na obrázcích 4 a 5 svislých pohybů sledovaných koutových odražečů.

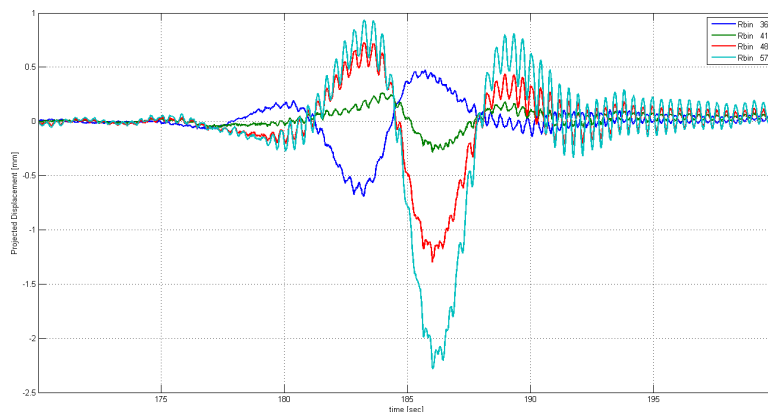


Obrázek 3 – Umístění a orientace radaru a koutových odražečů



Obrázek 4 – Svislé pohyby odražečů č. 1,2,6 a 3

Na grafu 4 jsou patrné poklesy i zvedání mostu při průjezdu. Největší poklesy jsou způsobeny naloženými nákladními vozidly projíždějícími v severním pruhu, kde jsou na okraji mostu upevněny koutové odražeče. Menší poklesy jsou pak způsobeny lehčími vozidly a případně vozidly projíždějícími v opačném směru. K podrobnějšímu vyhodnocení je vybrán časový úsek, během něhož došlo k největšímu poklesu, tj. v čase 170s až 200s a situaci zachycuje graf 5.



Obrázek 5 – Svislé pohyby odražečů č. 1,2,6 a 3 v čase 170s až 200s

Podrobnější rozbor výsledků a zdůvodnění pohybů jednotlivých odražečů včetně jejich vzájemných souvislostí je proveden například v [1]. Při znázornění frekvencí vibrací koutových odražečů periodogramem je možno odečíst základní frekvenci kmitání mostu při průjezdu vozidla, která v tomto případě činila 2,671 Hz, tj. cca 5 kmitů za 2 vteřiny.

4 Sledování vodorovných pohybů věžových vodojemů

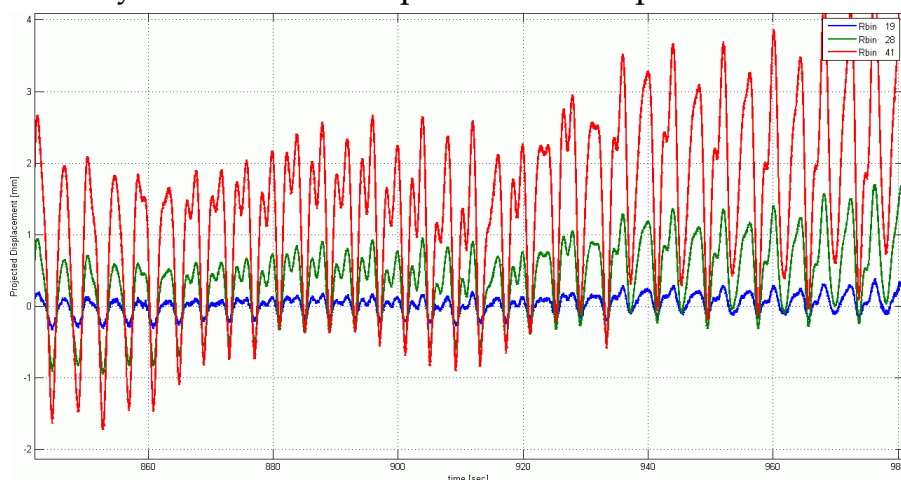
Jako příklad sledování vodorovných pohybů věžových vodojemů byl zvolen vodojem v obci Klecany nedaleko Prahy. Vodojem se skládá z nosného válcového (tubusového) sloupu a nádrže kulového tvaru. Nosný sloup vodojemu se skládá ze tří sekcí, každá sekce se pak skládá z několika prstenců. Spoje sekcí výrazně vystupují nad povrch sloupu a tvoří potenciální přirozené odražeče radarového signálu. Spoje prstenců jsou méně výrazné, nad povrch sloupu však vystupují také. Není tak třeba instalovat žádné koutové odražeče.



Obr. 6 Vodojem, spoje sekcí a prstenců sloupu, měřický náčrt

V průběhu měření vál velmi slabý proměnlivý severozápadní vítr a radar byl postaven ve směru větru na vodojem. Na grafu 7 jsou znázorněny

pohyby tří bodů korespondujících s rozhraními jednotlivých sekcí dle obrázku 6. Je zde patrná vysoká frekvence a proměnlivá amplituda kmitání sloupu.



Obr. 7 Výsledné složené kmitání sloupu vodojemu

Na grafu 7 je znatelné složené kmitání, nejspíše způsobené pohybem vody v nádrži vodojemu nezávisle na kmitání sloupu vyvolaného větrem. Výsledné kmitání je tedy součtem dvou složek. Na periodogramu vodorovných pohybů jsou patrné tři základní frekvence, přičemž nejvýraznější z nich je 0,24Hz, což je přibližně 1 krát za 4s. Další podrobnosti jsou v [3].

5 Závěr

Předkládaná technologie pozemní radarové interferometrie umožňuje určování deformací a průhybů celé řady objektů. Jen z důvodu omezení velikosti tohoto příspěvku zde nebylo možné uvést i výsledky měření deformací dalších objektů (vodorovné příčné pohyby stěn plavebních komor, vodorovné pohyby stožárů větrných elektráren). Technologie umožňuje určovat deformace a průhyby stavebních objektů s vysokou relativní přesností až 0,01 mm v reálném čase a současně na více místech objektu. Z výsledků lze získat zcela nové informace a poznatky o charakteru chování určitých konkrétních typů objektů. Doporučuje se měření opakovat v určitých časových odstupech a získat tak i informace o tom, zda se určované dynamické parametry deformací objektů nemění v čase, především v závislosti na stáří nebo ročním období.

Veškeré měřické práce byly provedeny v rámci projektu P-InSAR pracovníky geodetické firmy Geodézie Ledec nad Sázavou s.r.o.

Tento příspěvek byl podpořen Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR, v rámci programu TIP, projekt „Výzkum možností pozemního InSAR pro určování deformací rizikových objektů a lokalit“ č. FR-TI4/436.

Literatura

- [1] Talich M.: *Velmi přesné určování svislých průhybů mostních konstrukcí metodou pozemní radarové interferometrie*. In: *Konferencia IPG 2013 - Vytyčovanie a kontrolné meranie technologických zariadení, Bratislava, Slovensko, 12. – 13. septembra 2013, ISBN 978-80-227-4032-6*
- [2] Talich M., Hankus D., Soukup L., Hauser T., Antoš F., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: *Ověřená technologie určování svislých průhybů betonových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem*. ÚTIA, 2012, 13 s., Dostupné z: www.p-insar.cz
- [3] Talich M., Hankus D., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: *Ověřená technologie určování vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem*. ÚTIA, 2013, 12 s., Dostupné z: www.p-insar.cz