

Metodika určování svislých průhybů mostních konstrukcí pomocí technologie radarové interferometrie

Filip Antoš, Milan Talich, Michal Glöckner, Ondřej Böhm, Lubomír Soukup, Jan Havrlant,

Miroslava Závorská, Jakub Šolc

Realizováno v rámci programového projektu FR-TI4/436 v programu TIP financovaného MPO ČR v rámci projektu "Výzkum možností pozemního InSAR pro určování deformací rizikových objektů a lokalit."

Ústav teorie informace a automatizace, AV ČR, v. v. i.

Geodézie Leděč nad Sázavou, s. r. o.

prosinec 2015

Obsah

1. Předmět a cíl metodiky	3
2. Struktura metodiky.....	4
3. Přístrojové vybavení	5
4. Zásady pro měření pozemním interferometrickým radarem.....	6
5. Přípravné práce a rekognoskace.....	7
6. Postup měření.....	8
6.1 Výběr sledovaných míst a jejich signalizace.....	9
6.2 Umístění radaru	10
6.3 Příprava a zacílení radaru	10
6.4 Provedení měření radarem.....	11
6.5 Doplnková měření	13
7. Postup výpočtu	14
7.1 Teoretický úvod a základní rozbor přesnosti.....	14
7.2 Výpočet a výběr bodů k vyhodnocení.....	15
8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků	17
8.1 Analýza a vyhodnocení výsledků	17
8.2 Způsob dokumentace výsledků	19
9. Závěr	21
10. Uplatnění metodiky a pro koho je metodika určena	22
11. Srovnání „novosti postupů“, jejich zdůvodnění a jejich srovnání s postupy v zahraničí.....	23
12. Seznam použité související literatury	24
13. Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány (pokud existují), případně výstupy z originální práce.....	25

1. Předmět a cíl metodiky

Tento dokument popisuje metodiku pro měření svislých průhybů mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem. V metodice uváděné technické parametry a příklady jsou pro interferometrický radar IBIS-S italského výrobce IDS, který je nejpoužívanějším radarem pro tento druh prací. Obecná doporučení a závěry jsou však platná pro každý radar tohoto druhu.

Pozemní radar měří průhyby v celé délce mostu současně, měření je kontinuální s vysokou vzorkovací frekvencí (až 200 Hz) a zároveň i s vysokou přesností (až 0,01 mm). S využitím přirozených odražečů radarového signálu na konstrukci mostu je možno měřit průhyby na dálku bez nutnosti přístupu ke konstrukci. Průhyby mostní konstrukce jsou vyvolány buď vlivem povětrnostních podmínek, nebo působením sil, které jsou vyvolány dopravními prostředky pohybující se po mostě.

Cílem metodiky je poskytnout odborné veřejnosti z řad především geodetických firem návod jak provádět přesné měření svislých průhybů mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem.

2. Struktura metodiky

Metodika je rozdělena do těchto hlavních oblastí:

- popis přístrojového vybavení,
- výčet specifik pro měření pozemním interferometrickým radarem,
- rekognoskace mostu, zjištění jeho konstrukce, obhlídka okolního terénu,
- měření mostní konstrukce: selekce měřených míst na objektu, umístění koutových odražečů, volba vhodného stanoviště radaru, měření objektu a doplňková měření pro vyhodnocení,
- výpočty měření: základní rozbor přesnosti, výběr bodů pro vyhodnocení měření a samotný výpočet pohybů mostních konstrukcí
- analýza výsledků a doporučený způsob dokumentace měření a vyhodnocení.

3. Přístrojové vybavení

Pro měření se používá vysoce stabilní koherentní pozemní interferometrický radar. Takovým radarem může být například radar IBIS-S italského výrobce IDS (Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.). Radar pracuje v pásmu super krátkých vln (SHF) se střední frekvencí okolo 17 GHz, tedy při vlnové délce přibližně okolo 0,0176m. Při měření lze radar nastavit do dvou pracovních režimů: statického a dynamického. Při dynamickém režimu radar snímá odražené signály s frekvencí 1 až 200Hz. Tuto tzv. snímací (vzorkovací) frekvenci lze zvolit podle požadovaných nároků na podrobnost výsledků zaměření, její maximální možná hodnota ovšem klesá s dosahem měření (max. 200Hz při dosahu do 150m, max. 40Hz při dosahu do 0,5km, max. 16Hz při dosahu do 1km). Směrodatná odchylka radarem zaměřených pohybů dle údajů výrobce je až 0,01mm a závisí zejména na odrazivosti měřeného objektu.

Radarové vlny se dobře dorážejí od kovových předmětů na objektu. Je-li objekt betonový, je nutné pro zvýšení odrazivosti na objekt instalovat speciální koutové odražeče, které jsou nejčastěji vyrobeny z nerezů či hliníku. Přesnost se pak odvíjí od velikosti koutových odražečů, vzdálenosti koutových odražečů od radaru a úhlu mezi směrem záměry a směrem, do něhož jsou pohyby promítány. Rozlišovací schopnost jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, (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 jsou dodávány různé typy antén, které se liší velikostí horizontálního a vertikálního vyzařovacího úhlu. Každá anténa je také charakterizovaná ztrátou signálu.

Ovladač radaru je tvořen počítačem, např. notebookem se speciálním softwarem, kterým se radar obsluhuje a který také zpracovává měření.

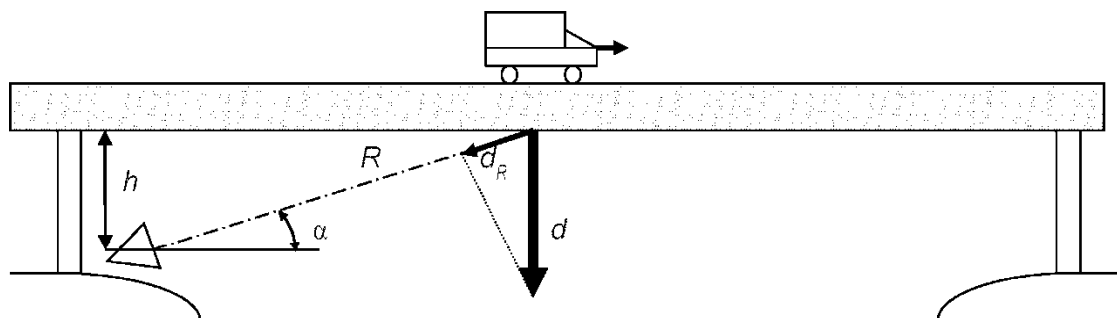
Radar je vhodné připevnit na geodetický stativ, který je robustní a tedy i dobře stabilní. Pomocí nastavitelných noh lze radar umístit do požadované výšky a směru.

Pro doplňková měření se použijí vhodné geodetické přístroje, zejména totální stanice s bezhranolovým měřením délek, případně ruční dálkoměr, pásmo apod.

Důležitou součástí je meteorologická stanice s automatickým záznamem povětrnostních podmínek. Při měření se doporučuje používat i videokameru případně snímat v pravidelných intervalech objekt měření pro následnou interpretaci naměřených dat.

4. Zásady pro měření pozemním interferometrickým radarem

- 1) Pozemní interferometrický radar měří pouze relativní pohyby po určitou dobu, která je vhodně zvolena měřičem. Relativní pohyby sledovaného objektu od času $t=0$ a počáteční hodnoty $d=0$ lze určit při jednom postavení radaru, na provedená měření nelze navázat později při jiném postavení. Pozemním interferometrickým radarem tedy obecně nelze provádět etapová měření a porovnávat jednotlivé etapy.
- 2) Pozemní interferometrický radar měří přesné pohyby pouze ve směru záměry, tzn. po spojnici radaru a sledovaného bodu (angl. Line of Sight, zkráceně LOS). Není proto schopen zaznamenat pohyby kolmé na záměrnou přímkou (resp. pohyby po kulové ploše procházející sledovaným bodem se středem v radaru).



Obr. 1: Promítání přímo měřeného pohybu d_R do svislého směru

- 3) Velikost přímo měřených pohybů odpovídá průmětům skutečných pohybů kolmo na směr záměry (LOS). Aby bylo možno z přímo měřených dat určit velikost skutečného průhybu konstrukce mostu, je třeba naměřené pohyby zpětně promítnout do směru předpokládaného pohybu objektu, tj. kolmo od směru záměry do svislice, neboť se předpokládá, že sledovaná místa na mostní konstrukci se pohybují pouze po svislici. Kdyby se sledovaná místa na objektu pohybovala jiným směrem (např. šikmo nahoru), zavádělo by to do výsledku chybu, kterou nelze odhalit. Skutečný šikmý pohyb by totiž byl mylně pokládán za pohyb svislý.
- 4) Směr záměry, až na výjimky, není totožný se směrem skutečného pohybu (průhybu) mostní konstrukce. Směr záměry radaru je třeba volit tak, aby byl co nejméně odlišný od směru předpokládaného průhybu mostní konstrukce objektu, tj. od svislice.
- 5) Maximální hodnota pohybu mezi dvěma po sobě následujícími časy záznamu dle vzorkovací frekvence je dána nejednoznačností měřené fáze. Pro radar IBIS činí $\lambda/4 = 4,38\text{mm}$. Při překročení této hodnoty dojde k chybnému výpočtu velikosti pohybu a znehodnocení výsledku měření. Tuto chybu nelze odhalit.

5. Přípravné práce a rekognoskace

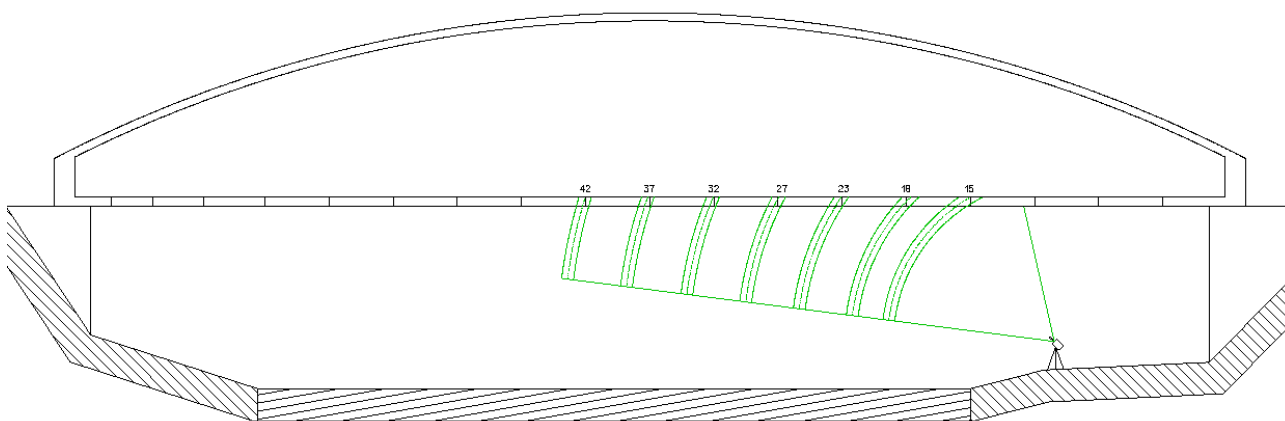
Před zaměřením mostu pozemním interferometrickým radarem je nutné provést rekognoskaci a fotodokumentaci mostu při osobní prohlídce objektu v terénu. V případě potřeby je vhodné nalézt dostupné informace a fotografie mostu i z jiných zdrojů (internet, vyžádat si je od vlastníka mostu apod.). Při rekognoskaci je třeba zjistit základní konstrukční parametry mostu jako např. počet a rozmístění pilířů, kovových příčných nosníků, počet a rozmístění dilatačních spár, počet a rozmístění kontrolních výškových bodů (nivelačních značek), možnosti připevnění koutových odražečů.

Dále je nutno zjistit možnosti umístění stanovisek radaru v závislosti na vegetaci a charakteru terénu pod mostem. Již při příjezdu k mostu se také zjistí přístupové cesty, které často vyžadují použití terénního vozidla. Ve složitějších případech je vhodné provést geodetické zaměření účelového polohopisného a výškopisného plánu a připojit toto měření na pomocné body určené v místním souřadném systému či S-JTSK.

Na základě rekognoskace, jejíž součástí je případně i účelový polohopisný a výškopisný plán, se navrhne postup zaměření pozemním interferometrickým radarem, stanoviska radaru a umístění včetně způsobu uchycení koutových odražečů. Současně je také vhodné při volbě stanoviska vzít v úvahu i okolní objekty, které by mohly do měření vstoupit nebo ho rušit nežádoucími odrazy.

6. Postup měření

Mosty, ať už betonové či kovové, jsou specifické dopravní stavby s různým konstrukčním řešením. Nelze tedy předpokládat, že ať už vlivem zatížení nebo vlivem povětrnostních podmínek se budou všechny mostní konstrukce chovat stejně. Deformace může probíhat ve vertikálním směru, tedy nahoru a dolů, může docházet k náklonům, kdy se jedna strana mostovky prohne dolů a druhá strana naopak nahoru, průhyb jednoho mostního pole může nebo nemusí mít vliv na prohnutí sousedních mostních polí, může docházet ke kmitání, atd. Před měřením je tedy vhodné poradit se s odborníkem na mostní konstrukce, jak se bude most během měření pravděpodobně chovat a definovat tak vhodná místa na mostě, která by se měla měřit pozemním radarem současně tak, aby bylo zaměřeno chování mostní konstrukce co nejkomplexněji.



Obr. 2: Boční pohled na umístění radaru a snímanou část mostu

Obecně lze říci, že mostní konstrukce se při zatížení pohybují dolů a pak zpět nahoru. Je tedy důležité, aby směr záměry co nejvíce odpovídal předpokládanému svislému pohybu a byl co nejvíce vertikální. Musí být ale dodržena podmínka, že každý přirozený odražeč na mostě, případně připevněný koutový odražeč, padne do své vlastní radiální spádové oblasti. Toho lze s úspěchem dosáhnout především u vysokých mostů, které jsou proto pro měření pozemním interferometrickým radarem nejvhodnější.

Dovoluje-li to okolní terén a typ konstrukce mostu, doporučuje se zaměřování celého mostu najednou. To poskytuje možnost zjištění vlivu zatížení jednoho mostního pole na průhyby ostatních mostních polí. Protože však délka mostů je obvykle značně větší než jejich výška a často se jedná o relativně dlouhé stavby, nemusí být vždy možné zaměřit celý most najednou. K zaměřování je pak nutné vybrat pouze jeho části, které budou zaměřovány postupně, tj. části tvořené několika mostními poli nebo alespoň jednotlivými ovšem celými mostními poli. Pak se zaměří v první řadě ta část mostu, kde se předpokládají největší poklesy, tj. střední část mostu nebo střední mostní pole, resp. obě mostní pole po stranách střední podpěry pokud má most lichý počet podpěr. U složitějších mostů s větším počtem podpěr je vždy nutné zaměřit všechna mostní pole a to i v případě, že by měla být zaměřována postupně.

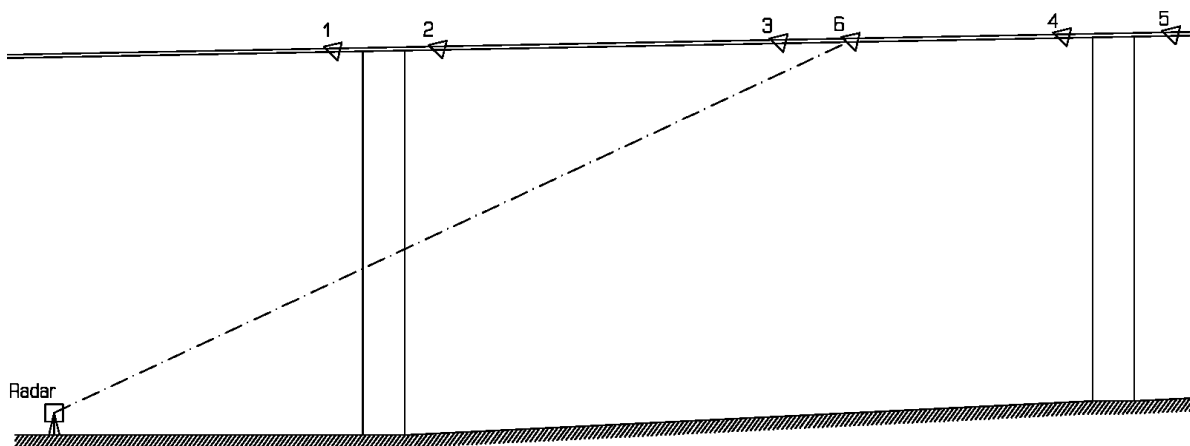
Další omezení při zaměření mostu pozemním interferometrickým radarem způsobuje těleso mostu, které může být tak široké, že koutové odražeče nelze upevnit na obě strany mostu tak, aby byly viditelné z jednoho stanoviska radaru. Proto může být nutné zaměřit každou stranu mostu zvlášť. V případě pochybností o spolehlivosti výsledků měření zejména u vzdálenějších bodů je vhodné provést kontrolní měření příslušné části mostu z opačného směru (od protější strany mostu).

6.1 Výběr sledovaných míst a jejich signalizace

Důležitým faktorem pro výběr sledovaných míst je materiál, z kterého je mostní konstrukce vyrobena. Betonová konstrukce velmi špatně odráží radarový signál, a proto je nezbytné sledovaná místa signalizovat pomocí koutových odražečů. Naopak kovová konstrukce radarový signál odráží velmi dobře a lze tedy na ní měřit více míst než na betonovém mostě, ale zase bývá složitější identifikace míst, od kterých se signál odráží. U složitějších kovových konstrukcí může dojít k vícenásobným odrazům radarového signálu, což znehodnocuje měřená data především vzdálenějších cílů. Jsou-li místa odrazů špatně identifikovatelná, nebo neposkytují dostatečně kvalitní odraz v důležitých bodech dobře vystihujících pohyby mostu, lze kvalitu odrazu zvýšit připevněním koutových odražečů i na kovovou konstrukci. V principu platí, že vyšší počet proměřovaných bodů dává lepší vypovídající schopnost pro určování deformací mostu.

Koutové odražeče se rozmístí na taková místa, která nejlépe znázorní pohyby mostu. Jejich rozmístění je vhodné konzultovat s odborníkem na konstrukce mostů (statik, projektant) nebo s objednatelem, který použije výsledky měření k dalším analýzám. Odražeče musí být pevně spojeny s mostní konstrukcí tak, aby věrně kopírovaly její pohyby a minimalizovaly se tak druhotné pohyby způsobené např. kmitáním zábradlí na mostě, povětrnostními vlivy apod. Při rozmísťování koutových odražečů je nutno také dbát na to, aby každý koutový odražeč padl do jiné radiální spádové oblasti, tj. aby se šikmé délky radaru k jednotlivým koutovým odražečům lišily více, než je délková rozlišovací schopnost radaru ($\Delta R = 0,75$ m). Skutečné vzdálenosti mezi koutovými odražeči upevněnými pouze na jednu stranu mostu jsou obvykle dostatečně velké, aby tento problém nenastal. Při rozmístění koutových odražečů na obě strany mostu je nutno je buďto na jedné či obou stranách vhodně posunout nebo volit umístění radaru částečně bokem mimo svislou rovinu procházející podélnou osou mostní konstrukce, vždy tak, aby každý padl do jiné radiální spádové oblasti.

Minimální konfigurace se základním počtem bodů pro určení průhybů jednoho mostního pole by měla vypadat takto. Jeden koutový odražeč se umístí přibližně uprostřed mostního pole, kde obvyklé bývá také nivelační značka kontrolního výškového bodu (odražeč č. 3 na obrázku 3). Další koutové odražeče se pak umístí nad obě podpěry, ale místo jednoho odražeče přímo nad podpěrou se upevní vždy dva odražeče, jeden před podpěru a jeden za podpěru. Důvody jsou tři, prvním je zabránění rušení radarového signálu odraženého od odražeče odrazem od podpěry, druhým je snaha zaměřit pohyby mostu před a za podpěrou a třetím nemožnost přesně určit místo na styku podpěry s tělesem mostu a přesně na toto místo upevnit koutový odražeč. Pro zaměření jednoho mostního pole bude tedy na most upevněno minimálně pět koutových odražečů. V případě potřeby je možno přidat šestý pomocný koutový odražeč, který bude signalizovat bod, na který bude puškohledem zacílen radar.



Obr. 3: Umístění radaru a koutových odražečů

6.2 Umístění radaru

Radar se umístí na stativ před podpěru mostu na vhodné místo se zpevněným nebo nezpevněným povrchem. Při sledování pohybů s přesností až na setiny mm je nutno dbát zvýšené opatrnosti při zajištění stability radaru při měření. Na místo vybrané pro stanoviště radaru nesmí působit vibrace z okolí zapříčiněné např. projíždějícími vozidly. Do nezpevněného terénu je vhodné radar umístit na pečlivě zašlápnutý těžký stativ s dostatečně široce rozloženými nohama. Před měřením je nutno zkontrolovat pevnost uchycení radaru ke stativu a pevnost stativu. V zimním období je stabilita radaru ovlivněna rozmrzáním terénu pod jeho nohama a proto se doporučuje umístit stativ na zpevněný povrch. Také je potřeba dle možností zabránit vlivu tepelných deformací stativu, zejména stanovením vhodné, nepřilíši dlouhé doby trvání měření. V letním období je nezbytné stativ chránit před přímým slunečním světlem, v zimním období je nutno stativ před použitím temperovat na teplotu okolního vzduchu. V době měření je třeba minimalizovat pohyb v okolí stativu s radarem a nepřecházet před anténami v oblasti ozáření.

Stanoviště radaru by mělo ležet přibližně na průsečnici terénu a svislé roviny procházející nejlepšími odraznými místy na mostě nebo koutovými odražeči upevněnými na jedné straně mostu a terénu. Pokud se zaměřují koutové odražeče upevněné na obou stranách mostu, umístí se radar pod těleso mostu přibližně doprostřed jeho šířky (v případě, že odražeče nejsou umístěny paralelně ve stejných vzdálenostech) nebo se radar umístí bokem mimo svislou rovinu procházející podélnou osou mostu tak, aby každý odražeč padl do jiné radiální spádové oblasti.

6.3 Příprava a zacílení radaru

Na radar se upevní antény, jejichž vertikální vyzařovací úhel je větší než horizontální. V případě použití jiného typu antén, které mají horizontální úhel záběru větší než vertikální je nutno radar s anténami sklopit do svislé polohy.

Výškové zacílení radaru je vhodné provádět při zapnutém přístroji, kdy je možno zároveň sledovat profil odrazivosti zobrazovaný na ovladači radaru (notebooku). Kvalitní odrazná místa jsou vykreslena jako výrazná maxima poměru signálu k šumu (SNR) ve vzdálenostech, kde se nacházejí. Radar se pak výškově nakloní tak, aby poměry SNR všech odrazných míst byly dostatečně vysoké (nejlépe nad 40 dB). Poměr signálu k šumu (SNR) klesá se vzdáleností mezi radarem a odrazným místem a také s úhlem mezi střední záměrnou přímkou radaru (podélnou osou antén radaru) a záměrou na příslušné odrazné místo (LOS). Proto bude SNR na vzdálenějších bodech snížen větší vzdáleností, ale zvýšen menším úhlem k záměrné přímce radaru (body č. 3, 6 na obrázku 3). Na bližších bodech bude tento poměr naopak snížen větším úhlem ke střední záměrné přímce radaru, ale zvýšen menší vzdáleností od radaru. Takovými blízkými body jsou body nalevo od bodu č. 1 na obrázku 3. Odrazy od všech odrazných míst mohou tak být v optimálním případě přibližně stejně kvalitní (může je charakterizovat přibližně stejná hodnota SNR). U vzdálených bodů, jejichž výškový úhel je příliš malý (např. body napravo od bodu č. 5 na obrázku 3), se zvětšují hodnoty projekčního faktoru. To má za následek nižší přesnost promítnutých svislých pohybů. U takovýchto příliš vzdálených bodů je třeba se rozhodnout, zda budou zahrnuty do výsledného vyhodnocení nebo zda mají být znovu zaměřeny z druhého konce mostu. K tomu poslouží rozbor přesnosti popsany v odstavci 7.1.

Na střední záměrnou přímku vytyčenou puškohledem je možné umístit pomocný koutový odražeč, který bude sloužit k signalizaci směru střední záměrné přímky radaru a bude později zaměřen geodeticky polární metodou.

6.4 Provedení měření radarem

Zaměření mostní konstrukce se provede dynamickou metodou, tj. s vysokou vzorkovací frekvencí, tak aby se podrobně zachytil pohyb cílového objektu v čase zatížení. Přitom se předpokládá, že cílový objekt se časem vrátí do původní polohy. Délku měření je pak vhodné zvolit dostatečně dlouhou, aby se zachytil klidový stav před zatížením, stav v čase zatížení, tlumení kmitání mostního tělesa po skočení zatížení a návrat do klidového stavu. Důležité geometrické parametry, které vstupují do výpočtů a rozborů přesnosti, se buď odhadnou anebo se změří (viz. doplňková měření). Těmito parametry jsou:

- a) Délka mostu resp. délka měřeniím dotčeného úseku mostu

Tento parametr slouží zejména ke grafickému znázornění situace a staničení přirozených odrazových míst nebo koutových odražečů od zvoleného počátku.

- b) Podélný sklon mostu

Podélný sklon většiny mostů je tak malý, že je možno jej zanedbat. Sklon ovlivní převýšení mezi koutovými odražeči a radarem a tím i projekční faktor u těch odražečů, kde je toto převýšení odlišné od souřadnice y radaru. Chybu projekčního faktoru způsobenou zanedbáním sklonu mostu je možno kontrolně vypočítat přičemž stačí tento výpočet provést u koutových odražečů s největším rozdílem převýšení od souřadnice y radaru.

c) Souřadnice x a y radaru

Souřadnice x radaru je vodorovná vzdálenost s minusovým znaménkem mezi radarem a nejbližším odrazným místem. Souřadnice y je záporně vzaté převýšení mezi radarem a nejbližším odrazným místem. Souřadnice x slouží zejména ke grafickému znázornění situace, souřadnice y slouží k určení projekčního faktoru pro výpočet vodorovných pohybů. Pokud je zanedbán sklon mostu, je možno za x dosadit nulu a za y průměr všech převýšení mezi radarem a koutovými odražeči.

d) Výškový náklon radaru

Je to výškový úhel střední záměrné přímky radaru (podélné osy antén). Slouží zejména ke grafickému znázornění situace a normalizovaného grafu závislosti ztráty antény na úhlu od podélné osy antény. Jeho přibližnou hodnotu ve stupních je možno odečíst ze stupnice 3D hlavy stativu radaru.



Obr. 4: Odečtení výškového náklonu radaru na stupnici 3D hlavy stativu

e) Maximální rozsah záznamu měřených dat

Maximální vzdálenost, v jejímž rozsahu jsou zaznamenávána data, je dána šikmou délkou mezi radarem a nejvzdálenějším odrazným místem či koutovým odražečem. Nejvzdálenější místo se na profilu odrazivosti znázorní jako nejvzdálenější výrazné maximum SNR. Je vhodné rozsah ještě trochu zvýšit, aby bylo maximum SNR na profilu odrazivosti jasně patrné.

Doba trvání měření se vhodně zvolí dle intenzity provozu na mostě tak, aby se zachytily poklesy způsobné např. průjezdem těžkých nákladních vozidel, vlakových souprav, zpravidla stačí 15 až 20 minut.

6.5 Doplnková měření

a) Měření pro okamžité určení vybraných geometrických parametrů v terénu

Měření slouží k určení přibližných hodnot vybraných geometrických parametrů, které je nutno zadat do programu ovladače a provede se ještě před vlastním měřením radarem. Veškeré hodnoty zadávané v terénu do programu ovladače kromě maximální vzdálenosti, po kterou jsou zaznamenávány měřená data, lze později při zpracování změnit. K jejich určení v terénu tedy stačí pouhý odhad. Bylo-li provedeno zaměření polohopisu a výškopisu mostu a jeho okolí při rekognoskaci a stanovisko radaru odpovídá naplánovanému umístění, je možno použít geometrické parametry z tohoto měření. K přibližnému určení potřebných geometrických parametrů postačí také měření ručním dálkoměrem, pásmem apod.

Dále může toto měření sloužit ke kontrolní identifikaci přirozených odrazných míst nebo přímo koutových odražečů. Odrazná místa se v profilu odrazivosti zobrazovaném programem ovladače zobrazí jako výrazná maxima SNR. Ve většině případů je zřejmé, jakým odrazným místům odpovídají, pokud to zřejmé není, je možné je identifikovat porovnáním šikmé délky měřené radarem a šikmé délky měřené ručním dálkoměrem či polární metodou nejlépe přímo ze stanoviska radaru.

b) Měření pro následné zpracování a vyhodnocení výsledků

Měření pro následné zpracování a vyhodnocení výsledků slouží:

- k zaměření geometrických parametrů zadávaných do programu ovladače určeného k výpočtu a vyhodnocení výsledků měření pozemním interferometrickým radarem (tyto parametry jsou stejné jako parametry zadávané do programu ovladače uvedené v předchozí kapitole).
- ke znázornění situace při měření do měřického náčrtu.

Měření se provede polární metodou totální stanicí umístěnou místo radaru na jeho stativu, případně z jiného místa. Měření se připojí na pomocné body určené dříve při rekognoskaci v místním systému či S-JTSK. Zaměří se základní polohopis a výškopis mostu a jeho okolí, nebyl-li zaměřen při rekognoskaci a odrazná místa, koutové odražeče včetně pomocného cíle, na který byla zacílena střední záměrná přímká radaru. Délky na koutová odrazná místa a odražeče se měří v bezhranolovém módu. U koutových odražečů se cílí na jejich vrchol.

Doplnková měření většinou není nutno provádět s přesností obvyklou v geodézii, neboť radar měří délky s rozlišovací schopností $\Delta R = 0,75\text{m}$. Není to ani prakticky možné, protože příslušné měřené veličiny nejsou dobře definovány. Např. obecně není znám počátek měření délek radarem, obecně nelze přesně určit body odrazu na sledovaném objektu, při záměně radaru a totální stanice či odrazného hranolu nelze dodržet stejnou výšku přístroje či cíle a při náklonu 3D hlavy radaru či při použití adaptéru na šroub stativu nelze dodržet ani centraci, puškohledem radaru nelze přesně cílit apod.

7 Postup výpočtu

7.1 Teoretický úvod a základní rozbor přesnosti

Pozemní interferometrický radar měří pohyby sledovaných objektů ve směru záměry, které se určují z fázového posunu dle vzorce:

$$d_R = \frac{-c}{4\pi f} \Delta\varphi.$$

Proměnnou v tomto vzorci je fázový posun $\Delta\varphi$ a frekvence f , kde je ovšem možno dosadit střední hodnotu $f = 17$ Ghz. Směrodatnou odchylku fázového posunu lze vypočítat pomocí vzorce:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2SNR}},$$

kde SNR je prostý (nelogaritmický) poměr signálu k šumu. Program IBIS Data Viewer vyjadřuje poměr signálu k šumu dvěma způsoby – jako tepelný SNR_t a odhadnutý SNR_e . Odhadnutý poměr signálu k šumu SNR_e je vhodný pro odhad přesnosti měření. Směrodatnou odchylku pohybu ve směru záměry lze tedy vyjádřit vzorcem:

$$\sigma_{d_R} = \frac{c}{4\pi f \sqrt{2SNR_e}}.$$

Pro promítnutý pohyb pak platí:

$$d = d_R \frac{R}{h} = d_R E,$$

kde $E = R/h$ je tzv. projekční faktor, R je šikmá délka měřena radarem a $h=y$ je převýšení mezi radarem a sledovaným objektem (viz. Obr. 6). Přesnost promítnutého pohybu d závisí na přesnosti pohybu ve směru záměry a na projekčním faktoru E a jeho přesnosti. Směrodatnou odchylku projekčního faktoru lze určit pomocí zákona hromadění variancí pro danou směrodatnou odchylku délky R a převýšení h (σ_R, σ_h):

$$\sigma_E = \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_h^2 \frac{R^2}{h^2}}}{h}.$$

Směrodatnou odchylku σ_R je možné odhadnout pomocí rozlišovací schopnosti $\Delta R = 0,75$ m. Polovinu rozlišovací schopnosti lze považovat za mezní odchylku a stanovit $\sigma_R = \Delta R/2/t$, kde hodnotu parametru t je možno volit z intervalu $2 < t < 3$. Přesnost určení převýšení h by měla odpovídat přesnosti měření délky R . Převýšení h tedy není třeba měřit tak přesně, jak je v geodezii obvyklé.

Stačí dodržet decimetrovou přesnost a zvolit např. $\sigma_h = 20$ cm.

Směrodatná odchylka promítnutého pohybu je pak:

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_E^2 d_R^2 + \sigma_{d_R}^2 E^2},$$

kde σ_E je směrodatná odchylka projekčního faktoru E .

Přestože měření R a h je prováděno s přesností nižší než je v geodézii obvyklé, chyba projekčního faktoru je ve většině případů tak malá, že je možno ji zanedbat. Pak platí zjednodušený vzorec:

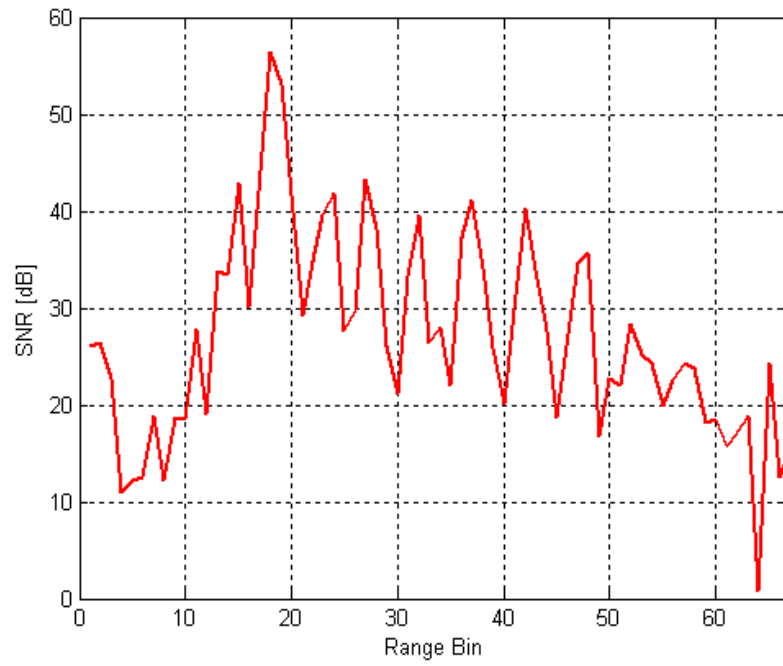
$$\sigma_d = \sigma_{d_R} E.$$

7.2 Výpočet a výběr bodů k vyhodnocení

K výpočtu a vyhodnocení výsledků měření pozemním interferometrickým radarem IBIS-S je možno použít výrobcem dodávaný program IBIS Data Viewer. V prvním kroku je nutno vložit do programu IBIS Data Viewer parametry měření mostu pozemním interferometrickým radarem IBIS-S. Načtením datového souboru měřených dat do programu IBIS Data Viewer tento program převezme parametry nastavené v terénu do programu ovladače IBIS-S Controller. Protože v terénu jsou obvykle nastaveny pouze přibližné geometrické parametry, je nutno do programu IBIS Data Viewer zadat přesnější hodnoty určené z výsledků doplňkového měření. Jedná ze zejména o hodnotu souřadnice y radaru, která určuje projekční faktor. Z dalších voleb je užitečná např. možnost snížit snímací frekvenci pro zpracování měřených dat byla-li v terénu nastavena příliš vysoká. Další parametry není dle doporučení výrobce nutno měnit, jejich nastavení přísluší pouze zkušeným uživatelům.

Po zadání potřebných parametrů je možno provést výpočet, při němž se zpracují surová naměřená data a zpřístupní další funkce programu.

Po výpočtu je nutno vybrat konkrétní body resp. radiální spádové oblasti k vyhodnocení. Výběr těchto radiálních spádových oblastí se provádí na profilu odrazivosti radarového signálu neboli grafu poměru signálu k šumu (SNR). Program IBIS Data Viewer umožňuje zobrazit tepelný poměr signálu k šumu (SNR_t) nebo odhadnutý poměr signálu k šumu (SNR_e) a to v dB nebo prostý poměr bez jednotky. Na základě dosavadních zkušeností je nejlepší volit odhadnutý poměr signálu k šumu (SNR_e) v prosté podobě bez jednotky, pro slabé odrazy pak v dB. Jsou-li sledované body na mostní konstrukci signalizovány koutovými odražeči, je výběr radiálních spádových oblastí k vyhodnocení obvykle jednoduchý, protože radiální spádové oblasti obsahující koutové odražeče se v profilu odrazivosti zobrazí jako výrazná maxima SNR. Pro kontrolu je možno provést identifikaci radiálních spádových oblastí obsahujících koutové odražeče porovnáním šikmých délek R měřených radarem (poloměrů radiálních spádových oblastí) a šikmých délek měřených polární metodou.



Graf 1: Profil odrazivosti radar. signálu SNRe [dB]

8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků

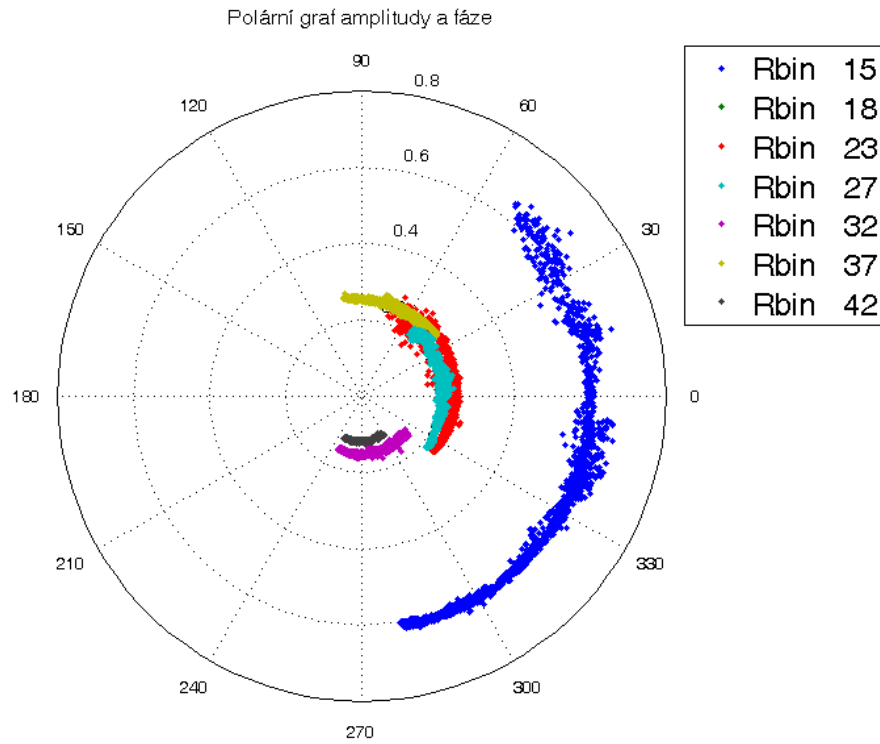
8.1 Analýza a vyhodnocení výsledků

1) Dynamická analýza

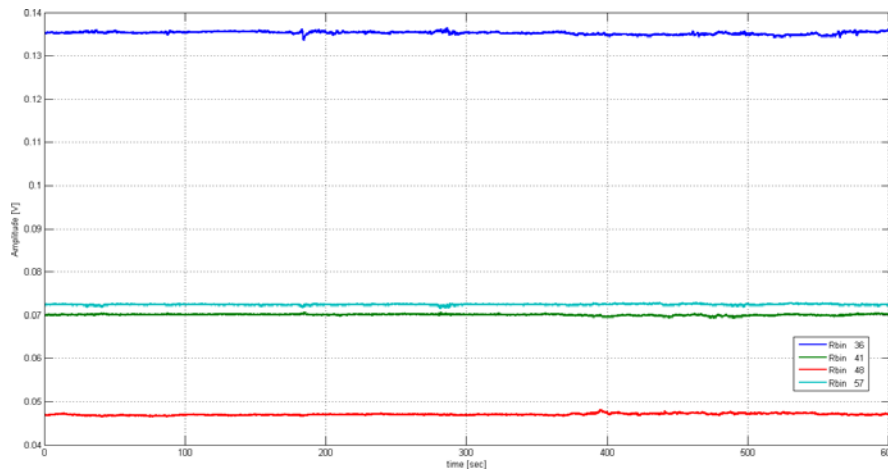
Dynamická analýza vybraných radiálních spádových oblastí slouží k analýze a vyhodnocení výsledků dynamického měření. Při dynamické analýze je možno zobrazit výsledky měření na dvou druzích grafu – polárním a kartézském a exportovat je do grafů a textových souborů. Dynamickou analýzu je možno provést pouze pro určitý zvolený časový úsek měřených dat a zvolený rozsah frekvencí od 0 po polovinu snímací frekvence (maximálně tedy pro 100Hz při snímací frekvenci 200Hz). Dynamická analýza obsahuje důležitou funkci „Remove Clutter“, která měření opraví tak, že odstraní statickou složku způsobenou přítomností silného stabilního odražeče v dané radiální spádové oblasti. Tuto funkci, která je nezbytná k dosažení správných fázových posunů resp. pohybů, je nutno aktivovat pro každou vyhodnocovanou radiální spádovou oblast zvlášť.

Prvním výstupem dynamické analýzy je polární graf, který zobrazuje vztah fázového posunu a amplitudy. Tento graf slouží zejména k posouzení kvality sledovaných bodů. Pokud se na polárním grafu zobrazí tvar C s malým rozptylem v radiálním i tangenciálním směru, znamená to, že v dané radiální spádové oblasti je dobře odrážející bod, který se plynule pohybuje.

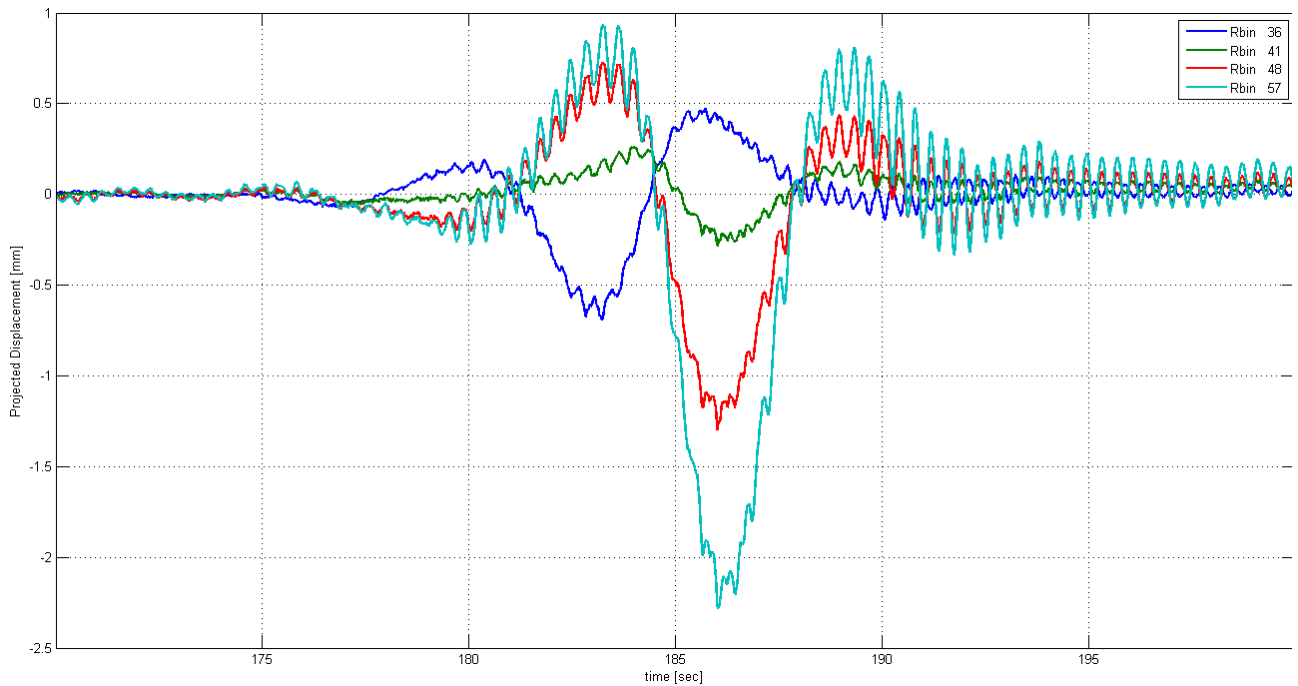
Dalšími výstupy jsou kartézské grafy časové závislosti amplitudy fázoru přijatého signálu a fáze fázoru přijatého signálu a kartézské grafy závislosti, pohybu, rychlosti a zrychlení sledovaného cíle na čase ve směru záměry nebo v promítnuté podobě pomocí projekčního faktoru. K frekvenční analýze slouží tzv. periodogramy výše zmíněných veličin. Data všech grafů zobrazovaných programem IBIS Data Viewer je možno exportovat do textových souborů pro další zpracování.



Graf 2: Polární graf amplitudy a fázového posunu přijatého signálu



Graf 3: Závislost amplitudy přijatého signálu na čase pro koutové odražeče



Graf 4: Svislé pohyby odrazných míst v čase 170 až 200s od začátku měření

2) Modální analýza

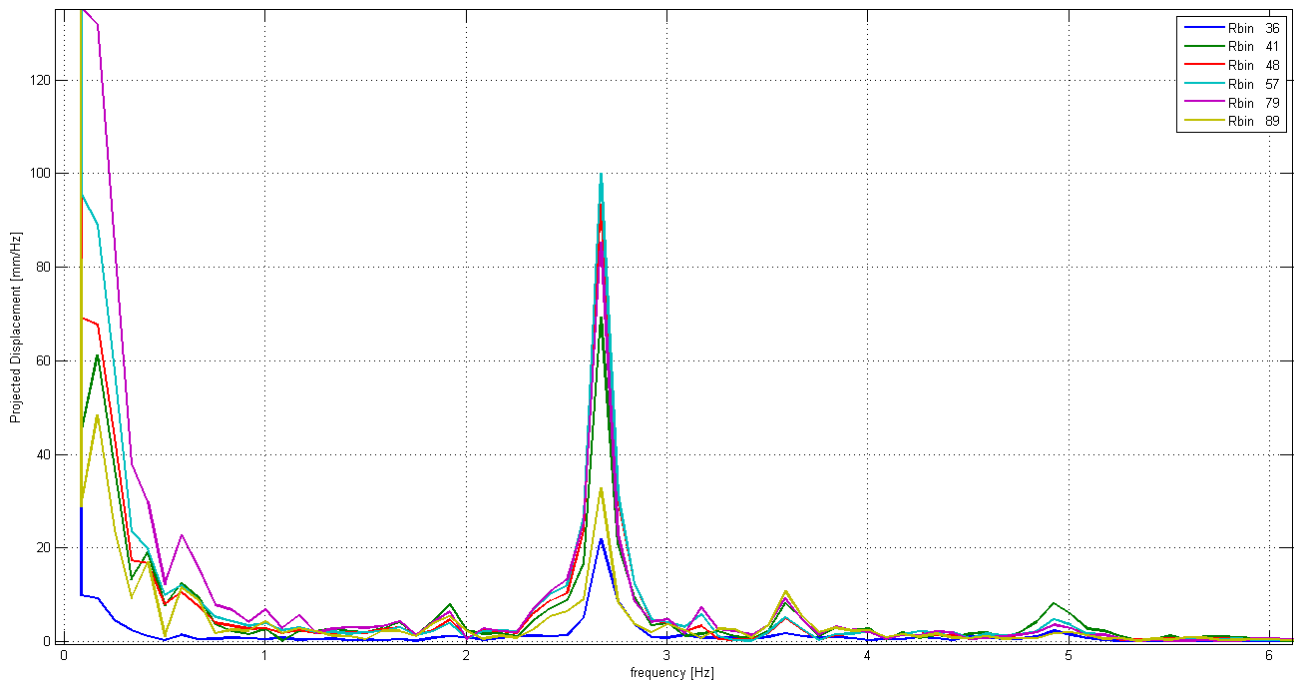
Modální analýza slouží k vytvoření animace pohybů sledovaného objektu ve zvoleném rozsahu frekvencí. Je to spíše doplňkový nástroj k vizualizaci výsledků měření. Výsledky měření je možno dokumentovat technickými zprávami, měřickými náčrty, grafy, tabulkami v tištěné či elektronické podobě a vizualizacemi a animacemi v digitální podobě.

8.2 Způsob dokumentace výsledků

Výsledky měření je možno dokumentovat technickými zprávami, měřickými náčrty, grafy, tabulkami v tištěné či elektronické podobě a vizualizacemi a animacemi v digitální podobě. Nejdůležitějšími výsledky měření mostních konstrukcí jsou:

- 1) Tabulka základních parametrů k vyhodnocení vybraných radiálních spádových oblastí obsahující: vzdálenosti ke středům radiálních spádových oblastí měřené radarem, poměry signálu k tepelnému šumu, poměry signálu k odhadnutému šumu, projekční faktory a směrodatné odchylky vertikálních pohybů.
- 2) Graf vertikálních pohybů odrazných míst nebo koutových odražečů mostní konstrukce ve vybraných radiálních spádových oblastech zachycující celou délku měření a detailní grafy zachycující podrobněji vybrané časové úseky.
- 3) Periodogramy svislých pohybů s určením frekvence kmitání objektu.

Měřená a vyhodnocená data je nutno pro případné budoucí použití uchovávat v nativních formátech programů dodávaných výrobcí radarů. Exportovaná data pak nejlépe v obyčejném textovém souboru.



Graf 5: Periodogram svislých pohybů v čase 188 až 200s od začátku měření

9. Závěr

Předkládaná metodika zahrnuje postup měření svislých průhybů mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem s vysokou relativní přesností (až 0,01 mm). Aby bylo této přesnosti dosaženo, je třeba zajistit vhodné podmínky měření, zejména kvalitu odrazu radarového signálu a geometrické parametry konfigurace radaru a mostu. Pokud těleso mostu neposkytuje dostatečně kvalitní odraz, je nutné na vhodná místa upevnit koutové odražeče. Z geometrických parametrů je nejvýznamnější výška mostu v poměru k jeho délce. Při dostatečné výšce mostu je možno lépe dodržet příznivé geometrické parametry, zejména strmost záměr, a tím dosáhnout malých hodnot projekčních faktorů u sledovaných bodů, jež rozhodujícím způsobem ovlivňují přesnost určení svislých pohybů mostu.

Výsledky určení dynamických parametrů průhybů mostovky lze dokumentovat a vizualizovat pro další statické analýzy a získat tak zela nové informace o průhybech sledovaných mostů a následně pak i nové poznatky o charakteru chování určitých konkrétních typů mostů. Velmi se doporučuje měření průhybů opakovat v určitých časových odstupech a získat tak i informace o tom, zda se určované dynamické parametry průhybů mostů nemění v čase, především v závislosti na stáří mostu, povětrnostních podmínkách nebo ročním obdobím.

10. Uplatnění metodiky a pro koho je metodika určena

Uplatnění metodiky je především v dopravním stavebnictví při stavbách a kontrolách stability mostních objektů. Využívat ji budou hlavně geodetické firmy provádějící tyto práce na zakázku dopravních a stavebních firem a firem zabývajících se statikou mostních objektů.

Smlouva o využití metodiky bude uzavřena s Komorou geodetů a kartografů (Zeměměřická komora).

11. Srovnání „novosti postupů“, jejich zdůvodnění a jejich srovnání s postupy v zahraničí

V současné době existuje v celosvětovém měřítku jen několik málo projektů, které se zabývají problematikou využití radarové interferometrie pro určování svislých průhybů mostních objektů. Lídrem v této oblasti je Itálie, především firma IDS - Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. z Pisy vyrábějící potřebné radarové vybavení.

Vlastní měřické postupy předkládané v této metodice jsou v České republice zcela nové a ojedinělé. Žádnými jinými měřickými technikami nelze docílit stejně kvalitních výsledků, především z hlediska jejich přesnosti, než využitím radarové interferometrie ve spojení s příslušnými měřickými postupy. Stejně tak možnost získat velice rychle a s minimálními náklady informaci o dynamickém průhybu mostní konstrukce na mnoha jejích místech současně a navíc přímo při provozu je ojedinělá z hlediska různých měřických technik.

I ve světovém srovnání se jedná o zcela špičkové měřické technologie. Je totiž jen několik pracovišť na světě disponujících takovýmito technologiemi a postupy.

12. Seznam použité související literatury

- [1] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBIS-S v. 1.0. - User Manual, Pisa, January 2012.
- [2] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBIS-S Controller v 02.02.000 - User Manual, Pisa, January 2012.
- [3] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBISDV v.03.04.005 – User Manual, Pisa, March 2012.
- [4] G. Bernardini, N. Gallino, G. Gentile, P. Ricci, Dynamic Monitoring of Civil Engineering Structures by Microwave Interferometer, Italy, 2007.
- [5] Gentile, C.; Bernardini, G.: 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.
- [6] 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.
- [7] Talich M., Hankus D., Soukup L., Hauser T., Antoř F., Havrlant J., Böhms O., Závrská M., řolc J.: Ověřená technologie určování svislých průhybů betonových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2012, 13 s., Dostupné z: www.p-insar.cz
- [8] Talich, M.; Hauser, T.; Soukup, L.; Hankus, D.; Antoř, F.; Havrlant, J.; Böhms, O.; Závrská, M.; řolc, J.: Ověřená technologie určování svislých průhybů kovových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2012, 13 s., Dostupné z: www.p-insar.cz
- [9] Hauser, T.: Zpráva o provedených ověřovacích měřeních Ověřené technologie určování svislých průhybů kovových mostních konstrukcí, ÚTIA, 2012, 10 s., Dostupné z: www.p-insar.cz
- [10] Hauser, T.: Zpráva o polní komparaci interferometrického radaru IBIS-S, ÚTIA, 2012, 5 s., Dostupné z: www.p-insar.cz

13. Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány (pokud existují), případně výstupy z originální práce

- [1] TALICH, M.: Possibilities of Precise Determining of Deformation and Vertical Deflection of Structures Using Ground Radar Interferometry. In: FIG Working Week 2015, Sofia, Bulgaria, 17-21 May 2015, International Federation of Surveyors, FIG 2015, ISBN 978-87-92853-35-6, ISSN 2307-4086, dostupné z:
http://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts01h/TS01H_talich_7735.pdf
- [2] TALICH, M., Glöckner, M.: Nová technologie určování svislých průhybů železničních mostních konstrukcí metodou pozemní radarové interferometrie. In: 20. ročník konference ŽELEZNIČNÍ MOSTY A TUNELY, 22. 1. 2015, Praha, ss. 127-133.
- [3] TALICH, M.: Možnosti přesného určování deformací a průhybů stavebních konstrukcí metodou pozemní radarové interferometrie. In: 49. geodetické informační dny, Brno, 19. - 20. 2. 2014, s. 7, ISBN 978-80-02-02509-2
- [4] TALICH M.: Přesné monitorování svislých průhybů mostních konstrukcí metodou pozemní radarové interferometrie. In: XII. mezinárodní konference GEODÉZIE A KARTOGRAFIE V DOPRAVĚ, Olomouc 4.-5. 9. 2014, Český svaz geodetů a kartografů, Olomouc, 2014, ss. 75-88, ISBN 978-80-02-02553-5
- [5] 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, s. 12, ISBN 978-80-227-4032-6
- [6] TALICH, M.: Pozemní radarová interferometrie - využití k určování svislých průhybů mostních konstrukcí. In: 5. konference Projektování pozemních komunikací, Praha, 21. 5. 2013
- [7] 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
- [8] Talich, M.; Hauser, T.; Soukup, L.; Hankus, D.; Antoš, F.; Havrlant, J.; Böhm, O.; Závorská, M.; Šolc, J.: Ověřená technologie určování svislých průhybů kovových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2012, 13 s., Dostupné z: www.p-insar.cz



Český úřad zeměměřický a katastrální
Pod sídlištěm 9/1800, 182 11 Praha 8

uděluje

CERTIFIKAČNÍ LIST

č.j. ČÚZK-06476/2016-22

pro

Název certifikované metodiky: Metodika určování svislých průhybů mostních
konstrukcí pomocí technologie radarové interferometrie

Autor: ÚTIA AV ČR, v.v.i. – F. Antoš, M. Talich, M. Glöckner, O. Böhm L. Soukup,
J. Havrlant, M. Závorská, J. Šolc

Certifikovaná metodika je výsledkem výzkumu a vývoje, uvedeném ve smlouvě na užití
výsledků, uzavřené dne 4. 3. 2013 č. j. UTIA-VU-49/2013 ve znění Dodatku č. 3 ze dne 2.
3. 2016 mezi

autorem Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i.

a

uživatelé Komorou geodetů a kartografů (Zeměměřická komora)

Certifikovaná metodika řeší určování svislých průhybů mostních konstrukcí pomocí
technologie radarové interferometrie a je uplatnitelná v resortu Českého úřadu
zeměměřického a katastrálního.

Certifikační list je udělen na základě dvou nezávislých oponentních posudků, které
vyhotovili

Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

a

Prof. RNDr. Vladimír Schenk, DrSc.


Ing. Jaroslav Nedvěd

.....
Podpis zástupce ČÚZK,

oprávněného k udělení certifikace

Dne: 7. 4. 2016