

Technologie určování vlivu teplotních či dalších změn na pohyby mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií



Milan Talich, Jan Havrlant, Lubomír Soukup, Filip Antoš



Michal Polák, Pavel Ryjáček, Jiří Litoš, Tomáš Plachý, Martin Macho

Prosinec 2021

Obsah

Obsah	2
1. Úvod	2
2. Přehled použité teorie - základní principy radarové interferometrie s IBIS	3
3. Přístrojové vybavení a jeho technické parametry	6
4. Obecné zásady	7
5. Přípravné práce a rekognoskace	7
6. Postup měření	8
6.1. Výběr sledovaných míst a jejich signalizace	8
6.2. Umístění radarů	9
6.3. Příprava, zacílení radarů a stanovení doby trvání měření	10
6.4. Časová synchronizace radarů	10
6.5. Nastavení parametrů měření radarem	11
6.6. Doplňkové činnosti	13
6.7. Měření a korekce stability radaru	14
7. Zpracování a vyhodnocení měření	17
7.1. Určení posunů současně v podélném i svislém směru	17
7.1.1. Výpočet vektoru posunutí	17
7.2. Rozbor přesnosti určení vektoru posunutí	20
7.2.1. Příklad zanedbání nepřesnosti směrů LOS posunů	21
7.2.2. Příklad uvažování nepřesnosti směrů LOS posunů	22
7.2.3. Příklad umístění radarů za sebou	28
7.2.4. Rozbor přesnosti odděleně ve svislém a v podélném směru	28
7.2.5. Shrnutí poznatků rozboru přesnosti	30
7.3. Synchronizace naměřených dat	30
8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků	31
8.1 Zpracování dat v programu IBIS Data Viewer	31
8.2 Zpracování dat v Matlabu	35
9. Závěr	36
10. Seznam použité literatury	36

Přílohy:

1. Zpráva o provedeném ověřovacím měření na silničním mostě u Pelhřimova
2. Protokol o ověření technologie

1. Úvod

Tento dokument popisuje ověřenou technologii určování dlouhodobých svislých a podélných pohybů mostů vlivem teplotních a jiných změn za pomoci dvou pozemních interferometrických radarů IBIS-SF nebo IBIS-S. Tato inovativní metoda umožňuje sledovat svislé i podélné pohyby mostního objektu v několika bodech současně. Pokud jde o ocelový most, není třeba sledované body signalizovat, neboť ocelová nosná konstrukce mostu obvykle poskytuje dostatečně kvalitní odraz radarového signálu. Betonové mosty je však třeba osadit kovovými odražeči, protože povrch betonového mostu má nízkou odrazivost radarového signálu. Při dobré stabilizaci, kdy zajistíme, aby se radary nehýbaly, můžeme dosáhnout přesnosti (střední chyby) až 0.01 mm.

2. Přehled použité teorie - základní principy radarové interferometrie s IBIS

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 **spojité frekvenčně modulované vlny** (angl. Frequency modulated continuous wave, zkráceně FMCW), a **interferometrii** (angl. interferometry).



Obr. 1 : Princip radarové diferenční interferometrie

Technologie spjité frekvenčně modulované 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. Radar IBIS vytváří pomocí technologie FMCW 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** .

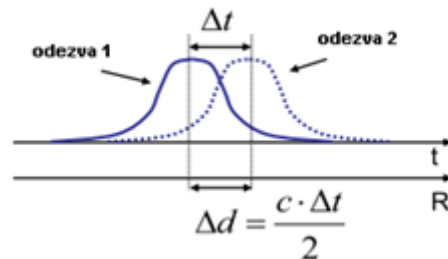
Vzdálenost je určena pomocí rychlosti světla c podle vztahu

$$R_0 = \frac{cT_0}{2},$$

kde T_0 představuje opoždění odezvy. Koncepti radiálního rozlišení vyjadřuje vzorec

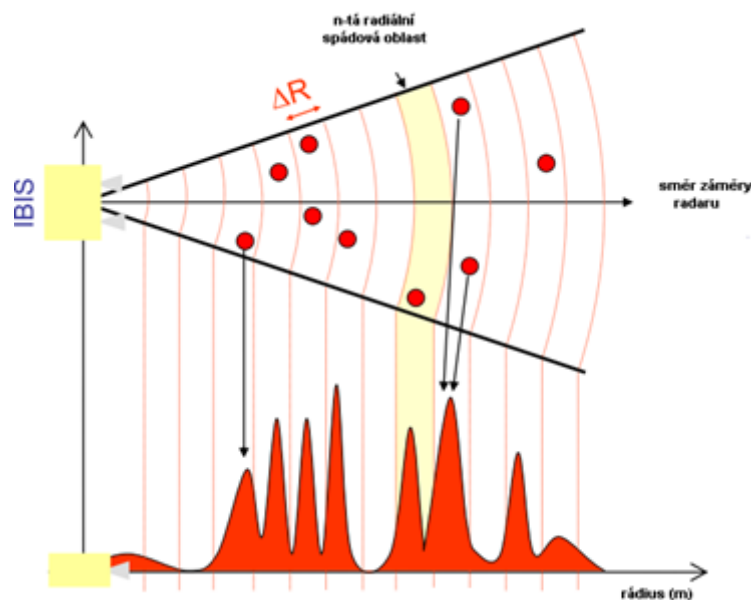
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2},$$

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)

Na následujícím obrázku je znázorněn radiální profil odrazivosti generovaný radarem IBIS. Vodorovná osa znázorňuje radiální vzdálenost od radaru. Radar typu IBIS dokáže rozlišovat detekované objekty jen v jednom 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

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

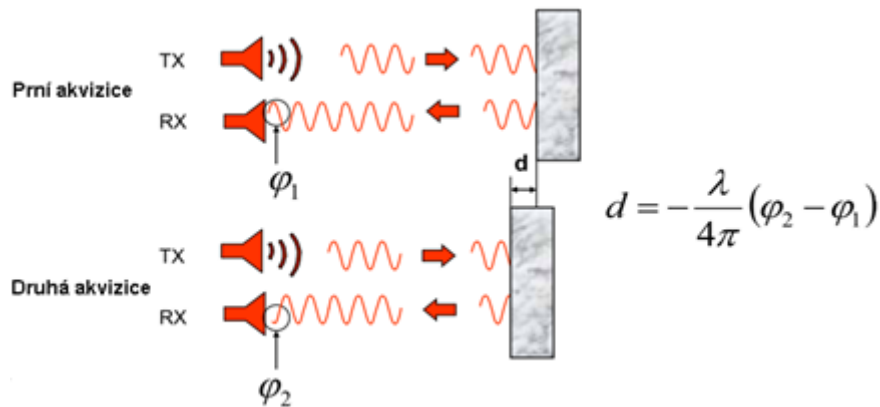
$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{sum}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2$$

kde P_{signal} je výkon přijatého signálu, P_{sum} je výkon přijatého šumu, A_{signal} je amplituda přijatého signálu a A_{sum} je amplituda přijatého šumu.

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

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

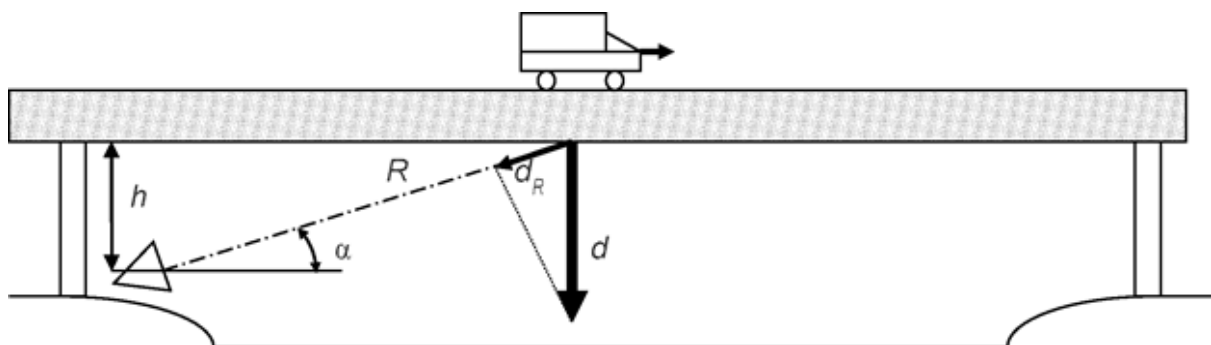
Diferenční interferometrie poskytuje údaje o posunech objektů porovnáváním fázové informace získané v různých časových obdobích z vln odražených od objektů. Tento princip je patrný z obrázku 4. Každá odražená vlna z každé radiální spádové oblasti nese informaci o amplitudě $|A(n)|$ a fázi φ_n . Přístroj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



Obr. 4 : Princip diferenční interferometrie

Maximální měřitelný posun mezi dvěma po sobě jdoucími akvizicemi je ohraničen nejednoznačností měřené fáze. Tento princip je znázorněn na obrázku 5. Pro IBIS činí $\pm\lambda/4 = 4,38\text{mm}$.

Veškeré posuny jsou měřeny ve směru záměry. Není-li záměra orientována přesně ve směru očekávaného posunu, je potřeba očekávané (v tomto případě svislé) 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 tzv. 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 obrázku 5.



Obr. 5 : Promítání přímo měřeného pohybu d_R do svislého směru

3. Přístrojové vybavení a jeho technické parametry

Pro měření prováděné ověřenou technologií, která je předmětem tohoto protokolu, je potřeba použít dva radary IBIS-S nebo IBIS-SF popřípadě jejich kombinaci. 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. Rozlišovací schopnost 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 typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39). Horizontální vyzařovací úhel této antény je 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.

K upevnění radaru na geodetický stativ slouží adaptér se závitem na šroub stativu a šroubem pro závit 3D hlavy radaru nebo adaptér do geodetické trojnožky. Dále 3D hlava, která je převzata z fotostativu Manfrotto dodaného výrobcem. 3D hlava umožňuje otáčení radaru podél svislé osy a náklon ve dvou kolmých směrech.

Ovladač radaru tvoří odolný notebook Panasonic s programem IBIS Surveyor. Ke zpracování měření se používá program IBIS Data Viewer. Oba tyto programy se dodávají spolu s radarem.

Pro doplňková měření se použijí vhodné geodetické přístroje. Vhodné je vytvoření 3D modelu měřené situace buď pomocí 3D laser scanneru nebo pomocí průsekové fotogrammetrie či kombinací obou metod. Pro měření jednotlivých vzdáleností lze použít i ruční dálkoměr nebo pásmo.

Vhodné je také použít videokameru k pořízení záznamu z průběhu měření mostu, aby bylo možné ztotožnit výsledky radarového měření (dynamické průhyby) s děním na mostě (průjezdy vozidel atp.). Je také možné kameru využít jako záznam změn počasí při dlouhodobém měření mostu.

Pro časovou synchronizaci je potřeba datově propojit obslužné notebooky obou radarů. V závislosti na vzdálenosti radarů je možné pro datové propojení radarů použít ethernetový kabel (pro vzdálenosti do 100 m), optickou linku nebo bezdrátové pojitko v případě, že nelze mezi počítači natáhnout kabel.

Při dlouhodobém měření je nutné kontrolovat stabilitu postavení radarů, aby jejich pohyb neovlivňoval výsledky měření. K tomu lze použít inklinometry s přesností větší než 0.001°.

Pro sledování teplotních vlivů mostní konstrukce je potřeba měřit její teplotu. Ideální je měřit teplotu uvnitř konstrukce, což ovšem není ve většině případů možné. Pro měření se většinou používají teplotní čidla nebo infračervená kamera. Důležité je měřit přímo teplotu vlastní konstrukce, a ne teplotu okolního vzduchu, neboť hodnoty obou teplot se mohou významně lišit.

4. Obecné zásady

- a) Pozemní interferometrický radar s reálnou aperturou (dále jen radar) měří pouze relativní pohyby po určitou dobu, kterou vhodně zvolí měřič. Relativní pohyby sledovaného bodu od času $t=0$ a počáteční hodnoty $d=0$ lze určit při jednom postavení radaru. Na provedená měření nelze navázat později při jiném postavení. Radarem tedy obecně nelze provádět etapová měření a porovnávat jednotlivé etapy.
- b) Radar měří 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. přesněji řečeno pohyby po kulové ploše procházející sledovaným bodem a mající střed ve fázovém centru radaru).
- c) Při měření jedním radarem (podle Obr. 5) se předpokládají posuny sledovaných bodů pouze ve svislém směru. Pokud by se některý sledovaný bod pohyboval i v jiných směrech, zavádělo by to do výsledku chybu, kterou nelze odhalit.
- d) Pro současné určování svislých a podélných posunů (podélných z hlediska nosné konstrukce sledovaného mostu) je třeba použít radary dva. Při měření dvěma radary se totiž předpokládají posuny sledovaných bodů pouze v podélném a svislém směru. Pokud by se některý sledovaný bod pohyboval i do strany, zavádělo by to do výsledku chybu, kterou nelze odhalit.
- e) Pro měření posunů sledovaných bodů do všech tří stran (skutečných, resp. reálných 3D posunů) je potřeba použít minimálně tři radary.
- f) Při dlouhodobém měření je možné použít statický režim měření radaru, kdy se měří v zadaných časových intervalech. Tím se zmenší velikost souborů naměřených dat a zjednoduší jejich následné zpracování. Při měření dvěma radary však nelze tento režim využít, protože není možné radary synchronizovat tak, aby měřily v přesně stejný okamžik. Musí se měřit s vysokou frekvencí a naměřená data synchronizovat až při následném počítačovém zpracování dat.

5. Přípravné práce a rekognoskace

Před zaměřením mostu pozemním interferometrickým radarem je nutno provést rekognoskaci a fotodokumentaci mostu při jeho prohlídce v terénu. V případě potřeby je vhodné získat dostupné informace a fotografie mostu i z jiných zdrojů (nalézt na internetu, vyžádat si je od vlastníka či správce mostu apod.). Při rekognoskaci je nutno zjistit základní konstrukční parametry mostu jako např. počet a rozmístění pilířů apod. Dále je nutné zjistit možnosti umístění stanovisek radarů v závislosti na vegetaci a charakteru terénu pod mostem. Při volbě stanoviště radarů je třeba brát v úvahu především umístění kvalitních odrazných ploch.

Pokud jde o betonový most, tak se na základě rekognoskace navrhne umístění koutových odražečů včetně způsobu jejich uchycení.

Podle umístění stanovisek se také určí, jakým způsobem budou datově propojeny obslužné notebooky (metalický kabel, optický kabel, bezdrátový spoj).

6. Postup měření

Při měření dvěma radary se předpokládá, že sledovaný most se pohybuje pouze ve dvou směrech, obvykle svisle a podélně, a podle toho se také volí stanoviska radarů. Existují dvě základní možnosti postavení radarů, viz Obr. 7. Základní prioritou, dovolí-li to podmínky měření, je zaměření celého mostu najednou, a to pomocí obou radarů zároveň. Pokud je rozpětí sledovaného pole mostního objektu značně větší než jeho výška nad terénem, bude nutno k zaměření vybrat pouze jeho část. V takovém případě se zaměří ta část nosné konstrukce, kde se předpokládají největší pohyby, tj. zpravidla střední část rozpětí sledovaného pole.

6.1. Výběr sledovaných míst a jejich signalizace

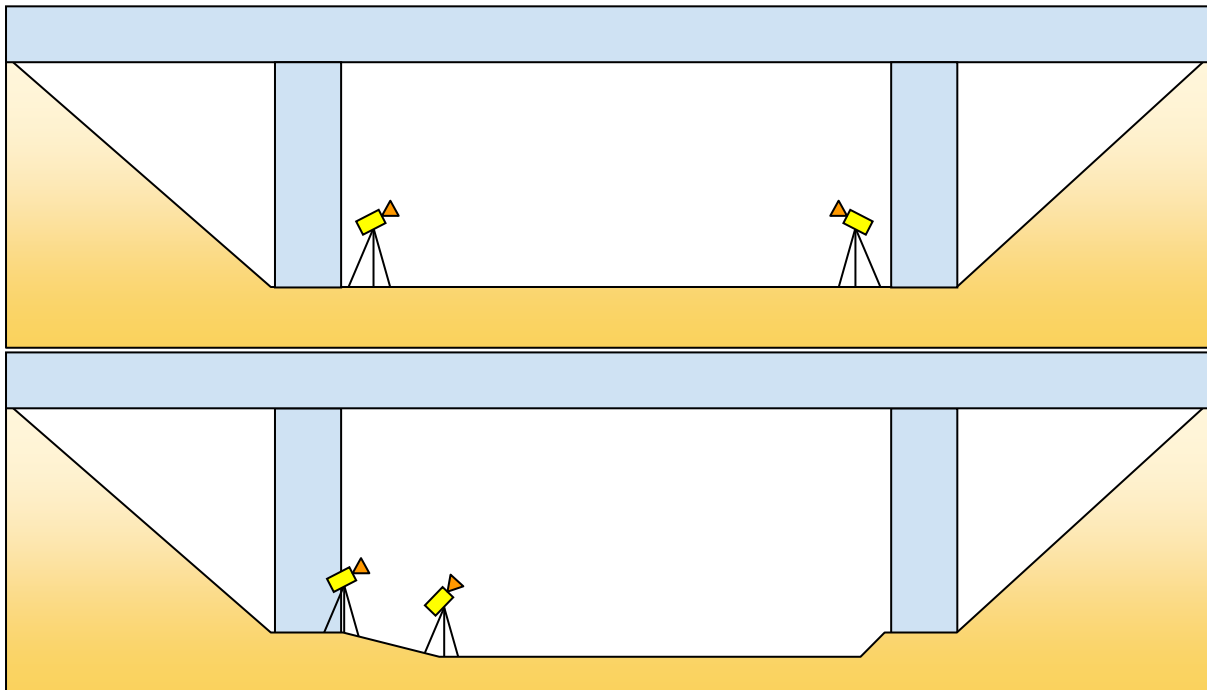
Postup měření se liší podle toho, zda měříme ocelový most, který má dostatek přirozených odrazných míst nebo betonový most, na kterém je měřené body potřeba signalizovat pomocí koutových odražečů. Měřená místa by přitom měla dobře vystihovat předpokládané pohyby mostu. Jejich optimální rozmístění je vhodné konzultovat se statiky přebírajícími výsledky k dalším analýzám. V principu platí, že vyšší počet proměřovaných bodů dává lepší vypovídající schopnost pro určování deformací mostu. U složitějších kovových konstrukcí může dojít k vícenásobným odrazům radarového signálu, což znehodnocuje měřená data vzdálenějších cílů. Jsou-li místa odrazů špatně identifikovatelná nebo neposkytují-li dostatečně kvalitní odraz v důležitých bodech dobře vystihujících pohyby mostu, lze kvalitu odrazu zvýšit i na ocelových mostech připevněním koutových odražečů na nosnou konstrukci. Koutové odražeče je nutno rozmístit tak, aby nebyly ve stejných spádových oblastech. Rozdíly ve vzdálenostech mezi radarem a jednotlivými koutovými odražeči tedy musí být vždy minimálně 0,75 m.



Obr. 6 : Dva koutové odražeče nasměrované na jednotlivé radary.

V případě betonového mostu je potřeba umístit koutové odražeče na všechny sledované body. Jejich poloha se určí tak, aby jejich určené posuny co nejlépe vystihovaly pohyby nosné konstrukce mostu. Protože je měřeno dvěma radary, je potřeba, aby na měřené body bylo vidět z obou stanovisek radarů zároveň. Většinou je potřeba použít na každý měřený bod dvojici koutových odražečů nasměrovaných na oba radary - viz Obr. 6.

Protože při experimentu in situ je velmi obtížné dodržet všechny výše uvedené podmínky, je výhodné k návrhu měřených bodů využít 3D model měřeného mostu, na kterém je možné zobrazit jednotlivé spádové oblasti radarů a zároveň posoudit viditelnost měřených bodů oběma radary.



Obr. 7 : Dvě základní konfigurace radarů při měření mostu: a) radary měří proti sobě – nahore, b) radary měří z jedné strany mostu – dole.

6.2. Umístění radarů

Radary se stativem se umístí na vhodné místo se zpevněným nebo nezpevněným povrchem, ale ne příliš měkkým. Stanoviska radarů by měla ležet přibližně na průsečnici terénu a svislé roviny procházející podélnou osou mostu resp. nejlepšími odraznými místy na mostě. Toto stanoviště bývá obvykle na kraji pole mostu přibližně uprostřed šířky nosné konstrukce. Vhodná konfigurace dvou radarů je vidět na obrázku 7.

Při sledování pohybů s přesností až na setiny mm je nutné dbát zvýšené opatrnosti při zajištění stability radarů při měření. Na místa vybraná pro stanoviska radarů nesmí působit vibrace z okolí zapříčiněné např. těžkými nákladními vozidly projíždějícími přes sledovaný most nebo po blízké komunikaci pod mostem. Je vhodné použít geodetický stativ místo fotostativu dodávaného výrobcem radaru. Před vlastním měřením je potřeba pečlivě zkontrolovat pevnost uchycení radaru ke stativu a pevnost stativu. V zimním období je nutné vyvarovat se možnosti rozmrzání terénu pod nohama stativu, nejlépe umístěním stativu na zpevněný povrch. Také je potřeba dle možností zabránit vlivu tepelných deformací stativu.

V letním období je nezbytné stativ i radar chránit před přímým slunečním světlem, v zimním období je nutno stativ před použitím temperovat na teplotu okolního vzduchu. V době měření není vhodné se v okolí stativu s radarem pohybovat a přecházet před anténami v oblasti ozáření.

6.3. Příprava, zacílení radarů a stanovení doby trvání měření

Na radar se upevní antény zpravidla typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39), jejichž vertikální vyzařovací úhel je větší než horizontální. Zacílení radaru je vhodné provádět při zapnutém přístroji, kdy je možné zároveň sledovat profil odrazivosti zobrazovaný na ovládacím notebooku. Na obrazovce notebooku se nejprve zobrazí síla odraženého signálu. Radar se pak namíří tak, aby síla odraženého signálu byla na měřených bodech co největší. Zároveň však nesmí být radary namířeny přímo na sebe, aby se navzájem příliš nerušily. Odrazy od všech odrazných míst mohou tak být v ideálním případě přibližně stejné kvality. U vzdálených bodů se zvětšují hodnoty projekčního faktoru, což má za následek nižší přesnost promítnutých svislých pohybů. U takovýchto příliš vzdálených bodů je třeba rozhodnout, zda budou zahrnuty do výsledného vyhodnocení.

Zaměření mostu se provede dynamickou metodou, tj. s vysokou frekvencí snímání, aby bylo možno provést následnou synchronizaci dat. Teplotní změny mostu je nutné sledovat v delším časovém období, nejlépe 24 až 26 hodin. Tak mohou být zaznamenány maximální teplotní změny způsobené jak ozářením tělesa mostu sluncem, tak ochlazením vzduchem v noci.

6.4. Časová synchronizace radarů

Při měření dvěma radary je potřeba měření časově synchronizovat. Každý radar má svůj obslužný počítač, ze kterého je ovládán a na kterém se ukládají naměřená data. Synchronizovat dva radary tedy znamená synchronizovat systémový čas jejich obslužných počítačů. Obslužný software radaru získává přesný čas z operačního systému počítače a ukládá čas začátku a konce měření do souboru s naměřenými hodnotami z radaru. Porovnáním časových údajů uložených v souborech s měřením je tedy možné identifikovat měřené hodnoty, které byly pořízeny ve stejný okamžik.

Pro synchronizaci obslužných počítačů radarů lze použít protokol NTP (Network Time Protocol). Obslužné počítače mají operační systém Windows 10, který obsahuje NTP server a klient, takže k synchronizaci dvou počítačů není potřeba instalovat další software a stačí jen správně nakonfigurovat tyto systémové prostředky.

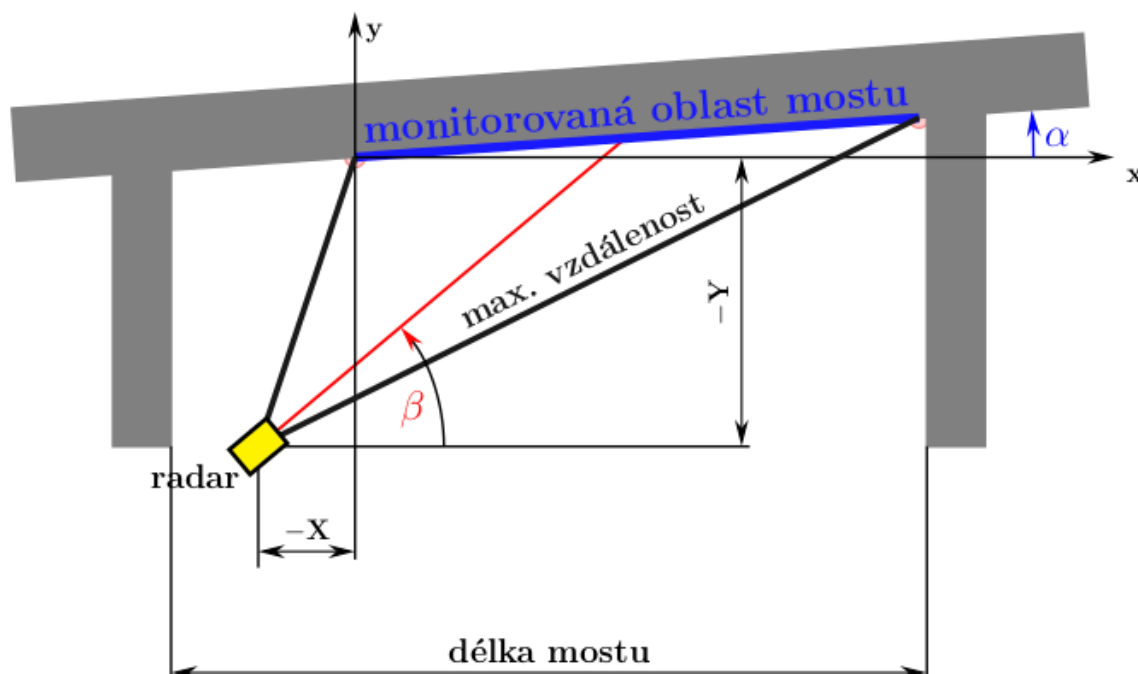
Oba počítače musí dohromady tvořit počítačovou síť (být navzájem propojeny datovým spojením), kterou je třeba vhodně nakonfigurovat. Aby oba počítače mohly spolu v této síti komunikovat, je nutné, aby oba měly svojí IP adresu.

Rozdíl časů obou počítačů se získá pomocí příkazu `w32tm` s příslušnými parametry.

Tento příkaz potom v pravidelných intervalech zobrazuje rozdíl časů lokálního a vzdáleného počítače. Rozdíly je možné ukládat do souboru. Pomocí těchto hodnot se potom synchronizuje měření obou radarů.

6.5. Nastavení parametrů měření radarem

Vlastní měření se spouští v programu IBIS Surveyor. Nejprve je nutné nastavit některé parametry měření a geometrické konfigurace. Geometrická konfigurace slouží programu pouze pro jednoduchý převod LOS posunů na svislé. Tento převod je z pohledu měření dvěma radary považován za pouze přibližný, pro finální výpočet posunů se použijí hodnoty geometrické konfigurace odečtené z 3D modelu.



Obr. 8 : Znáznornění geometrických parametrů zadávaných v programu IBIS Surveyor

Zadávanými geometrickými parametry jsou:

- Délka mostu resp. délka měřením dotčeného úseku mostu (Structure Length)

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

- Podélný sklon mostu α (Structure Angle)

Podélný sklon některých mostů je tak malý, že je možné jej zanedbat. Sklon ovlivní převýšení mezi odraznými místy a radarem a tím i projekční faktor u těch odrazných míst, kde je toto převýšení odlišné od souřadnice Y radaru.

c) Souřadnice X a Y radaru (X IBIS Coord. a Y IBIS Coord.)

Souřadnice X je vodorovná vzdálenost mezi radarem a počátkem sledovaného pole mostu. Souřadnice Y je převýšení mezi radarem a mostovkou na počátku sledovaného pole mostu. Souřadnice X slouží zejména ke grafickému znázornění situace, souřadnice Y slouží k určení projekčního faktoru pro výpočet svislých pohybů.

d) Výškový náklon radaru β (Vertical Tilt)

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 nebo změřit pomocí ručního sklonoměru.

Dále je před měřením nutné nastavit parametry radaru:

a) Maximální rozsah záznamu měřených dat (Max Distance)

Maximální radiální vzdálenost, v jejímž rozsahu jsou zaznamenávána data, je dána šikmou délkou mezi radarem a nejvzdálenějším odrazným místem. Do programu je vhodné zadat o trochu vyšší hodnotu.

b) Velikost spádové oblasti (Distance Resolution)

Nastaví se co nejmenší přípustná hodnota. V Evropské unii je to u tohoto radaru 0,75 m.

c) Typ antény (Antenna Type)

Nastaví se správný typ antény, která je na radaru připevněná.

d) Frekvence snímání měření (Sampling Frequency)

Je závislá na "Maximální rozsah záznamu měřených dat". Do 180 m je maximální frekvence 200 Hz, pro větší rozsah se frekvence zmenšuje. Tuto frekvenci je potřeba zvolit nejlépe stejnou pro oba radary.

e) Doba trvání měření (Survey duration)

Lze nastavit konkrétní hodnotu nebo se měření ukončí manuálně.

Po nastavení těchto parametrů se spustí měření a obslužný program zobrazuje aktuální pohyby ve zvolených spádových oblastech. Zároveň ukládá měřená data do souboru.

Při měření je nutné pravidelně kontrolovat, zda radar stále měří a data se ukládají na obslužném počítači. V případě problémů je nejlepší radar i obslužný počítač restartovat.

6.6. Doplnkové činnosti

a) Měření geometrických parametrů pro program IBIS Surveyor

Toto měření slouží k určení hodnot geometrických parametrů, které je nutno zadat do programu IBIS Surveyor. Provede se po postavení radaru, ale ještě před vlastním zahájením měření radarem. Hodnoty geometrické konfigurace zadávané v terénu do programu IBIS Surveyor lze později při zpracování programem IBIS Data Viewer změnit. K určení geometrických parametrů stačí ruční dálkoměr případně pásmo. Toto měření může též posloužit ke kontrolní identifikaci odrazných míst. Odrazná místa se v profilu odrazivosti zobrazeném programem IBIS Surveyor zobrazí jako výrazná maxima.

b) Vytvoření 3D modelu měřeného mostu

Je výhodné vytvořit 3D model měřeného mostu a jeho blízkého okolí. Na 3D modelu lze jednoduše (např. barevně) zvýraznit jednotlivé spádové oblasti obou radarů a zjistit tak přesněji místa s nejsilnějším odrazem radarového signálu. Především se tak ale s jistotou určí konkrétní části konstrukce měřeného mostu odpovídající jednotlivým spádovým oblastem. 3D model je výhodné vytvořit laserovým skenováním popřípadě průsekovou fotogrammetrií či kombinací obou metod. Lze však samozřejmě v případě jednodušších tvarů konstrukcí mostů použít i prostorové zaměření totální geodetickou stanicí.

c) Videozáznam z průběhu měření

Pro dokumentaci a následnou prezentaci je dobré pořídít videozáznam mostu při měření. Před začátkem měření je potřeba synchronizovat čas videokamery s časem obslužného notebooku.

d) Fotodokumentace

Je zapotřebí provést i fotodokumentaci vlastního měření, ze které bude zřejmé postavení obou radarů vůči sobě i vůči měřenému mostu a okolí. Dále i způsob osazení koutových odražečů, popřípadě místa nosné konstrukce mostu poskytující nejlepší odrazy signálu. Zachyceny by měly být i pohledy radarů na nosné konstrukci mostu.

e) Měření teploty mostní konstrukce

V pravidelných intervalech je potřeba zaznamenávat teplotu mostní konstrukce a to buď ručně nebo automaticky s využitím infrakamery nebo teplotních čidel

f) Měření stability radaru

Měření teplotních vlivů trvá delší dobu a je vhodné nějakým způsobem kontrolovat zda je se radar nehýbe a případně jak.

6.7. Měření a korekce stability radaru

Při dlouhodobém měření je důležité sledovat stabilitu radaru, tak aby nám neovlivňovala výsledky měření. Stabilita radaru může být ovlivněna stabilitou stativu, na kterém je radar upevněn. Radar je dodávám s fotostativem Obr. 9, který ale nedosahuje kvality stativů používaných v geodézii a proto je vhodné ho nahradit geodetickým stativem Obr. 10. Ten je výhodné zkrátit, tak aby bylo možné měřit nízko nad zemí. Geodetický stativ, na rozdíl od fotostativu, je možné zašlápnout do země a tím zvýšit jeho stabilitu.

Další problémy můžou vznikat nedokonalým upevněním vlastního radaru na 3D hlavě Obr. 11 a jejím utažením. Je velmi důležité před začátkem měření zkontrolovat utažení všech šroubů na 3D hlavě a stativu a zkontrolovat zda se radar nehýbe.



Obr. 9 : Stativ dodávaný s radarem



Obr. 10 : Geodetický stativ pro lepší stabilitu radaru



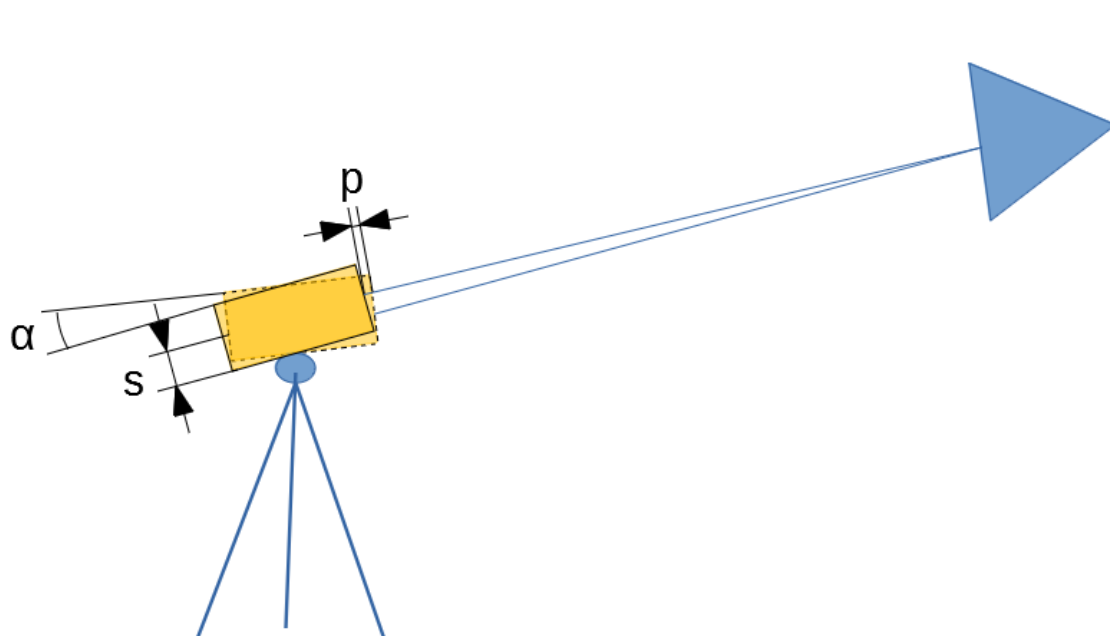
Obr. 11 : 3D hlava upevňující radar na stativu

Stabilitu měření je možné sledovat s pomocí náklonoměru, který měří úhel náklonu radaru. Pokud dojde ke změně opravíme měření o hodnotu podle následujícího vzorce.

$$p = \tan \alpha \cdot s$$

kde

- p ... vypočtený posun radaru,
- α ... změna úhlu změřená náklonoměrem,
- s ... je poloměr otočení radaru.



Obr. 12 : Posun způsobený pohybem radaru

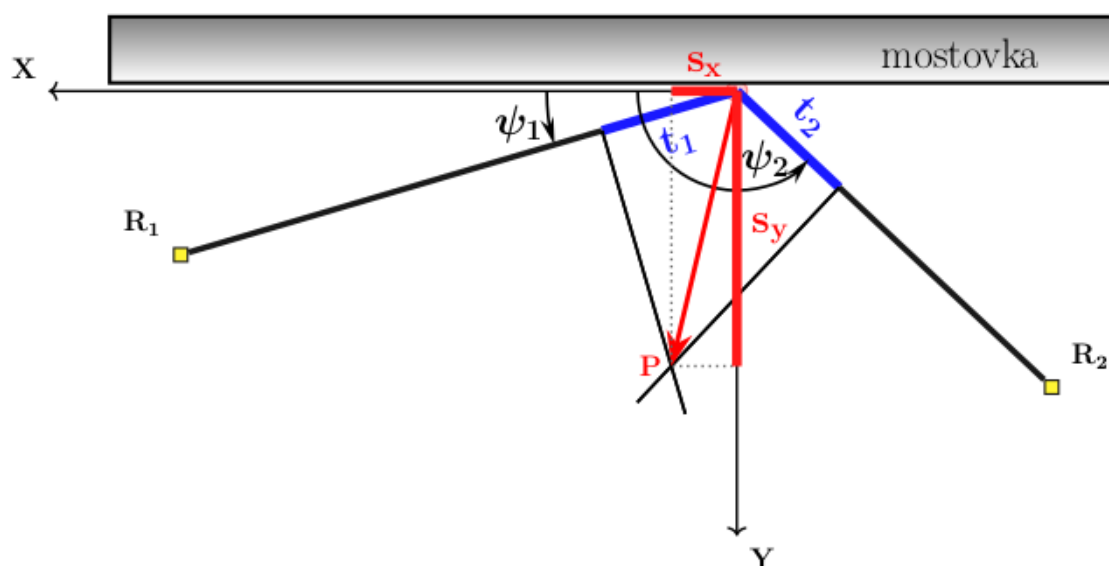


Obr. 13 : Náklonoměr připevněný k radaru

7. Zpracování a vyhodnocení měření

7.1. Určení posunů současně v podélném i svislém směru

Pokud je určitá část mostovky ozářena současně oběma radary, je možné určit vektory posunutí bodů na této části mostu v podélném i svislém směru, a to za předpokladu, že vektor posunutí určitého monitorovaného bodu na nosné konstrukci mostu leží v rovině dané polohou obou radarů a oním monitorovaným bodem. To znamená, že při postavení obou radarů pod nosnou konstrukcí mostu, je tato rovina svislá. Složky vektoru posunutí bodu na nosné konstrukci lze pak vypočítat pomocí svislých směrů spojnic obou radarů se sledovaným bodem a pomocí jeho naměřených LOS posunů. Vztah vektoru posunutí, směrů spojnic („záměr“) a LOS posunů ve svislé rovině procházející oběma radary je znázorněn na obrázku 14.



Obr. 14 : Vztah LOS posunů t_1 , t_2 a určovaného posunutí s_x , s_y . Body R_1 , R_2 vyznačují polohu radarů.

Monitorovaný bod nosné konstrukce se ve skutečnosti nemusí posouvat jen ve svislé rovině dané polohou obou radarů. Může se vychýlovat i do strany. Proto nemůžeme jeho posun určený ve svislé rovině postupem uvedeným v této kapitole nazývat „skutečným“ (3D reálným) posunem, ale pouze „určovaným posunem“, popřípadě jen „posunem“ (viz kapitola 4 d) a 4 e)). Zdánlivý posun ve směru spojnice radaru a monitorovaného bodu, budeme důsledně nazývat LOS posunem.

7.1.1. Výpočet vektoru posunutí

Složky vektoru určovaného posunutí monitorovaného bodu na nosné konstrukci mostu se dají snadno vypočítat podle následujících vzorců.

$$\begin{aligned} s_X &= \frac{t_1 \sin(\psi_2) - t_2 \sin(\psi_1)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)} \\ s_Y &= \frac{-t_1 \cos(\psi_2) + t_2 \cos(\psi_1)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)} \end{aligned} \quad (1)$$

kde

- t_1, t_2 ... naměřené LOS posuny oběma radary,
- ψ_1, ψ_2 ... směry záměr radarů,
- s_X, s_Y ... kartézské souřadnice bodu P (vektoru určovaného posunutí).

Souřadnicový systém, vzhledem k němuž jsou vztaženy složky vektoru určovaného posunutí, má osu x vodorovnou a osu y svislou, počátek je v bodě (na nosné konstrukci mostu), jehož posuny jsou sledovány.

Vzorce (1) lze snadno odvodit z obrázku 14. S výhodou se přitom použije známé vlastnosti skalárního součinu dvou vektorů. Pro skalární součin vektorů \mathbf{r} , \mathbf{s} , které spolu svírají úhel ω , totiž platí:

$$(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = r_X s_X + r_Y s_Y = \|\mathbf{r}\| \cdot \|\mathbf{s}\| \cdot \cos \omega,$$

kde

- r_X, r_Y ... souřadnice vektoru \mathbf{r} ,
- s_X, s_Y ... souřadnice vektoru \mathbf{s} ,
- $\|\mathbf{r}\|$... velikost vektoru \mathbf{r} ,
- $\|\mathbf{s}\|$... velikost vektoru \mathbf{s} ,
- ω ... úhel vektorů \mathbf{r} , \mathbf{s} .

Pokud vektor \mathbf{s} představuje vektor určovaného posunutí a vektor \mathbf{r} je jednotkový vektor ve směru ψ_i , jehož souřadnice jsou $[\cos(\psi_i), \sin(\psi_i)]$, pak výše uvedená vlastnost skalárního součinu přejde v rovnost

$$s_X \cos \psi_i + s_Y \sin \psi_i = \|\mathbf{s}\| \cdot 1 \cdot \cos \omega_i. \quad (2)$$

Na obrázku 14 je vidět, že platí

$$\cos \omega_i = \frac{t_i}{\|\mathbf{s}\|},$$

což umožní v rovnosti (2) pokračovat a zjednodušit ji na tvar

$$s_X \cos \psi_i + s_Y \sin \psi_i = t_i.$$

Tato rovnost rozepsaná pro $i \in \{1, 2\}$ je vlastně soustava dvou rovnic pro neznámé souřadnice s_X, s_Y .

$$\begin{aligned} s_X \cos \psi_1 + s_Y \sin \psi_1 &= t_1 \\ s_X \cos \psi_2 + s_Y \sin \psi_2 &= t_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Řešení této soustavy rovnic vede ke vzorcům (1). Tím je dokázána správnost vzorců (1) pro určení vektoru posunutí.

Pro v další kapitole uvedenou analýzu přesnosti tohoto určení je vhodné vyjádřit vektor posunutí v jiném tvaru než je (1). Směry záměr ψ_1, ψ_2 jsou totiž svázány se souřadnicemi radarů podle vztahu

$$[\cos(\psi_i), \sin(\psi_i)] = \frac{[x_i, y_i]}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} =: \mathbf{r}_i^T,$$

kde

x_i, y_i ... souřadnice i -tého radaru ($i \in \{1, 2\}$) v souřadnicovém systému s počátkem v zaměřovaném bodě,

\mathbf{r}_i^T ... řádkový jednotkový vektor směřující k i -tému radaru, $\mathbf{r}_i^T := [\cos(\psi_i), \sin(\psi_i)]$, $i \in \{1, 2\}$.

Přesnost směrů záměr ψ_1, ψ_2 je tedy dána přesností souřadnic radarů x_i, y_i , $i \in \{1, 2\}$. Je proto vhodné vyjádřit vektor posunutí s pomocí souřadnic radarů.

Obě rovnice soustavy (3) jsou lineární, a proto lze tuto soustavu přehledně zapsat v maticovém tvaru

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{r}_2^T \end{bmatrix} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{t}, \quad (4)$$

kde

\mathbf{s} ... sloupcový vektor určeného posunutí, $\mathbf{s} := [s_x, s_y]^T$,

\mathbf{t} ... sloupcový aritmetický vektor naměřených LOS posunů, $\mathbf{t} := [t_1, t_2]^T$.

Řešením soustavy lineárních rovnic (4) je maticová rovnost

$$\mathbf{s} = \frac{1}{\mathbf{r}_2^T \cdot \mathbf{r}_1^\perp} [-\mathbf{r}_2^\perp, \mathbf{r}_1^\perp] \cdot \mathbf{t}, \quad (5)$$

v níž symboly $\mathbf{r}_1^\perp, \mathbf{r}_2^\perp$ představují vektory kolmé k vektorům $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$. Operátor kolmosti $^\perp$ je pro obecný rovinný vektor $\mathbf{v} = [v_x, v_y] \in R^2$ definován rovností:

$$\mathbf{v}^\perp := [-v_y, v_x].$$

Vztah (5) je ekvivalentní vzorcům (1). Tyto vzorce lze též odvodit pomocí geodetické operace protínání z orientovaných směrů, které se protínají v bodě P . Tento geodetický způsob odvození je však poněkud delší a proto ho zde nebudeme uvádět.

Při použití vektorového značení

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i &:= [x_i, y_i]^T \\ \|\mathbf{x}_i\| &:= \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \\ \mathbf{u} &:= [t_1, t_2, x_1, y_1, x_2, y_2] \end{aligned}$$

lze do vztahu (5) za vektory $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ dosadit,

$$\mathbf{r}_i = \frac{\mathbf{x}_i}{\|\mathbf{x}_i\|}$$

a vyjádřit souřadnice vektoru určeného posunutí jako zobrazení

$$\mathbf{s}: R^6 \rightarrow R^2: \mathbf{u} \mapsto \mathbf{s}(\mathbf{u}) = \frac{1}{\mathbf{x}_2^T \cdot \mathbf{x}_1^\perp} [-\|\mathbf{x}_1\| \mathbf{x}_2^\perp, \|\mathbf{x}_2\| \mathbf{x}_1^\perp] \cdot \mathbf{t}. \quad (6)$$

7.2. Rozbor přesnosti určení vektoru posunutí

Přesnost určení vektoru posunutí závisí především na velikosti směrů záměr od obou radarů ψ_1, ψ_2 a na měřených hodnotách LOS posunů t_1, t_2 , jak udávají vzorce (1), a také na přesnosti měření LOS posunů t_1, t_2 a na přesnosti určení směrů ψ_1, ψ_2 .

Na přesnost určení vektoru posunutí naopak nemá vliv velikost spádové oblasti, tzv. $R_{\text{bin}} \Delta R = 0,75m$. Tato hodnota vyjadřuje neurčitost polohy monitorovaného bodu. Je možné velmi přesně určit vektor posunutí bodu na mostě a správně odhadnout přesnost jeho určení, avšak přitom nelze identifikovat polohu tohoto posunujícího se bodu lépe než s řádově metrovou rozlišovací schopností. Tento problém je způsoben nejen velikostí spádové oblasti ΔR , ale též rozdílnou odrazivostí materiálu a složitostí konstrukce v části mostovky v dané spádové oblasti. Řešení tohoto problému by bylo možné s pomocí speciálního matematicko-statistického postupu (tzv. spatial statistics) a s dodatečnými předpoklady o rozložení odrazivosti v monitorované oblasti mostu. Tento postup však nelze použít pro jeden izolovaný úsek mostovky v rámci jedné nebo dvou spádových oblastí, ale je při něm nutné využít několika měřených LOS posunů v souvislé řadě za sebou. Aplikace zmíněného postupu je mimo rozsah této Technologie. Neurčitost identifikace posunujícího se bodu tedy není předmětem tohoto rozboru přesnosti.

Dalším problémem, který nastává při analýze přesnosti posunů, je vzájemné ovlivňování obou radarů. K tomu může dojít, pokud jsou antény radarů nasměrovány proti sobě a jejich záměry jsou téměř vodorovné. V takovém případě jeden radar přijímá záření druhého radaru a nedokáže je odlišit od odraženého záření, které vyslal. Tomu lze částečně předejít umístěním radarů za sebe tak, aby oba mířily stejným směrem pod dostatečně rozdílným vertikálním směrem záměry. To však přináší další problémy, neboť obvykle nebývá pod mostem dost místa na to, aby radary byly od sebe přiměřeně vzdáleny. Přílišná blízkost radarů totiž znamená malý úhel mezi jejich záměry, což zvyšuje riziko vzájemného ovlivňování v důsledku přijetí odraženého signálu jednoho radaru druhým radarem. Navíc příliš ostrý svislý úhel mezi směry LOS posunů zhoršuje přesnost určení vektoru posunutí.

Z výše zmíněných důvodů nemůže předkládaný rozbor přesnosti postihnout všechny vlivy, které na proces určování vektoru posunutí působí. Rozbor přesnosti je proto založen pouze na vztazích (1) a na přesnosti veličin t_1, t_2, ψ_1, ψ_2 . Přesnost směrů ψ_1, ψ_2 je dána přesností určení polohy radarů vůči zaměřovanému bodu. Ke stanovení přesnosti vektoru posunutí je tedy nutno znát hodnoty LOS posunů t_1, t_2 , souřadnice polohy obou radarů a jejich charakteristiky přesnosti. Ovšem s ohledem na výše zmíněnou neurčitost identifikace polohy posunujícího se (zaměřovaného) bodu, je stanovení charakteristik přesnosti souřadnic polohy obou radarů velmi problematické, neboť tato neurčitost ovlivňuje polohu počátku souřadnicového systému, ve kterém se určuje poloha obou radarů (viz Obr. 8). Toto je třeba mít na paměti při dalších úvahách. Předpokládáme, že tyto charakteristiky přesnosti jsou dány ve formě kovarianční matice \mathbf{C}_u

$$\mathbf{C}_u := \begin{bmatrix} \mathbf{C}_t & , & \mathbf{O}_{2,4} \\ \mathbf{O}_{4,2} & , & \mathbf{C}_{xy} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

kde

- \mathbf{C}_u ... kovarianční matice vektoru \mathbf{u} ,
- \mathbf{C}_t ... známá kovarianční matice LOS posunů $[t_1, t_2]$,
- $\mathbf{O}_{2,4}$... nulová matice typu 2×4 (o 2 řádkách a 4 sloupcích),
- $\mathbf{O}_{4,2}$... nulová matice typu 4×2 ,
- \mathbf{C}_{xy} ... kovarianční matice souřadnic obou radarů, tj. kovarianční matice vektoru $[x_1, y_1, x_2, y_2]$.

Kovarianční matici složek vektoru posunutí, označme ji \mathbf{C}_s , lze pak snadno určit pomocí zákona hromadění kovariancí.

$$\mathbf{C}_s = \mathbf{J}_u \cdot \mathbf{C}_u \cdot \mathbf{J}_u^T, \quad (8)$$

kde

- \mathbf{J}_u ... Jacobiho matice zobrazení s daného vztahem (6), $\mathbf{J}_u := \frac{\partial s}{\partial \mathbf{u}}$,
- \mathbf{u} ... vektor měřených veličin, $\mathbf{u} := [t_1, t_2, x_1, y_1, x_2, y_2]$,
- \mathbf{C}_u ... známá kovarianční matice vektoru \mathbf{u} .

7.2.1. Příklad zanedbání nepřesnosti směrů LOS posunů

Pokud by souřadnice x_1, y_1, x_2, y_2 obou radarů byly změřeny bezchybně (zanedbáme jejich chyby), byly by také směry ψ_1, ψ_2 určeny absolutně přesně a tudíž by byly absolutně přesné i vektory $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$. V takovém případě by kovarianční matice \mathbf{C}_{xy} byla nulová a v Jacobiho matici \mathbf{J}_u by se anulovaly derivace podle souřadnic x_1, y_1, x_2, y_2 , neboť tyto souřadnice by byly konstantní. Jacobiho matice \mathbf{J}_u by tedy měla tvar

$$\mathbf{J}_u = \frac{1}{r_D} \begin{bmatrix} r_{2,Y} & , & -r_{1,Y} & , & 0 & , & 0 & , & 0 & , & 0 \\ -r_{2,X} & , & r_{1,X} & , & 0 & , & 0 & , & 0 & , & 0 \end{bmatrix},$$

kde

$$r_D := r_{1,X}r_{2,Y} - r_{2,X}r_{1,Y} = \mathbf{r}_2^T \cdot \mathbf{r}_1^\perp.$$

V tomto zjednodušeném případě by se v zákoně hromadění kovariancí (8) neuplatnila celá kovarianční matice (7), ale jen její submatice \mathbf{C}_t , a místo Jacobiho matice \mathbf{J}_u o rozměrech 2×6 by tam vystupovala menší Jacobiho matice \mathbf{J}_t o rozměrech 2×2

$$\mathbf{J}_t := \frac{1}{r_D} \begin{bmatrix} r_{2,Y} & , & -r_{1,Y} \\ -r_{2,X} & , & r_{1,X} \end{bmatrix} = \frac{1}{r_D} [-\mathbf{r}_2^\perp, \mathbf{r}_1^\perp]. \quad (9)$$

Zákon hromadění kovariancí by pak měl tvar

$$\mathbf{C}_s = \mathbf{J}_t \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{J}_t^T. \quad (10)$$

Výslednou kovarianční matici \mathbf{C}_s můžeme názorně zobrazit prostřednictvím střední elipsy chyb. Přičemž rozměry a orientaci střední elipsy chyb příslušné ke kovarianční matici

$$\mathbf{C}_s =: \begin{bmatrix} c_{1,1} & , & c_{1,2} \\ c_{1,2} & , & c_{2,2} \end{bmatrix}$$

Ize vypočítat podle vzorců:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{c_{1,1} + c_{2,2} + D}{2}}, \\ b &= \sqrt{\frac{c_{1,1} + c_{2,2} - D}{2}}, \\ \varphi &= \frac{1}{2} \left(\arctan\left(\frac{2c_{1,2}}{c_{1,1} - c_{2,2}}\right) + \pi \cdot \text{ind}(c_{1,1} - c_{2,2} < 0) \right), \end{aligned} \quad (11)$$

kde

a ... velikost hlavní poloosy elipsy,

b ... velikost vedlejší poloosy elipsy,

φ ... úhel stočení hlavní poloosy elipsy,

D ... diskriminant kovarianční matice, $D := \sqrt{(c_{1,1} - c_{2,2})^2 + 4c_{1,2}^2}$,

ind ... indikátor pravdivosti, $\text{ind}(\text{pravda}) := 1$, $\text{ind}(\text{nepravda}) := 0$.

Tato elipsa chyb je stejná pro různé vektory posunutí, neboť Jacobiho matice \mathbf{J}_t nezávisí na vektoru \mathbf{s} . Ukazuje to obrázek 15, na němž středy elips jsou v koncovém bodě příslušného vektoru posunutí \mathbf{s} . Záměry radarů jsou na něm vyznačeny červenými úsečkami. Střední elipsy chyb odpovídají přesnosti měření LOS posunů 0.02 mm a jsou zakresleny v měřítku 10:1.

7.2.2. Příklad uvažování nepřesnosti směrů LOS posunů

V obecném případě, kdy uvažujeme i nepřesnosti směrů LOS posunů, je charakteristikou přesnosti vstupních měřených veličin $t_1, t_2, x_1, y_1, x_2, y_2$ plná kovarianční matice \mathbf{C}_u . V tomto případě je třeba určit Jacobiho matici \mathbf{J}_u derivováním vektoru \mathbf{s} podle všech složek vektoru \mathbf{u} . Je výhodné rozdělit ji na 3 submatice typu 2×2 .

$$\mathbf{J}_u =: [\mathbf{J}_t, \mathbf{J}_{xy,1}, \mathbf{J}_{xy,2}]. \quad (12)$$

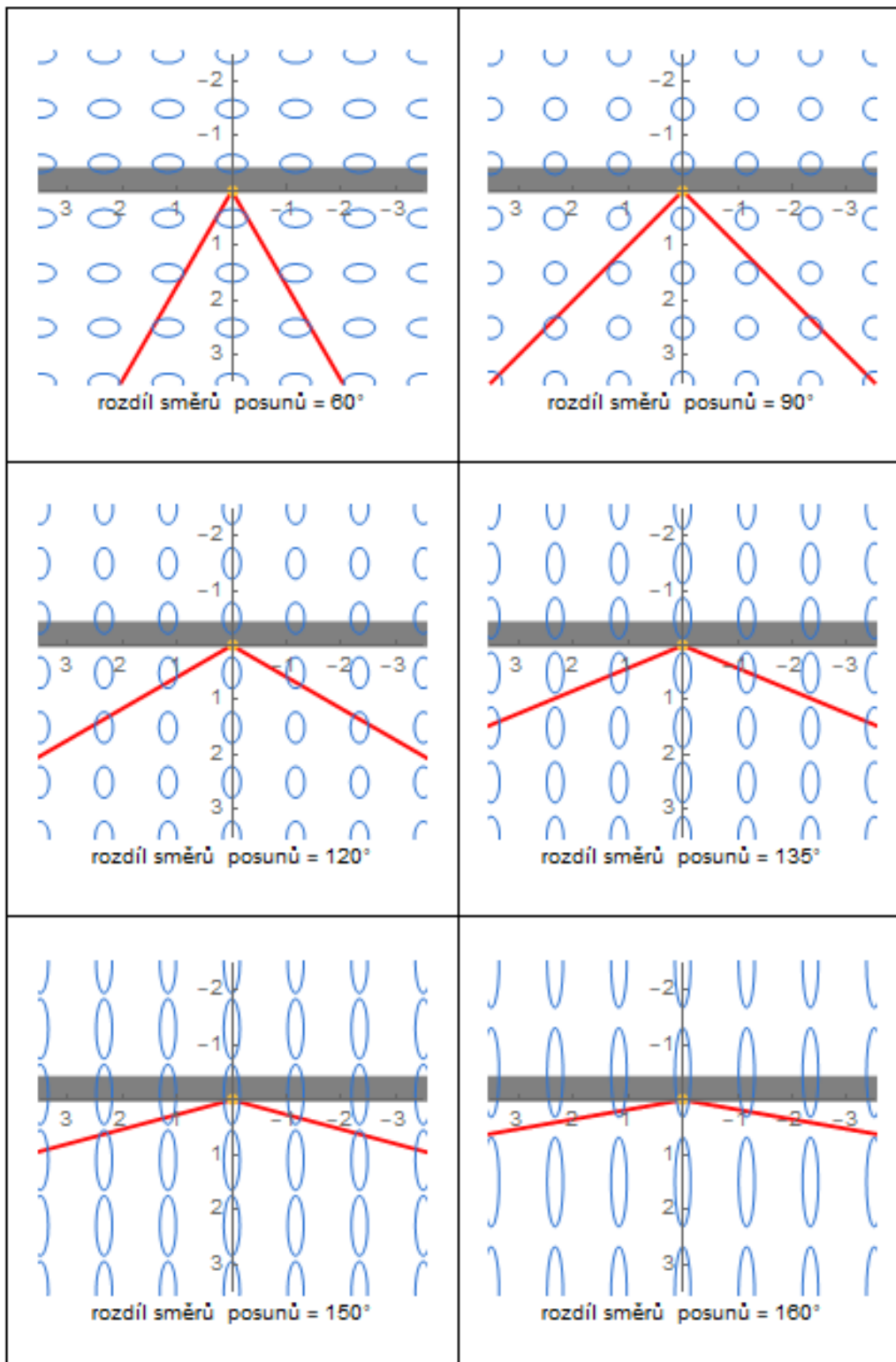
Submatice \mathbf{J}_t byla zavedena vztahem (9), submatice $\mathbf{J}_{xy,i}$ lze pro $i \in \{1,2\}$ vypočítat podle vzorce

$$\mathbf{J}_{xy,i} = \frac{t_{3-i} \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & , & (-1)^i \\ (-1)^{3-i} & , & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{s} \cdot (r_D \mathbf{r}_i - (-1)^i \mathbf{r}_{3-i}^\perp)^T}{r_D \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}. \quad (13)$$

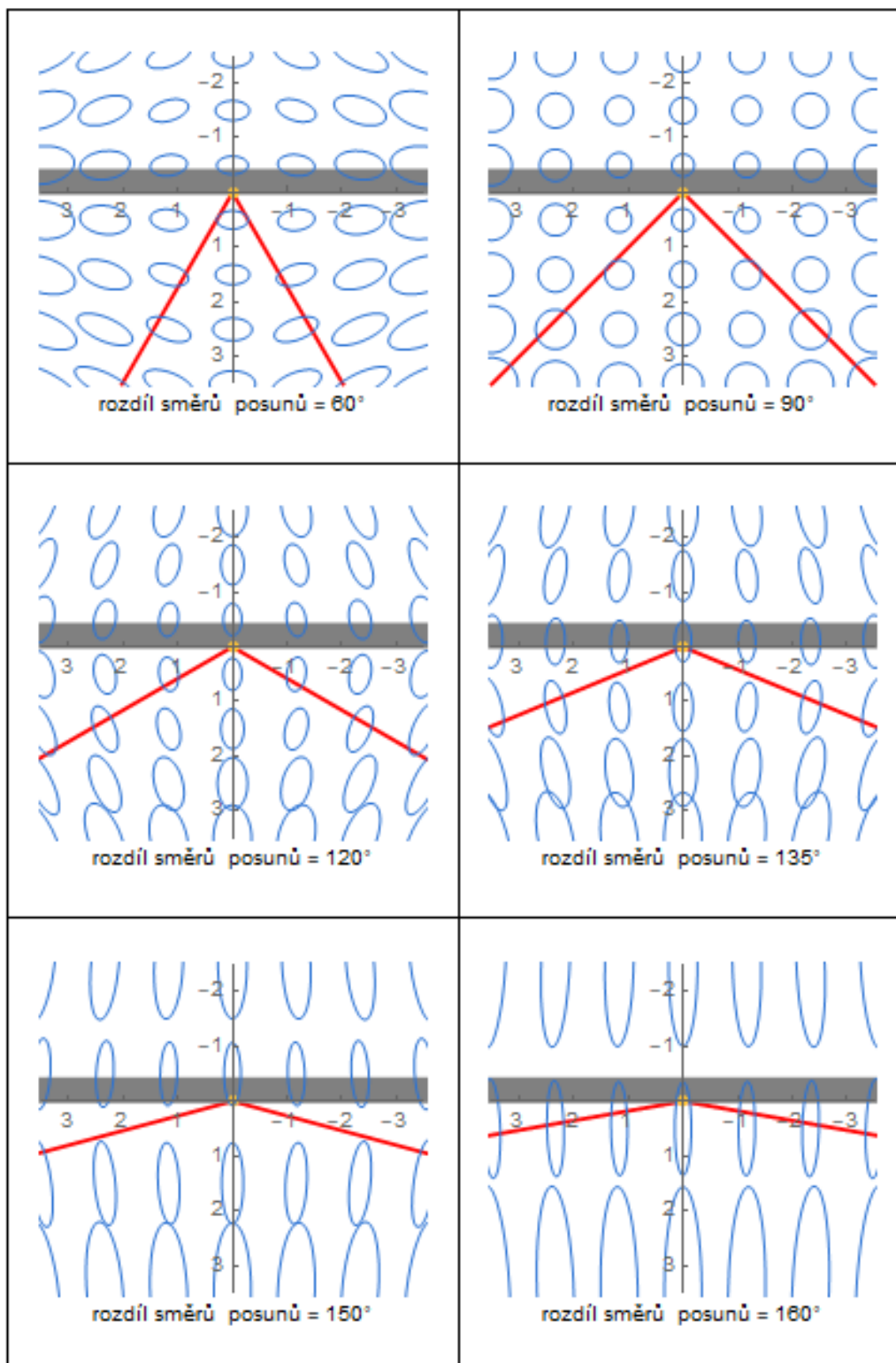
Dosazením matice $\mathbf{J}_{xy,i}$ pro $i \in \{1,2\}$ do (12) vznikne matice \mathbf{J}_u potřebná pro vyčíslení kovarianční matice \mathbf{C}_s podle vztahu (8).

I v tomto obecnějším případě můžeme kovarianční matici C_s názorně zobrazit prostřednictvím střední elipsy chyb. Její parametry lze určit podle vzorců (11). Tato elipsa chyb je však již závislá na velikosti a směru vektoru posunutí. Ukazuje to obrázek 16. Na něm jsou zakresleny střední elipsy chyb pro případ, kdy přesnost určení polohy radarů vůči zaměřovanému bodu je 150 mm a délka záměr od radarů k zaměřovanému bodu je 12 m. Této polohové přesnosti odpovídá směrodatná odchylka směrů záměr $0,7^\circ$.

Porovnáním odpovídajících si segmentů obrázků 15 a 16 je dobře vidět, že přesnost určení vektoru posunutí je v případě uvažování chyb v přesnosti směrů LOS posunů nižší než při zanedbání těchto chyb. Na obrázku 16 je rovněž patrné, že přesnost určení vektoru posunutí se snižuje s rostoucí velikostí posunu.

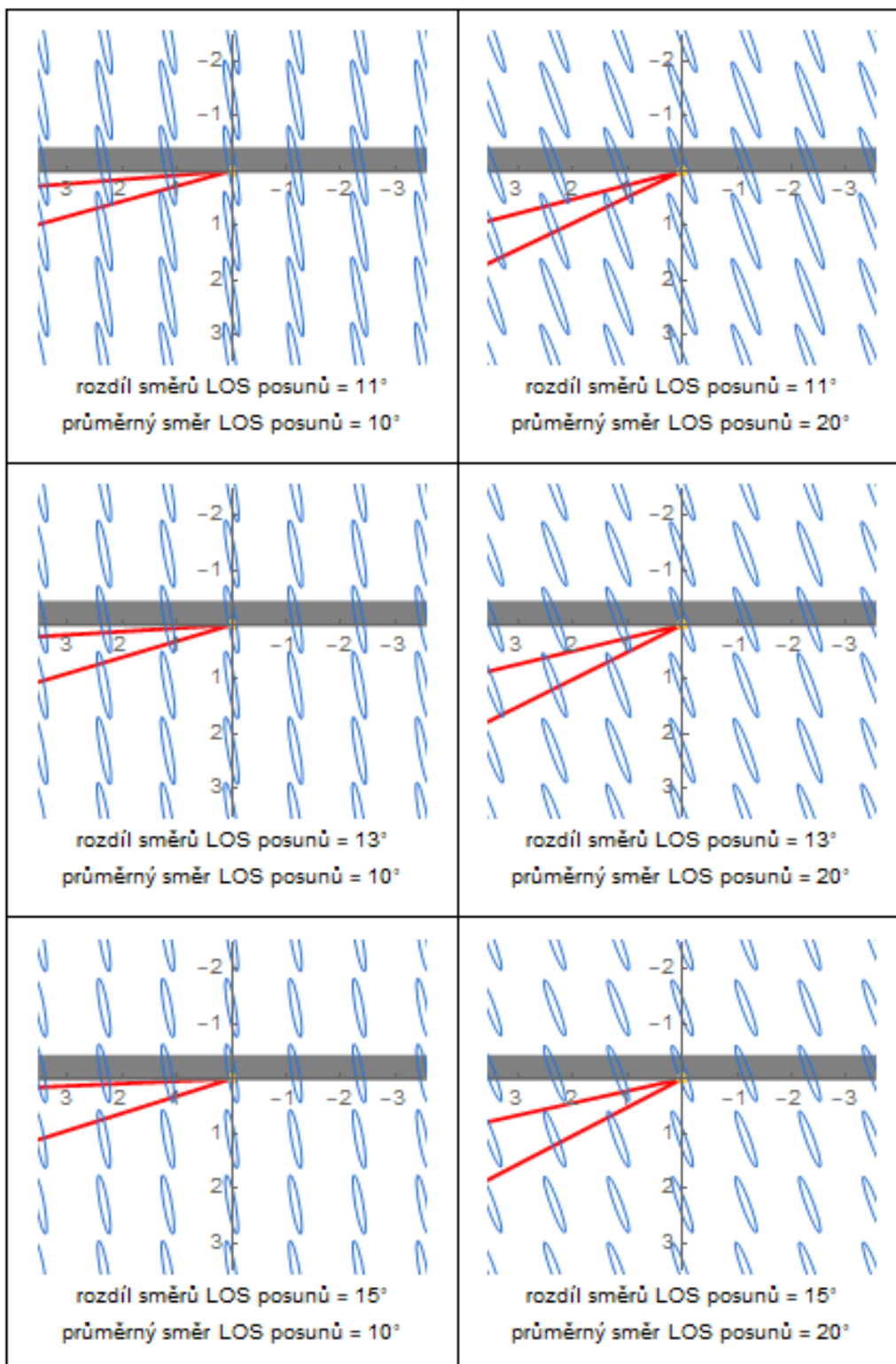


Obr. 15 : Přesnost vektoru posunutí pro různé úhly záměr při umístění radarů proti sobě. Směrodatná odchylka LOS posunů je 0,02 mm, nepřesnost směrů LOS posunů byla zanedbána. Měřítko středních elips chyb je 10:1.



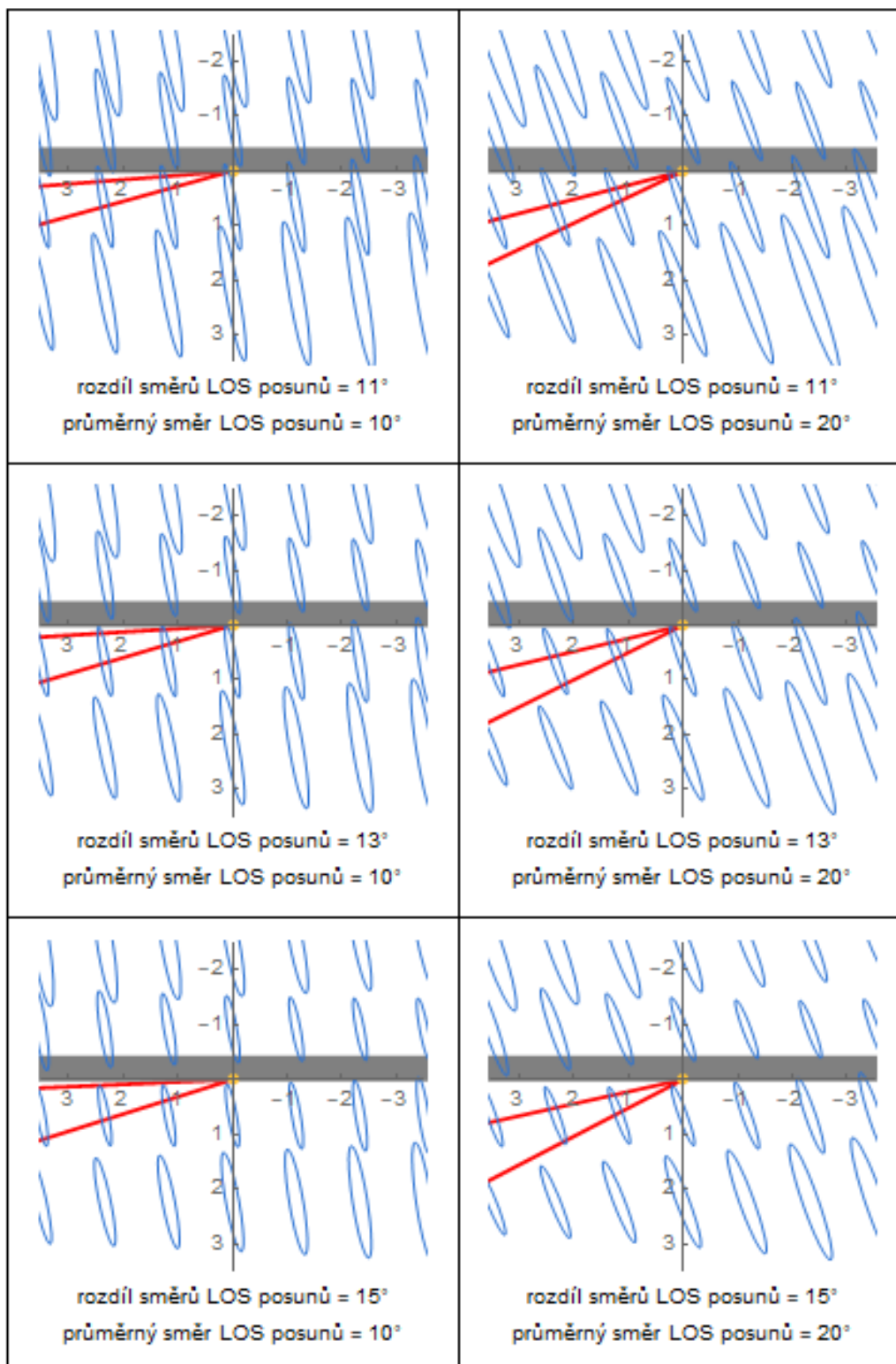
- těleso mostu
- směry LOS posunů
- střední elipsy chyb

Obr. 16 : Přesnost vektoru posunutí pro různé úhly záměr při umístění radarů proti sobě. Směrodatná odchylka LOS posunů je 0,02 mm, směry LOS posunů byly určeny s přesností 0,7°. Měřítko středních elips chyb je 10:1.



- těleso mostu
- směry LOS posunů
- střední elipsy chyb

Obr. 17 : Přesnost vektoru posunutí při umístění radarů za sebou. Směrodatná odchylka LOS posunů je 0,02 mm, nepřesnost směrů LOS posunů byla zanedbána. Měřítko středních elips chyb je 10:1.



- těleso mostu
- směry LOS posunů
- střední elipsy chyb

Obr. 18 : Přesnost vektoru posunutí při umístění radarů za sebou. Směrodatná odchylka LOS posunů je 0,02 mm, směry LOS posunů byly určeny s přesností 0,7°. Měřítka středních elips chyb je 10:1.

7.2.3. Příklad umístění radarů za sebou

Pokud není možné umístit každý radar pod opačný konec mostu a je dostatek místa pro oba radary pod jedním krajem sledovaného pole mostu, je výhodné postavit radary za sebe a zaměřit je na nosnou konstrukci mostu ve stejném horizontálním směru. V takovém případě přesnost určení posunů závisí na vzdálenosti obou radarů, neboť ta ovlivňuje vertikální úhel, který svírají jejich záměry. Přesnost vektoru posunutí lze i v tomto případě určit podle vzorce (8). Tuto přesnost znázorněnou pomocí středních elips chyb ukazuje pro různé kombinace směrů záměr radarů obrázky 17 a 18.

Souřadnicové osy v obrázcích 15, 16, 17 a 18 jsou kótovány v mm, měřítko středních elips chyb je 10:1. Vektory posunutí mají koncový bod ve středech elips chyb a počátek v průsečíku záměr radarů (červeně zobrazených). Směrodatná odchylna LOS posunů se ve všech případech předpokládá 0,02 mm.

7.2.4. Rozbor přesnosti odděleně ve svislém a v podélném směru

Pokud je v praxi požadováno určit složku vektoru posunutí jen ve svislém nebo podélném směru, lze charakteristiku přesnosti této požadované složky vyjádřit jako varianci marginálního rozdělení pravděpodobnosti vektoru určovaného posunutí. Tato variance je v případě normálního rozdělení pravděpodobnosti dána přímo kovarianční maticí C_s ; její hodnota se nachází na diagonále matice C_s . Při označení prvků kovarianční matice

$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} \\ c_{1,2} & c_{2,2} \end{bmatrix} := C_s$$

Lze směrodatnou odchylnu podélné (vodorovné) složky posunu určit jako

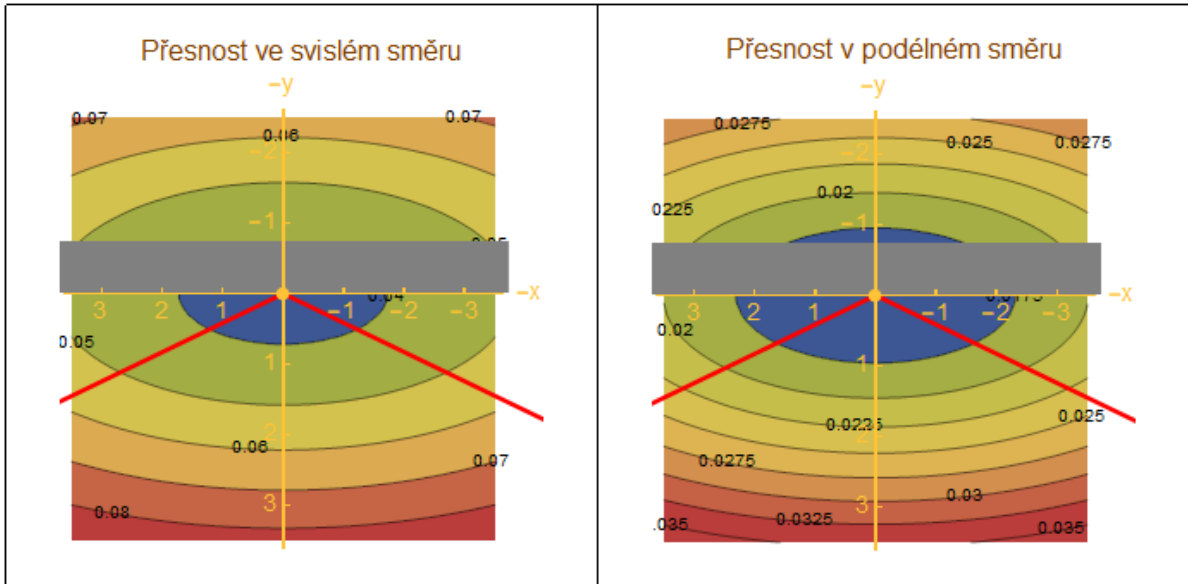
$$\sigma_x = \sqrt{c_{1,1}} .$$

Pro směrodatnou odchylnu svislé složky posunu platí

$$\sigma_y = \sqrt{c_{2,2}} .$$

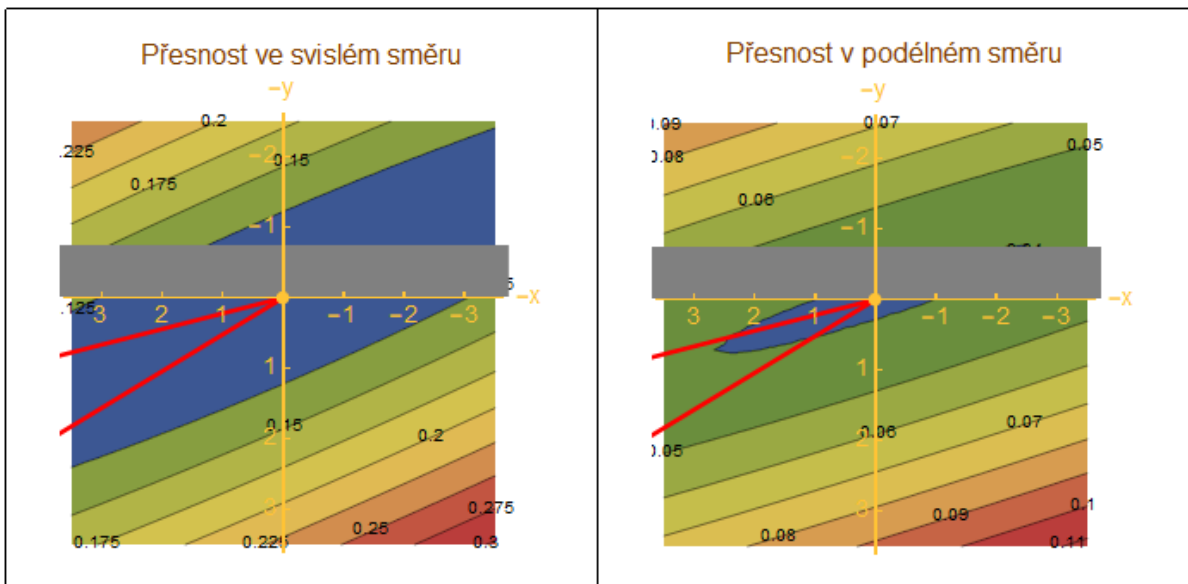
Směrodatné odchylny σ_x , σ_y jsou znázorněny pomocí izočar přesnosti na obrázcích 19, 20.

V případě umístění radarů proti sobě jsou tyto směrodatné odchylny σ_x , σ_y znázorněny na obrázku 19 zvlášť pro svislou složku vektoru posunutí a zvlášť pro podélnou složku. Stejným způsobem jsou tyto směrodatné odchylny znázorněny na obrázku 20 pro případ umístění radarů za sebou. Izočary přesnosti i souřadnicové osy v obrázcích 19, 20 jsou kótovány v mm.



— těleso mostu
 — směry LOS posunů
 rozdíl směrů LOS posunů = 135°
 průměrný směr LOS posunů = 90°

Obr. 19 : Přesnost oddělených složek vektoru posunutí při umístění radarů proti sobě. Směrodatná odchylka LOS posunů je 0,02 mm, směry LOS posunů byly určeny s přesností 0,7°. Hodnoty přesnosti jsou v mm.



— těleso mostu
 — směry LOS posunů
 rozdíl směrů LOS posunů = 15°
 průměrný směr LOS posunů = 20°

Obr. 20 : Přesnost oddělených složek vektoru posunutí při umístění radarů za sebou. Směrodatná odchylka LOS posunů je 0,02 mm, směry LOS posunů byly určeny s přesností 0,7°. Hodnoty přesnosti jsou v mm.

7.2.5. Shrnutí poznatků rozboru přesnosti

Charakteristikou přesnosti určení vektoru posunutí je kovarianční matice C_s . Byla odvozena pro dva případy:

1. Příklad zanedbání nepřesnosti směrů LOS posunů — dána kovarianční matice C_t , (kapitola 7.2.1)
2. Příklad uvažování nepřesnosti směrů LOS posunů — dány kovarianční matice C_t , C_{xy} (kapitola 7.2.2)

Výpočet kovarianční matice C_s v obou uvažovaných případech (stručně: zanedbání nepřesnosti směrů, uvažování nepřesnosti směrů) přehledně zobrazuje následující tabulka.

případ	C_s	použité substituce
zanedbání nepřesnosti směrů	$J_t \cdot C_t \cdot J_t^T$	(10), (9)
uvažování nepřesnosti směrů	$J_u \cdot C_u \cdot J_u^T$	(8), (7), (12), (9), (13)

Názornou představu o přesnosti určení vektoru posunutí podávají obrázky 15, 16, 17 a 18.

Z nich je patrné, že přesnost složek vektoru posunutí určených podle vzorců (1) závisí především na rozdílu hodnot směrů LOS posunů. Tedy v praxi na volbě postavení (umístění) radarů vůči monitorované mostní konstrukci. Čím více se rozdíl těchto směrů liší od pravého úhlu, tím je přesnost určení vektoru posunutí nižší. Z tohoto důvodu je i postavení radarů proti sobě z hlediska přesnosti výsledků obvykle výhodnější, než postavení radarů za sebou.

Dále závisí přesnost složek vektoru posunutí i na přesnosti měření LOS posunů. Ta je však v principu dána použitým přístrojovým vybavením (výrobce udává přesnost měření LOS posunů radarem IBIS je 0,02 mm) a v měřické praxi ji lze ovlivnit (nezhoršit) jen zajištěním co nejkvalitnějších odrazů radiového signálu, například umístěním dostatečně velkých koutových odražečů.

7.3. Synchronizace naměřených dat

Program IBIS Data Viewer neumožňuje vyhodnocení měření více radary a proto je nutné data z tohoto programu vyexportovat a dále zpracovávat v nějakém jiném vhodném programu. Předtím je ještě nutné vyexportovaná data časově synchronizovat. K tomu je potřeba znát přesný čas začátku a konce měření, který se ukládá s naměřenými daty. Tento přesný čas, ale ukládá pouze nejnovější verze IBIS Surveyor (verze 1.3), takže synchronizaci nelze provádět s daty naměřenými pomocí starších verzí tohoto programu. Pokud z nějakého důvodu není možná časová synchronizace, je možné synchronizovat měření pomocí korelace měřených pohybů z obou radarů. Tato synchronizace ale nebude mít takovou přesnost.

Časový posun měření se vypočte podle vzorce:

$$\Delta S = s_1 - s_2 + \delta$$

kde

s_1 – čas začátku měření radaru č. 1,

s_2 – čas začátku měření radaru č. 2,

δ – časový posun mezi hodinami obslužných počítačů jednotlivých radarů, měřený na radaru č. 1.

Pro synchronizaci měřených dat je nutné vytvořit vhodný skript, který umožní spárovat měření z jednotlivých radarů. Tato úloha se může zkomplikovat, pokud frekvence měření obou radarů není totožná. V takovém případě je nutné při párování měření brát v úvahu různé frekvence měření radarů, jinak by vznikl nežádoucí časový posun.

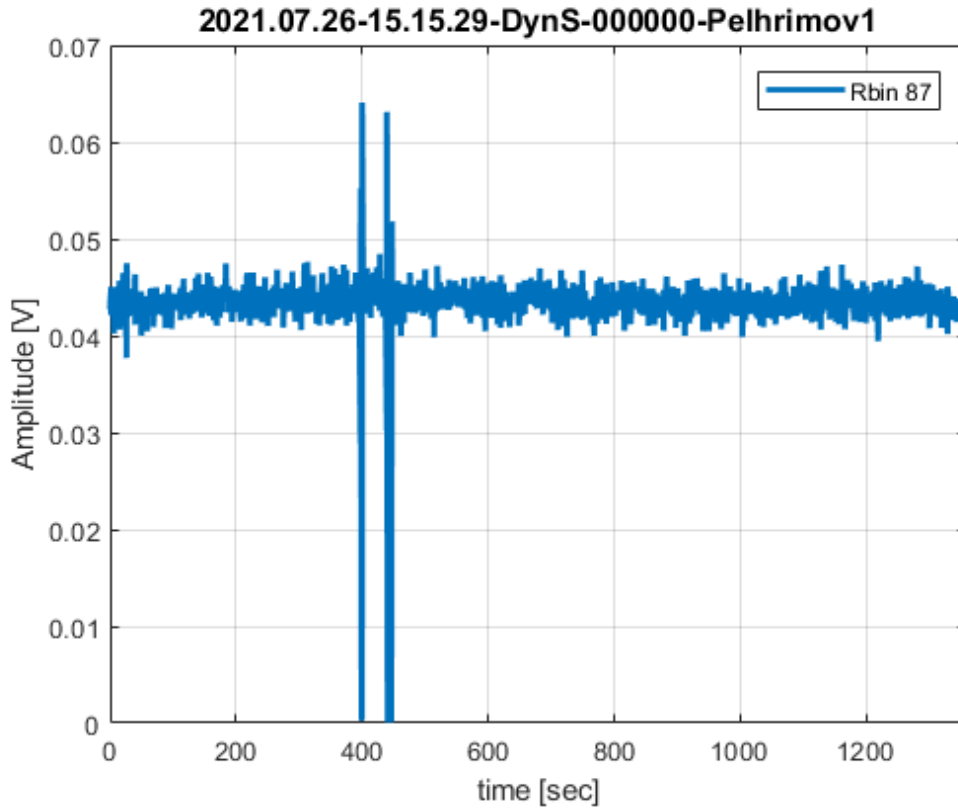
8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků

8.1 Zpracování dat v programu IBIS Data Viewer

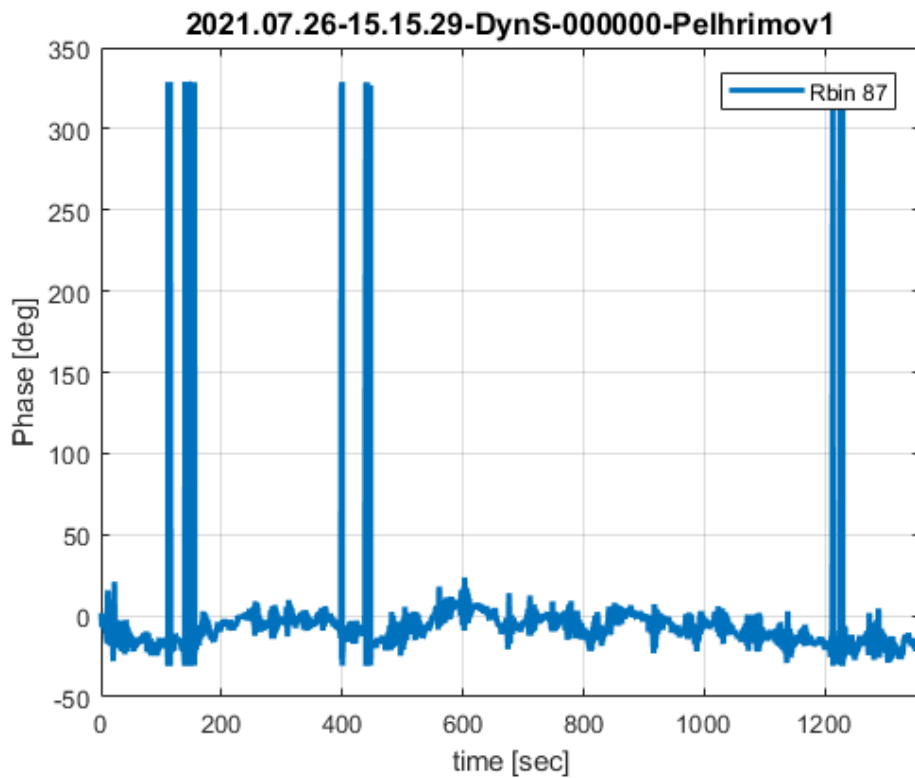
Při měření program IBIS Surveyor ukládá data postupně do souborů o velikosti 1 GB. V závislosti na nastavení parametrů radaru se do jednoho souboru vejde zhruba několik desítek minut měření. Před zpracováním je potřeba takto rozdělené měření spojit do jednoho souboru. K tomu je v programu IBIS Data Viewer funkce Tools > Merge GBD files. Otevře se dialogové okno, do kterého se přidají všechny soubory, které je potřeba spojit a zadá se jméno výsledného souboru. Pracovat s jednotlivými soubory postupně zvlášť není možné, protože program IBIS Surveyor bere vždy jako počáteční hodnotu 0, takže by na sebe měření nenavazovala.

Před exportem dat je potřeba zkontrolovat zda nejsou v měřeních viditelné skoky, které jsou většinou způsobené zacloněním radaru např. přejezdem vozidla před radarem. Program IBIS Data Viewer to může chybně vyhodnotit jako posun a na výsledné grafu je vidět skok odpovídající velikosti násobku fáze (4,38mm). Pro odstranění těchto skoků je v programu funkce Stability threshold. Zde se nastaví dva parametry Threshold a Time window, pomocí kterých se odfiltruje nevhodné měření na základě změny měřené amplitudy. Komplikací je, že program používá nastavení Stability threshold pro všechny Rbiny stejné a může se stát, že hodnoty vhodné pro jeden Rbin nefungují pro jiný a naopak. Pokud není odstranění těchto skoků pomocí této funkce úspěšné, je další možností vyexportovat místo měřených posunů fáze a počítat posuny přímo z nich.

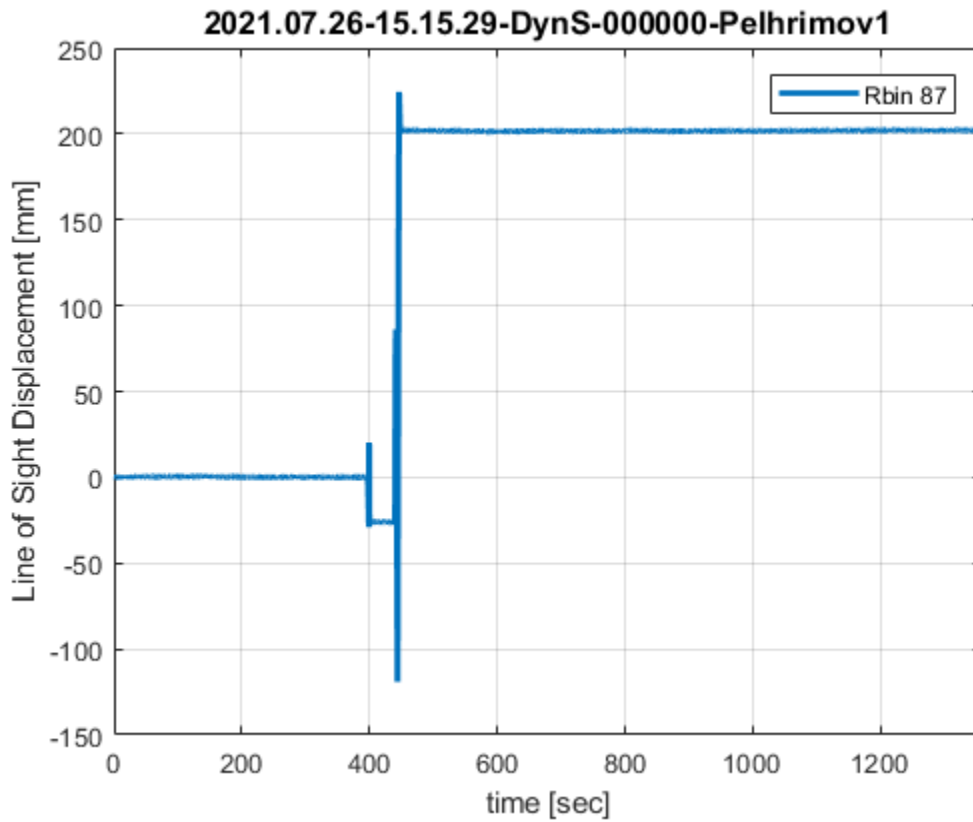
Na obrázcích 21 až 27 je vidět příklad fázového skoku. Lze ho odhalit nejlépe na grafu amplitudy Obr. 21 a Obr. 24. Na něm je vidět krátkodobá velká změna hodnot, která je nejčastěji způsobená zacloněním radaru. Podobné změny můžeme vidět i na grafu měřené fáze Obr. 22 a Obr. 25. Zde ale může dojít k chybné interpretaci. Při porovnání Obr. 21 a Obr. 22 můžeme pozorovat, že na Obr. 22 je krátkodobých změn zdánlivě více. Ty jsou ale způsobeny pouze vynesemím úhlu do grafu. Správně by hodnoty na Obr. 22 měly být v intervalu -180 až +180 nebo 0 až 360. Program IBIS Data Viewer, ale vždy redukuje hodnoty tak, aby počáteční hodnota byla nula, což může být u zobrazení hodnot fáze matoucí.



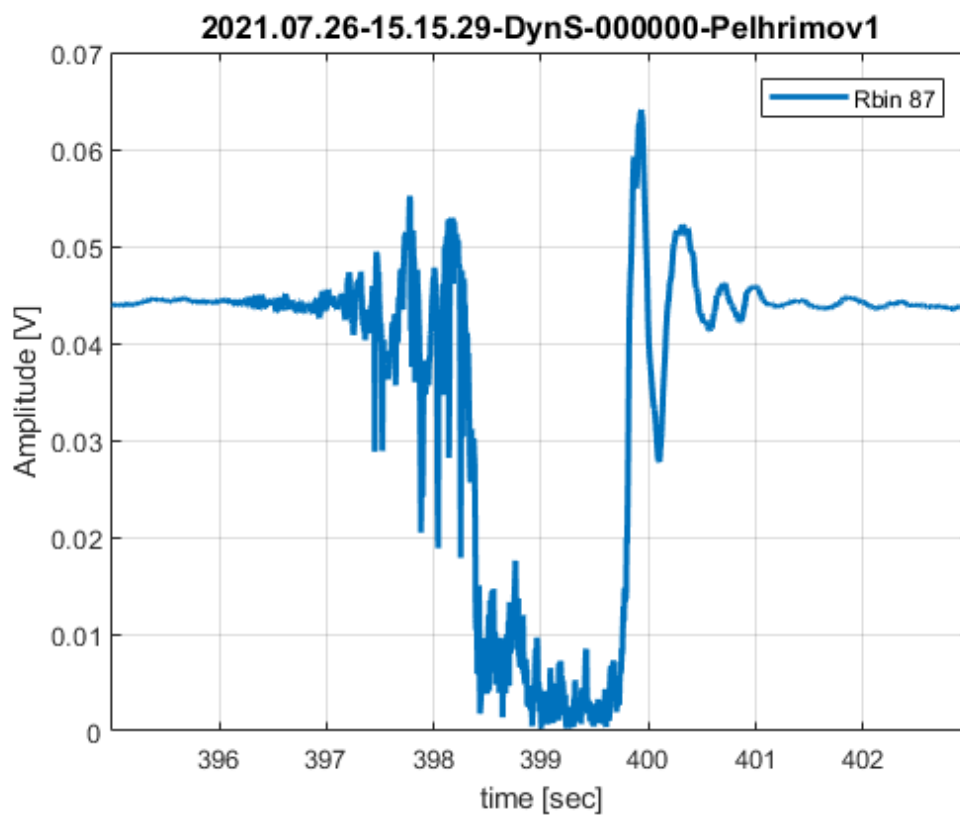
Obr. 21 : Příklad fázových skoků – měřená amplituda



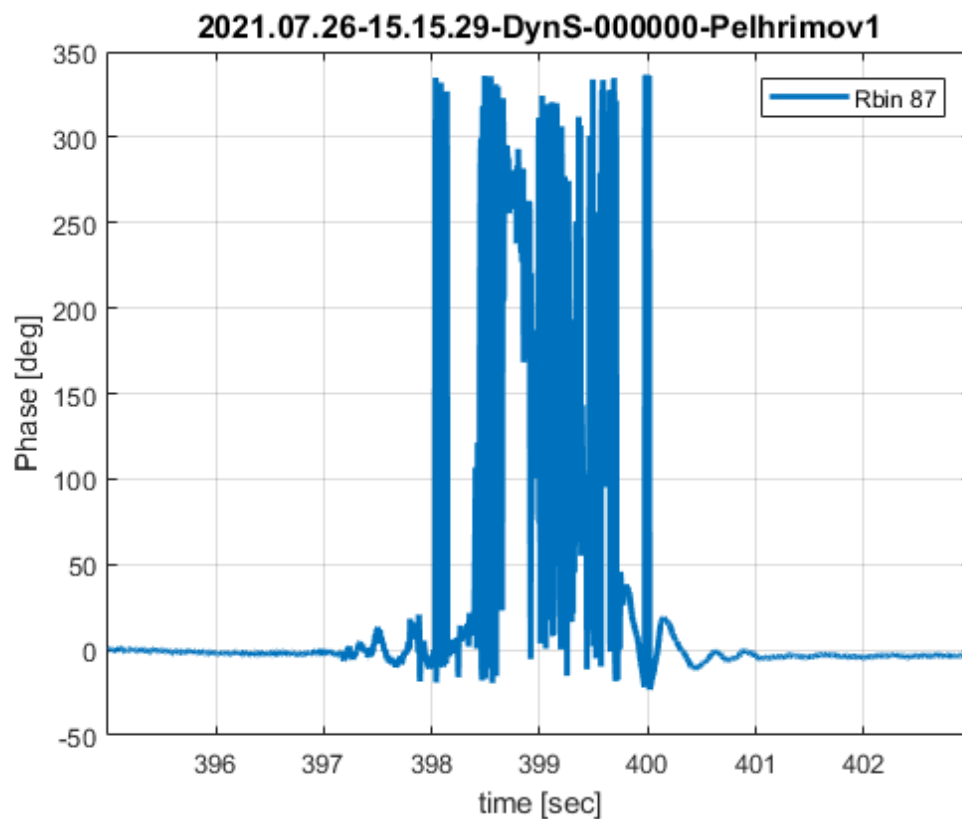
Obr. 22 : Příklad fázových skoků – měřená fáze



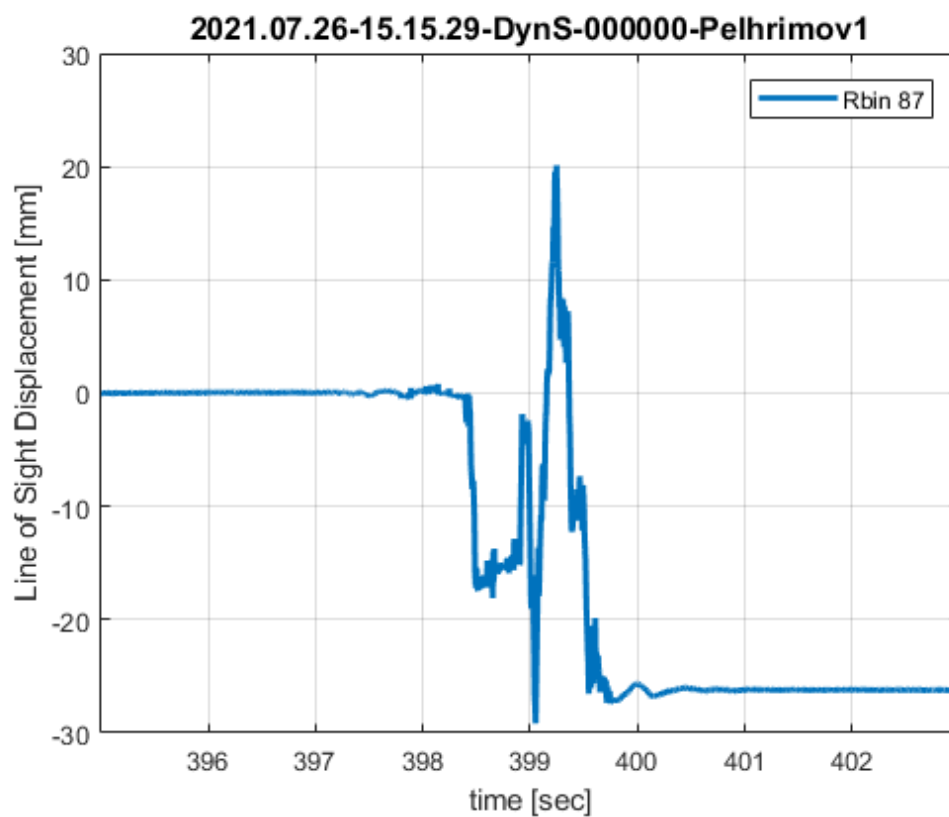
Obr. 23 : Příklad fázových skoků – měřený posun



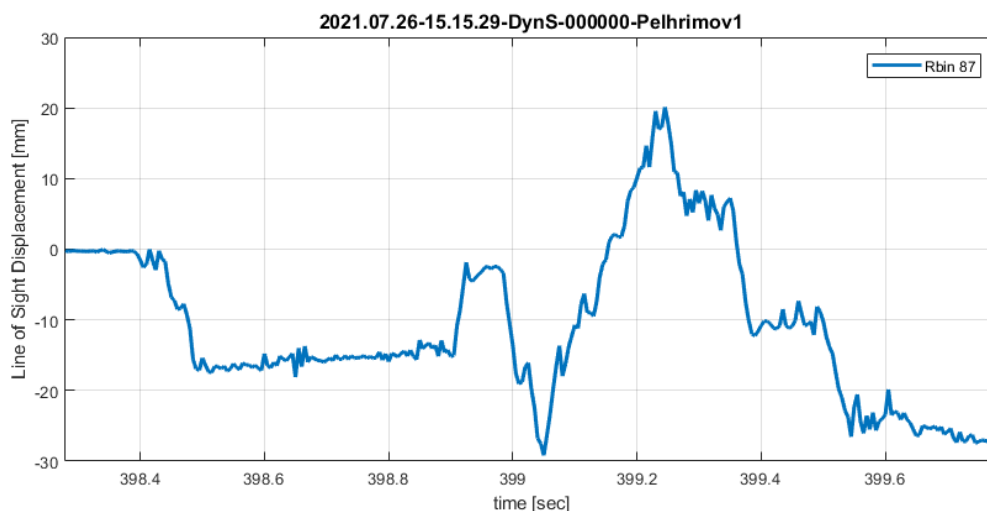
Obr. 24 : Příklad fázových skoků – měřená amplituda – detail



Obr. 25 : Příklad fázových skoků –měřená fáze – detail



Obr. 26 : Příklad fázových skoků –měřený posun – detail



Obr. 27 : Příklad fázových skoků – měřený posun –větší detail

Na obrázku 23 je vidět, jak důležité je zabývat se fázovými skoky, protože bez jejich odstranění nám mohou vycházet naprosto nesmyslné hodnoty.

Obrázky 26 a 27 ukazují detail fázových skoků, které běžně vznikají, když někdo projde před radarem, čemuž se při dlouhodobém měření lze jen těžko vyhnout. Na Obr. 26 je vidět fázový skok o 4×4.38 tedy 26.28 mm způsobený začleněním radaru na 1,2 s. Radar sám ale nedokáže odlišit, zda došlo k posunu nebo začlenění.

Výpočet posunů z fáze se provede pomocí následujícího vzorce

$$d = -\frac{\varphi'}{\pi} \cdot 4.38$$

kde

φ' je upravená fáze

před výpočtem posunů je potřeba fázi normalizovat, tak aby byla v intervalu $-180^\circ - +180^\circ$

$$\varphi' = \arctg\left(\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}\right)$$

kde φ je měřená fáze.

8.2 Zpracování dat v Matlabu

Zpracování dat v Matlabu je výhodné, protože Matlab dokáže pracovat i s velkými objemy dat a to celkem rychle na rozdíl od MS Excelu. Navíc má rozsáhlé možnosti prezentace dat. Nevýhodou je jeho složitost a nutnost mít alespoň základní znalosti o programování.

Nejprve se data importují do Matlabu, kde se následně synchronizují. Pomocí vzorce (1) se z měření vypočtou svislé a podélné pohyby. K tomu je zapotřebí identifikovat, do kterých Rbinů spadají jednotlivé měřené body. To lze snadno zjistit z vytvořeného 3D modelu.

Svislé a podélné posuny se následně prezentují pomocí vhodných grafů. Pro větší názornost je dobré do grafů vložit také průběh měřené teploty mostu, aby bylo vidět jak teplota ovlivňuje posuny.

9. Závěr

Použití dvou interferometrických radarů pro dlouhodobé simultánní měření podélných a svislých pohybů nosných konstrukcí mostů představuje novou metodu měření těchto pohybů, pomocí které můžeme získat údaje o chování nosné konstrukce mostu v závislosti na teplotě, jež jsou jinými metodami těžko měřitelné. Metody používané v současné době jsou vhodné především pro dynamické sledování mostních konstrukcí např. akcelerometry. Měření pomocí snímačů polohy jsou zase závislá na změnách teploty. Podélné pohyby mostní konstrukce jsou jen stěží měřitelné.

Radarové měření má také své úskalí, na která je potřeba dávat pozor, zejména kvalitu odrazu radarového signálu a geometrické parametry konfigurace radarů a nosné konstrukce mostu. Kvalita odraženého signálu se dá zlepšit pomocí koutových odražečů, avšak tvar nosné konstrukce mostu a její konfigurace vůči možným stanoviskům radarů může způsobit, že nebude možné měření provést. Při dlouhodobém měření je navíc nutné zajistit kvalitní stabilizaci radaru, aby změnou polohy radaru nedošlo ke znehodnocení výsledků. Problémy mohou způsobovat také další objekty, které jsou ve spádové oblasti měření, ale netvoří s mostem jeden celek (např. kabely nebo potrubí zavěšené pod mostem). Tyto objekty mohou kmitat rozdílně od nosné konstrukce mostu a nemusí být možné odlišit jejich pohyby od pohybu mostu.

Parametry statické odezvy mostovky zkoumaného mostu lze dokumentovat a vizualizovat pro následné analýzy a získat tak potřebné doplňující informace o sledovaných mostech a následně pak i nové poznatky o charakteru chování určitých konkrétních typů mostů.

10. Seznam použité literatury

- [1] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A. :Static and Dynamic testing of bridges: use of IBIS-FS for measuring deformation and identifying modal analysis parameters, Pisa 2016
- [2] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBIS-FS & IBIS-FS Plus User Manual rev. 1.0., Pisa 2016.
- [3] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBIS Surveyor 1.2 User Manual, Pisa 2016.
- [4] Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBISDV v.03.04.005 – User Manual, Pisa, March 2012.

- [5] Ověřená technologie určování svislých průhybů kovových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem [online]. [cit. 05. 11. 2020]. Dostupné z: https://p-insar.cz/sites/default/files/public_files/aplikovane_vystupy/2012/TIP_FR-TI4-436_Priloha-5_OT_mosty_kovove.pdf
- [6] Ověřená technologie určování svislých průhybů betonových mostních konstrukcí pozemním interferometrickým radarem [online]. [cit. 05. 11. 2020]. Dostupné z: https://p-insar.cz/sites/default/files/public_files/aplikovane_vystupy/2012/TIP_FR-TI4-436_Priloha-4_OT_mosty_betonove.pdf
- [7] Technologie určování dynamických pohybů mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií [online]. [cit. 01. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.defmori.cz/publication/c566b894-7346-4246-81f7-4fb8fbe32f4a>

Tento výsledek byl podpořen Ministerstvem vnitra České republiky, v rámci programu BV III/1-VS, projekt „*Pokročilá technologie rychlého určování deformací mostů radarovou interferometrií a její využití v diagnostice*“ č. VI20192022167.

Zpráva o provedeném ověřovacím měření na silničním mostě u Pelhřimova

Milan Talich, Jan Havrlant, Lubomír Soukup, Filip Antoš, Michal Polák, Tomáš Plachý, Pavel Ryjáček, Miroslav Čáp, Martin Macho

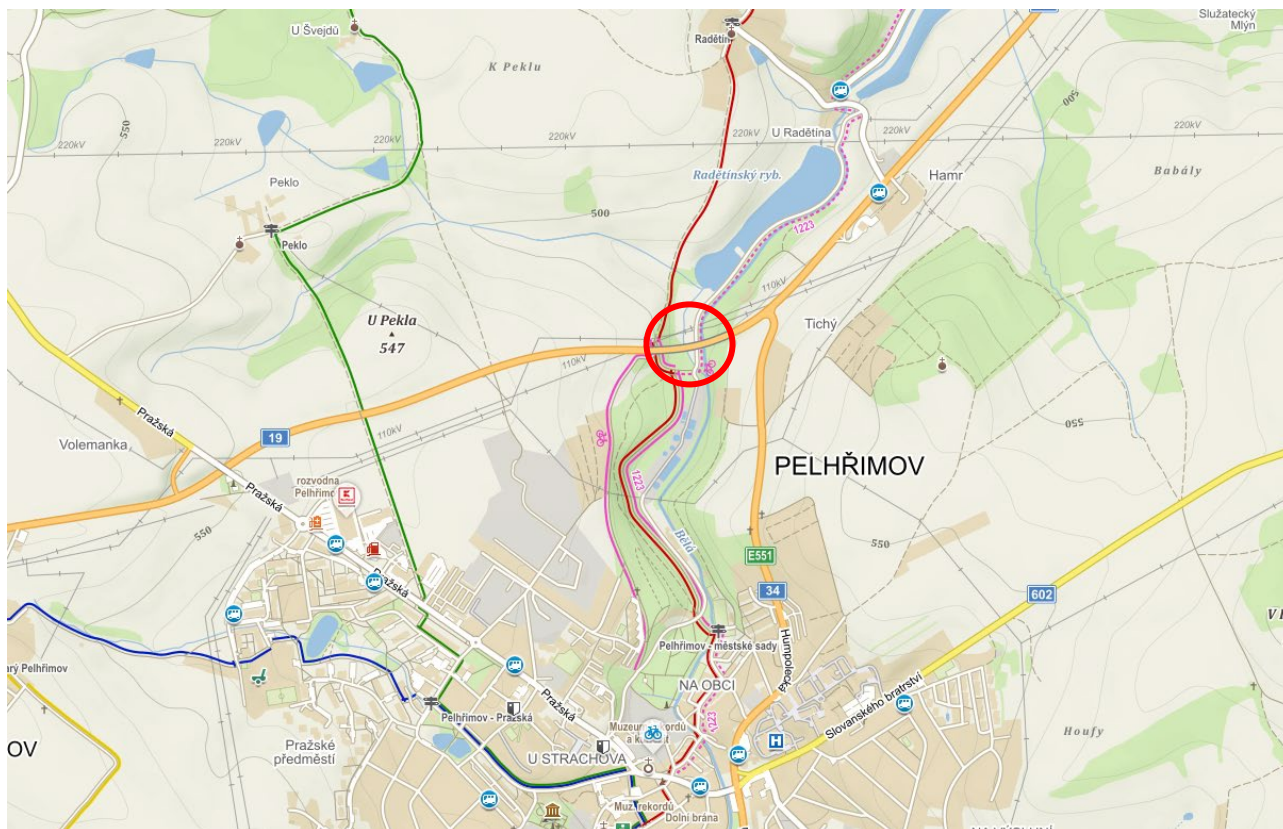
Pro ověření technologie určování vlivu teplotních či dalších změn na pohyby mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií bylo provedeno měření na silničním mostě u Pelhřimova.

1. Specifikace objektu

U mostního objektu proběhla ještě před měřením jeho rekognoskace. Posuzovala se konstrukce objektu, možnosti umístění interferometrických radarů a odrazivost radarových vln od mostovky. Jedná se o silniční dvoutrámový most z předpjatého betonu šířky 14,5 m (evidenční číslo 19-063), který převádí přes údolí potoka Bělá komunikaci 1. třídy číslo 19.



Obr. 1 – Spodní pohled na nosnou konstrukci zkoumaného silničního mostu ev. č. 19-063 u Pelhřimova



Obr. 2 – Poloha zkoumaného silničního mostu ev. č. 19-063 u Pelhřimova

Konstrukce a materiál mostovky neumožňuje měřit interferometrickým radarem bez nutnosti použít koutové odražeče. Po obou stranách mostovky byly proto nainstalovány koutové odražeče, jak ukazuje obrázek 3.



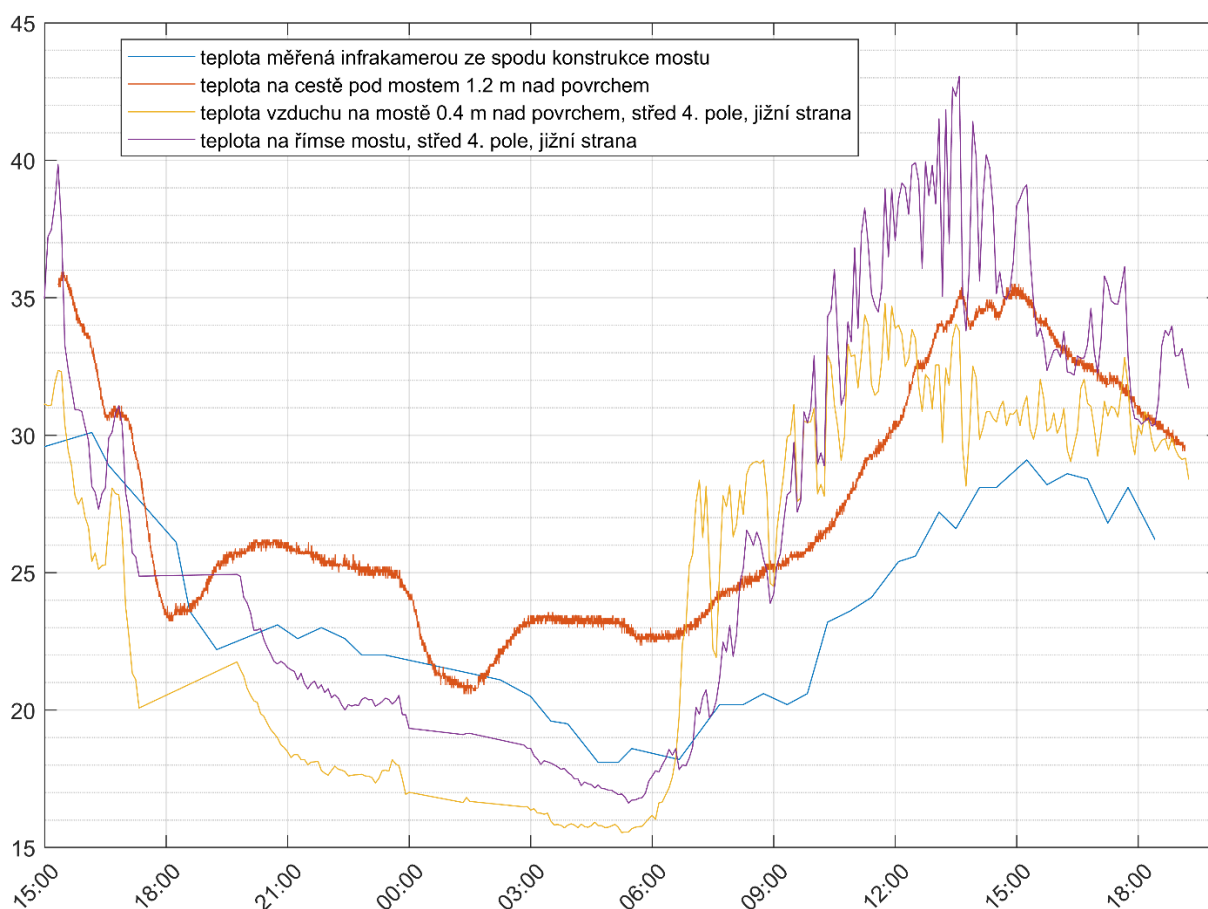
Obr. 3 – Dvojice koutových odražečů upevněných ve sledovaném bodu na vodorovné nosné konstrukci mostu

2. Podmínky během měření

Měření bylo provedeno od 26. 7. 2021 15:15 do 27. 7. 2021 19:00 za běžného silničního provozu. Během popisovaného experimentu dvakrát velmi silně pršelo a to v 17:10 až 17:50 a ve 23:50 až 1:00.

Tab. 1 – Klimatické podmínky během měření

Klimatické podmínky	
Teplota vzduchu pod mostem	18 – 35 °C
Vlhkost	40 – 95 %



Obr. 4 – Porovnání teplot vzduchu měřených na různých místech pod mostem

3. Použité měřické přístroje

Pro měření byly použity dva Radary IBIS výrobce IDS.

Konfigurace radaru R₁

IDS Radar IBIS – FS Plus,
SN 010-19-000314,

Antény: IBIS-ANT3-H17V15, záběr v horizontálním směru je 17° při ztrátě 3dB a 34° při ztrátě 10dB,
Akcelerometr sloužící k odstranění vibrací vlastního radaru.

Konfigurace radaru R₂

IDS Radar IBIS – RU 172

SN 053,

Antény: IBIS-ANT3-H17V15, záběr v horizontálním směru je 17° při ztrátě 3dB a 34° při ztrátě 10dB.

Během měření byly zaznamenávány klimatické podmínky na data logger LOG32TH a při části měření byl pořizován videozáznam provozu po komunikaci na mostě. Místní situace a postavení radarů bylo zaměřeno podrobným laserovým skenováním a následně byl zpracován 3D model zkoumaného mostního objektu.

Pro sledování stability polohy radarů byly na oba radary připevněny náklonoměry (viz obr. 5), které sledovaly změnu polohy radaru. Při měření nebyl zaznamenán větší posun (změna náklonu radaru), takže korekce měřených hodnot na základě údajů z náklonoměrů nebyly použity.



Obr. 5 – Náklonoměr umístěný na radaru

4. Rozmístění koutových odražečů

Před začátkem měření bylo rozmístěno na mostě 31 koutových odražečů na 16 místech (viz obr. 3 a obr. 6), tak aby byly dosažitelné pro měřicí signál z obou stanovisek radarů. Rozmístění odražečů po celé délce mostu nebylo možné, protože šíření měřicího signálu z radarů do obou krajních částí mostovky bránily mostní pilíře. Koutové odražeče byly připevněny k mostu pomocí tyče přichycené na svodidla a zároveň k zábradlí viz obr. 6. Po instalaci byly odražeče nasměrovány tak aby co nejlépe odrážely radarový signál.



Obr. 6 – Způsob přichycení koutových odražečů k mostu

5. Provedení měření

Dynamické měření vlivu teplotních či dalších změn na pohyby mostu probíhalo dvěma interferometrickými radary současně. Radar R_1 byl umístěn na západní straně mostu u paty mostního pilíře mezi 2. a 3. polem mostu přibližně v ose mostovky. Druhý radar R_2 byl postaven na východní straně mostu u paty pilíře mezi 4. a 5. polem mostu.

Vertikální náklon obou radarů byl určen experimentálně tak, aby byla pokryta maximální délka vodorovné nosné konstrukce mostu ve 3. a 4. poli mostu, a aby nedocházelo k významnému vzájemnému rušení radarového signálu.

Měření trvalo přibližně 28 hodin.

Nastavené parametry měření:

IDS Radar R₁

Frekvence snímání:	200 Hz,
Dosah signálu:	185,5 m,
Radiální rozlišení:	0,75 m,
Vertikální náklon radaru:	12,2°.

IDS Radar R₂

Frekvence snímání:	199,76 Hz,
Dosah signálu:	108,5 m,
Radiální rozlišení:	0,75 m,
Vertikální náklon radaru:	25,0°.



Obr. 7 – Pohled ve směru staniční mostu na 3. a 4. pole mostu ze stanoviska radaru R₁



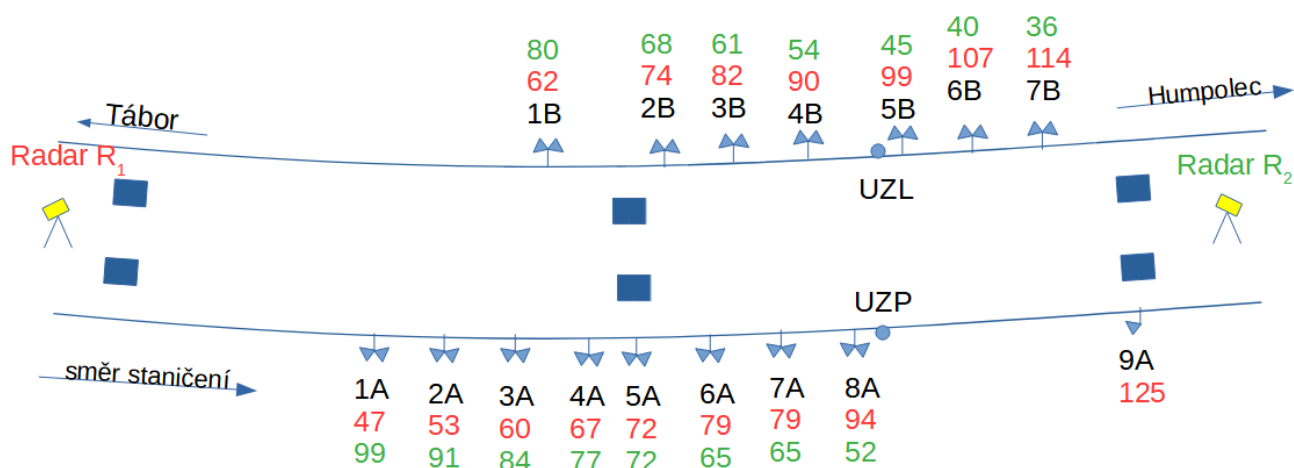
Obr. 8 – Pohled proti směru staničení na 4. pole mostu ze stanoviska radaru R_2



Obr. 9 – Pohled na radar R_1 vysílající měřicí signál ve směru staničení mostu



Obr. 10 – Pohled na radar R_2 vysílající měřicí signál proti směru staničení mostu



Obr. 11 – Schématický půdorys sledovaného mostu s vyznačenými stanovisky obou radarů a polohami použitých koutových odražečů (červená čísla jsou Rbiny radaru R_1 a zelená čísla jsou Rbiny radaru R_2)

Měření svislých průhybů mostovky v bodech 8A a 5B proběhlo současně technologií radarové interferometrie a standardními relativními snímači dráhy, které jsou v této zprávě označeny UZL a UZP (viz obr. 11). K měření svislých průhybů v bodech UZL a UZP byly použity dva LVDT snímače dráhy ISDL 50-KD-2405 vyrobené firmou Inelta Sensorsysteme s výrobními čísly 84801 (UZL)

a 84803 (UZP). Ve vztažných bodech pod konstrukcí mostu byly umístěny ocelové rámy (viz obr. 12), ve kterých byla upevněna těla snímačů dráhy. Jádru LVDT snímačů bylo na horním konci připojeno k verifikačním přípravkům a ty byly pomocí ocelové struny spojeny se sledovaným bodem na okraji mostovky. Systém ocelová struna - verifikační přípravek - jádro snímače byl předeprnut pružinou upevněnou druhým koncem na ocelovém rámu (viz obr. 12). Snímače byly připojeny k měřicí ústředně EMS Pohl.

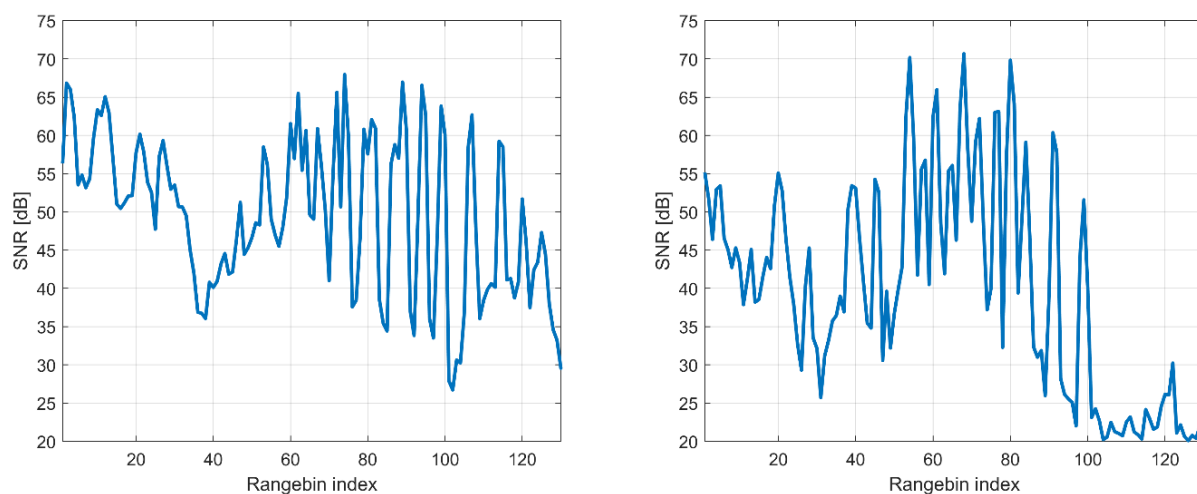
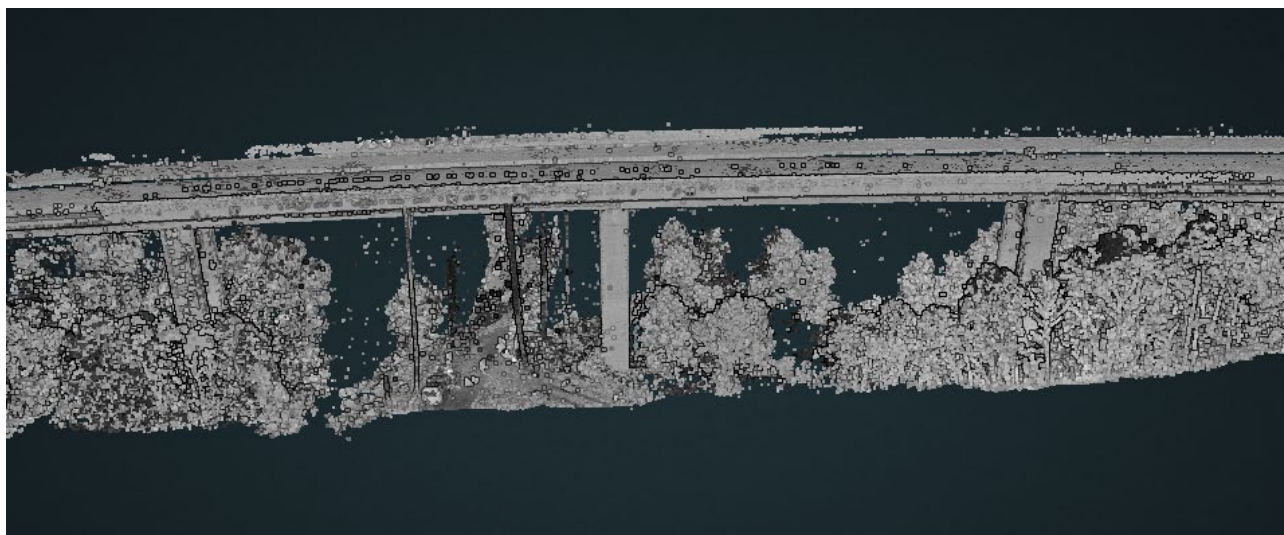
Před vlastním experimentem byla nastavená hodnota citlivosti použitých snímačů dráhy ověřena verifikačním přípravkem (viz obr. 12), kterým byl simulován svislý posun sledovaného bodu mostovky o přesně definovanou hodnotu velikosti zhruba 10 mm, a následně byla citlivost upravena tak, aby snímačem měřený údaj odpovídal verifikační hodnotě.



Obr. 12 – Ocelový rám s upevněným LVDT snímačem dráhy ISDL 80-KD-2405 ve vztažném bodu pod mostem pro měření svislého průhybu v bodu UZL

6. Vyhodnocení

Data naměřená metodou radarové interferometrie byla zpracována v programu IBIS Data Viewer ver. 03.05.002. Na profilech odrazivosti obou radarů (viz obr. 13) byla vybrána maxima, která odpovídají poloze koutových odražečů.

Obr. 13 – Profily odrazivosti signálů radarů R_1 a R_2 

Obr. 14 – 3D model mostu

č. b.	R_1 Rbin	R_1 SNR [dB]	R_2 Rbin	R_2 SNR [dB]
1A	47	51.2	99	51.6
2A	53	58.5	91	60.4
3A	60	61.5	84	59.1
4A	67	60.9	77	63.1
5A	72	65.6	72	62.2
6A	79	60.8	65	56.1
7A	87	58.8	58	56.8
8A	94	66.6	52	42.8
9A	125	47.3		
1B	62	65.5	80	69.8
2B	74	68.0	68	70.7

3B	82	60.9	61	66.0
4B	90	60.7	54	70.2
5B	99	63.8	45	54.3
6B	107	62.7	40	53.1
7B	114	59.2	36	39.0

Tab. 2 – Rbiny připadající na jednotlivé koutové odražeče (červeně zvýrazněné jsou odražeče s nekvalitními výsledky, které nebylo možné při vyhodnocení experimentu použít)

Posuny jednotlivých sledovaných bodů mostovky naměřené radary na koutových odražečích pak byly vyexportovány a vyhodnoceny v programu Matlab.

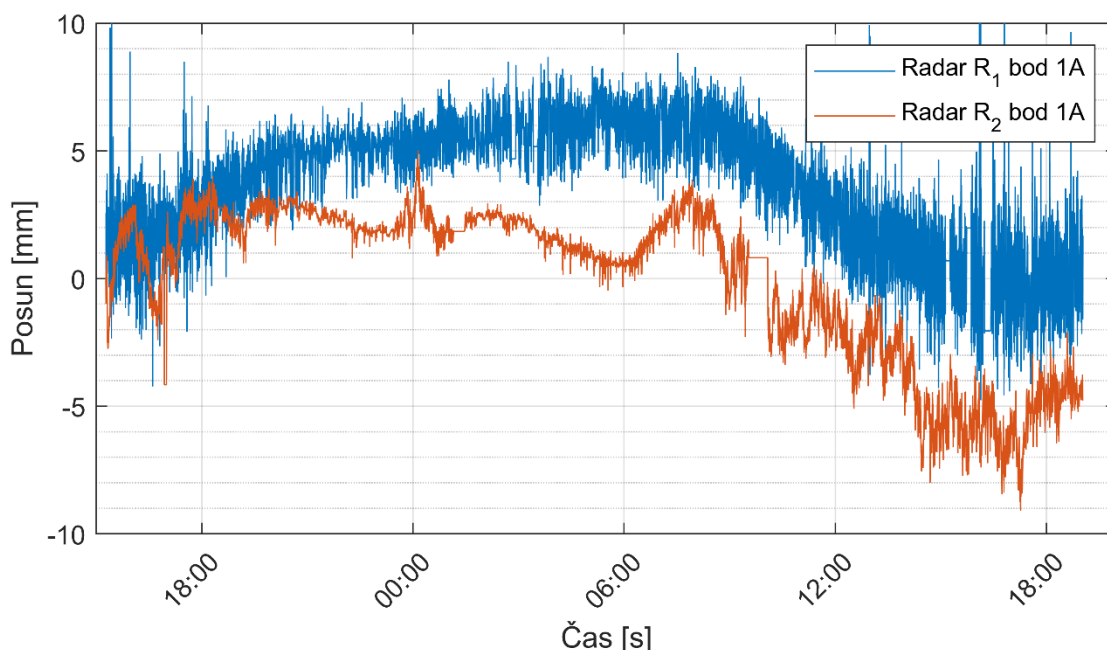
Změny teploty zkoumaného mostu během časového intervalu jeho sledování vyvolaly změnu svislého průhybu (rozdíl mezi maximální a minimální zachycenou kvazistatickou hodnotou svislého průhybu) mostu 7,4 mm (v bodu UZL) a 7,2 mm (v bodu UZP).

Podélné posuny mostu vypočtené ze společného měření obou radarů jsou do 1,5 mm.

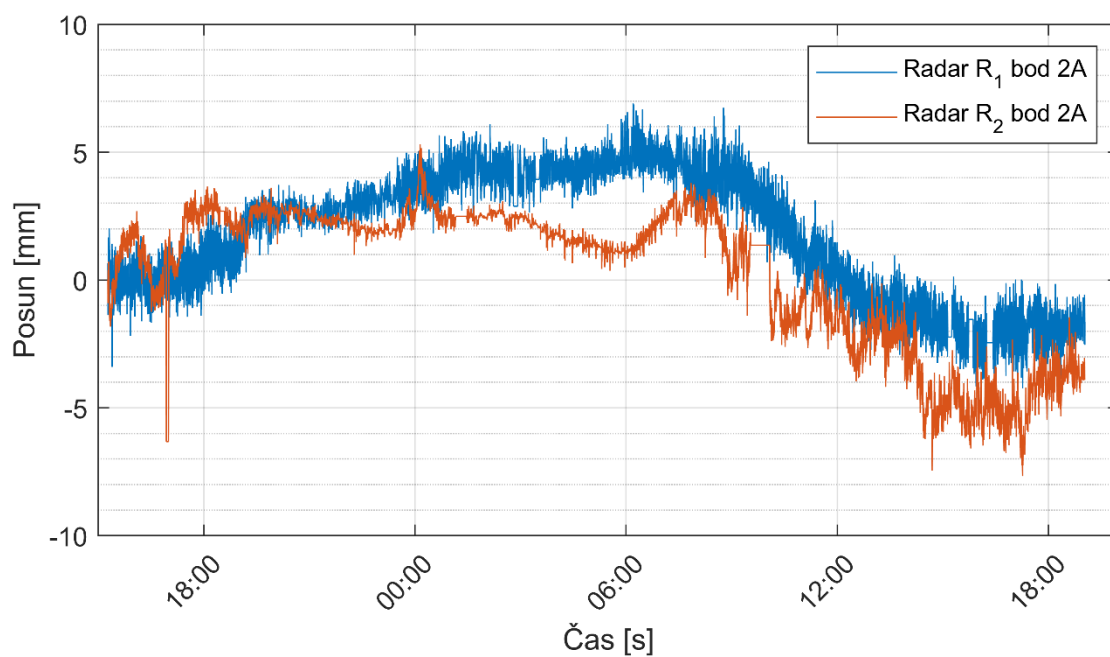
Na obrázcích 15 až 27 je vždy zobrazeno porovnání svislých průhybů měřených nezávisle zvlášť radary R1 a R2 v příslušných bodech. Na většině těchto obrázků je vidět především u radaru R2 výrazná odchylka zaznamenaná mezi 0:00h až 1:00h, která byla zřejmě způsobená velmi silným deštěm, který zcela jistě měl vliv na šíření radarového signálu a dále mohl mít vliv na stabilitu některých koutových odražečů hlavně na jižní straně mostu odkud v tu dobu vál velmi silný vítr.

Na obrázcích 28 až 31 jsou vždy zobrazeny výsledné svislé průhyby nebo podélné posuny vypočtené kombinací z měření obou radarů.

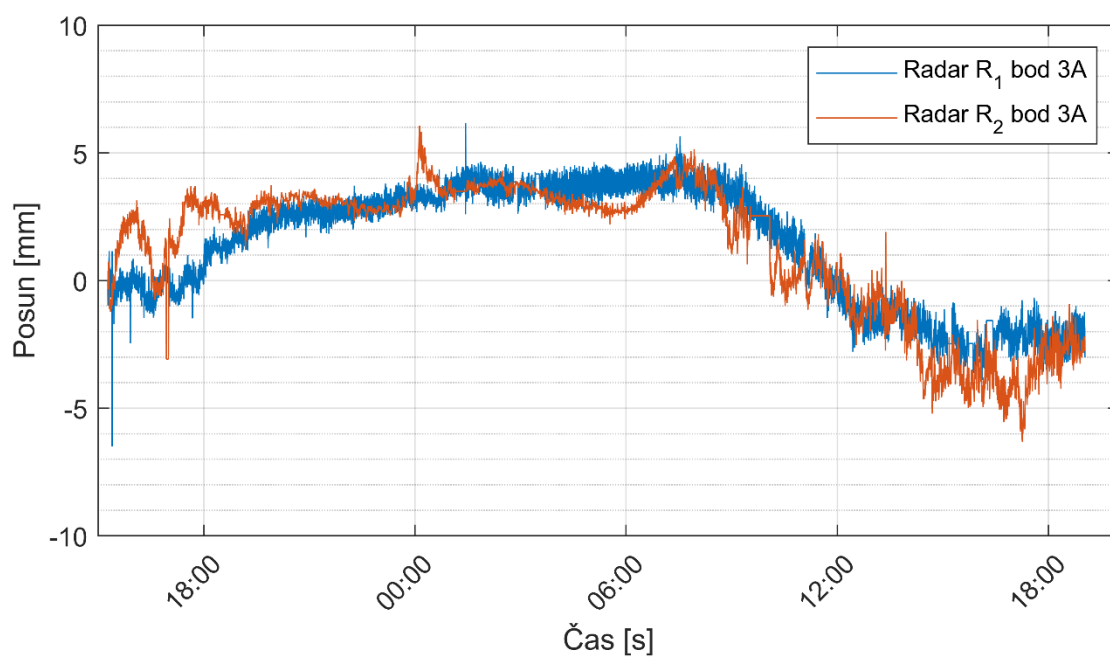
Na obrázcích 32 až 34 je zobrazeno porovnání svislých průhybů získaných pomocí radarového měření s výsledky získanými z relativních snímačů dráhy.



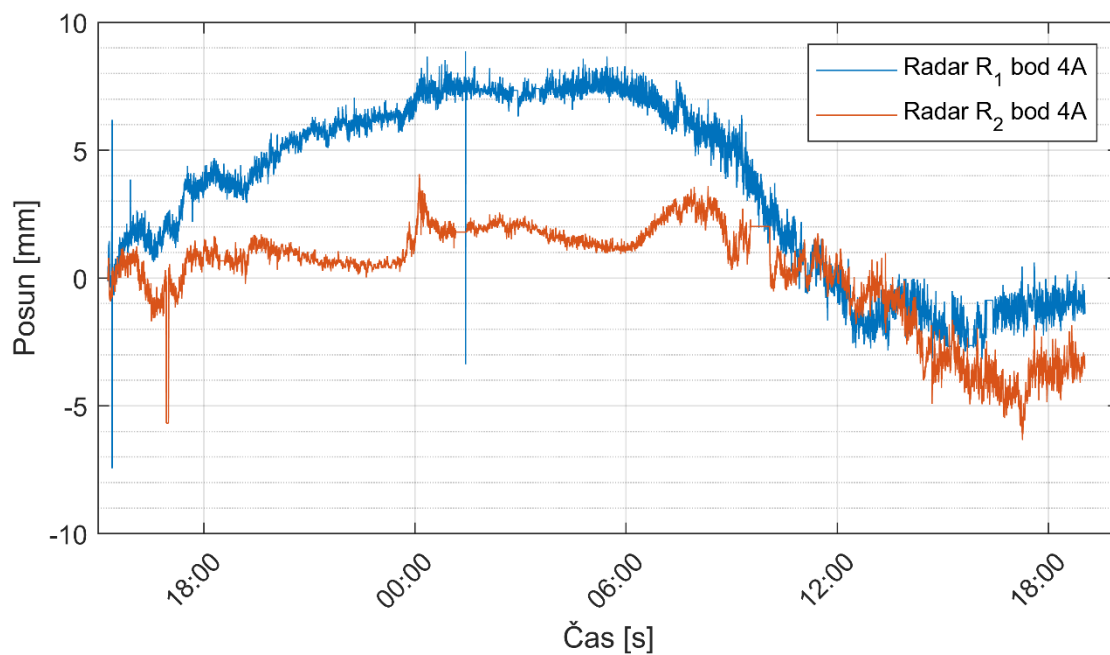
Obr. 15 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 1A



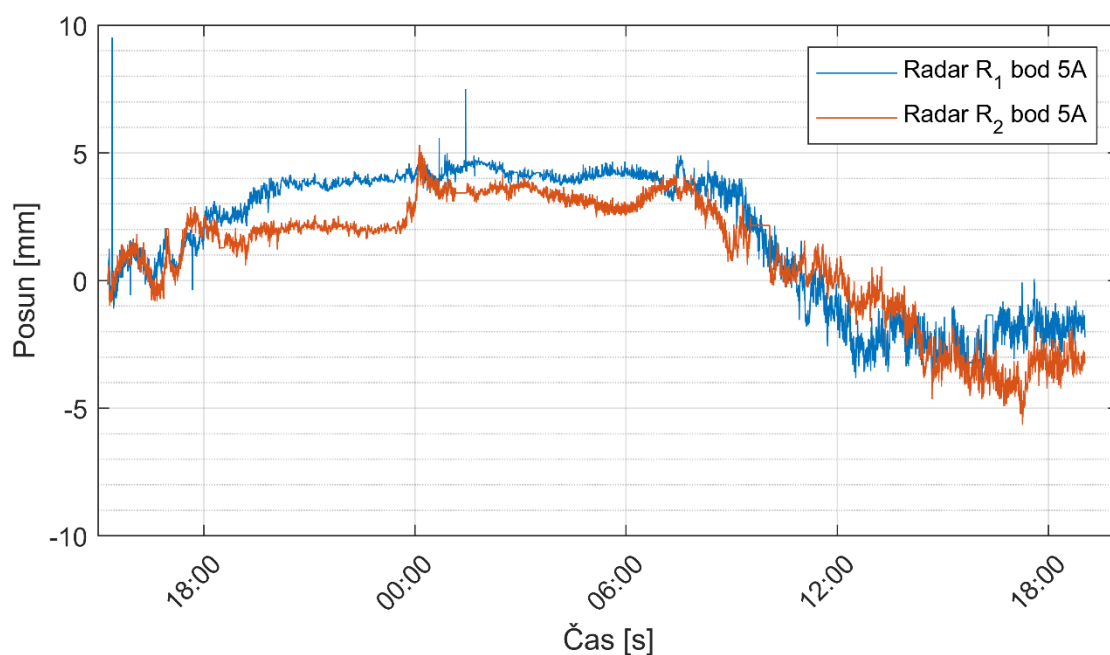
Obr. 16 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R₁ a R₂ v bodu 2A



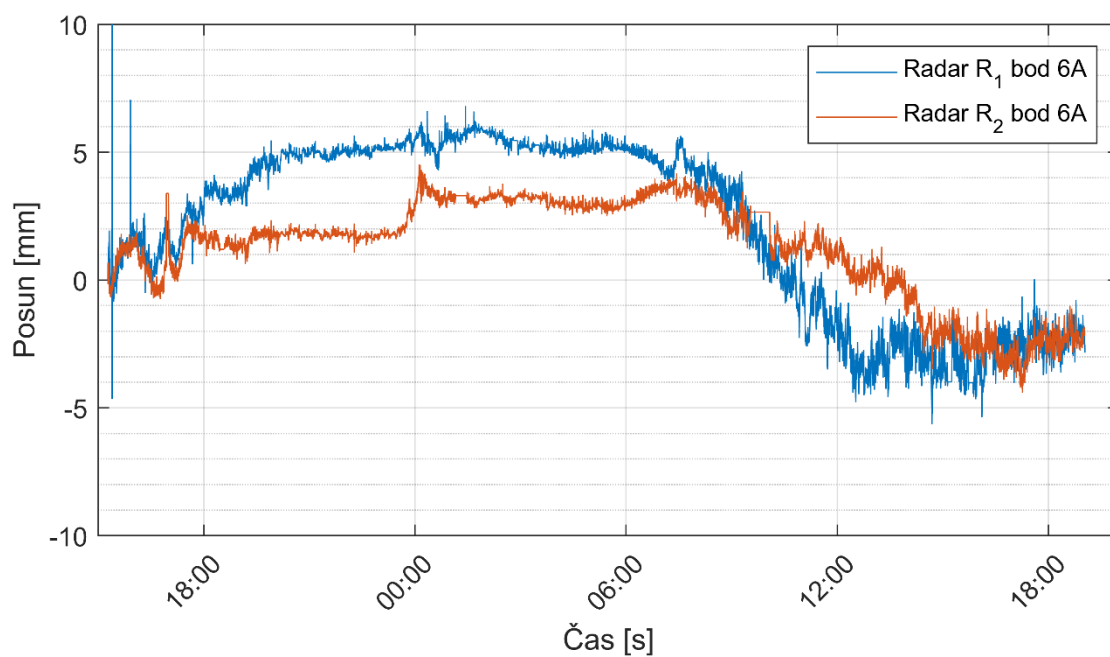
Obr. 17 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R₁ a R₂ v bodu 3A



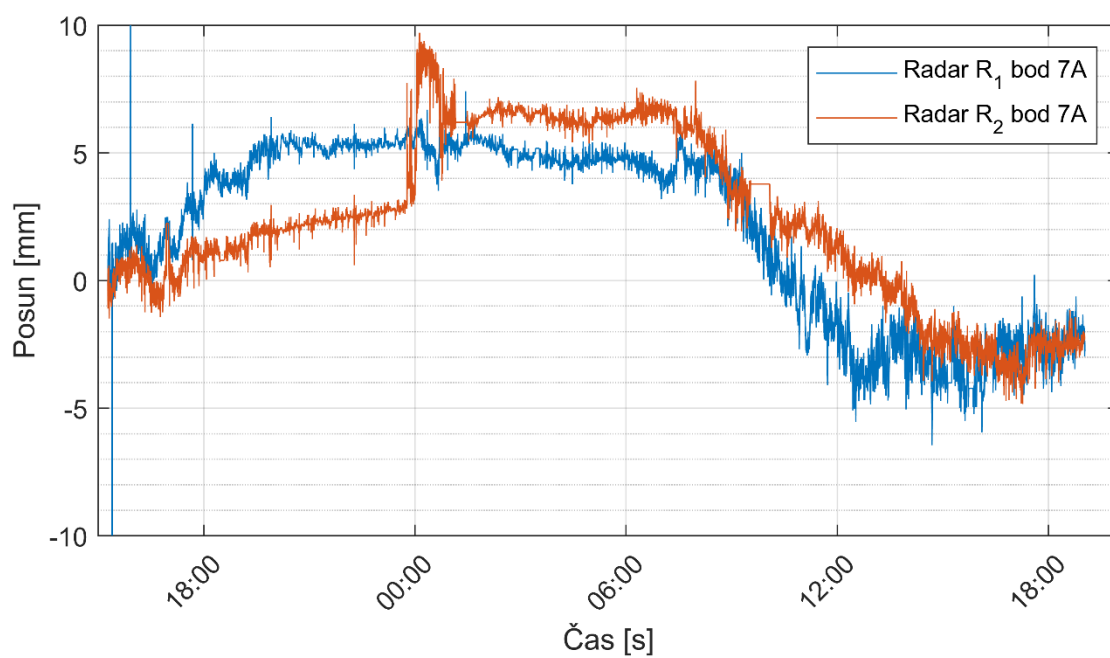
Obr. 18 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 4A



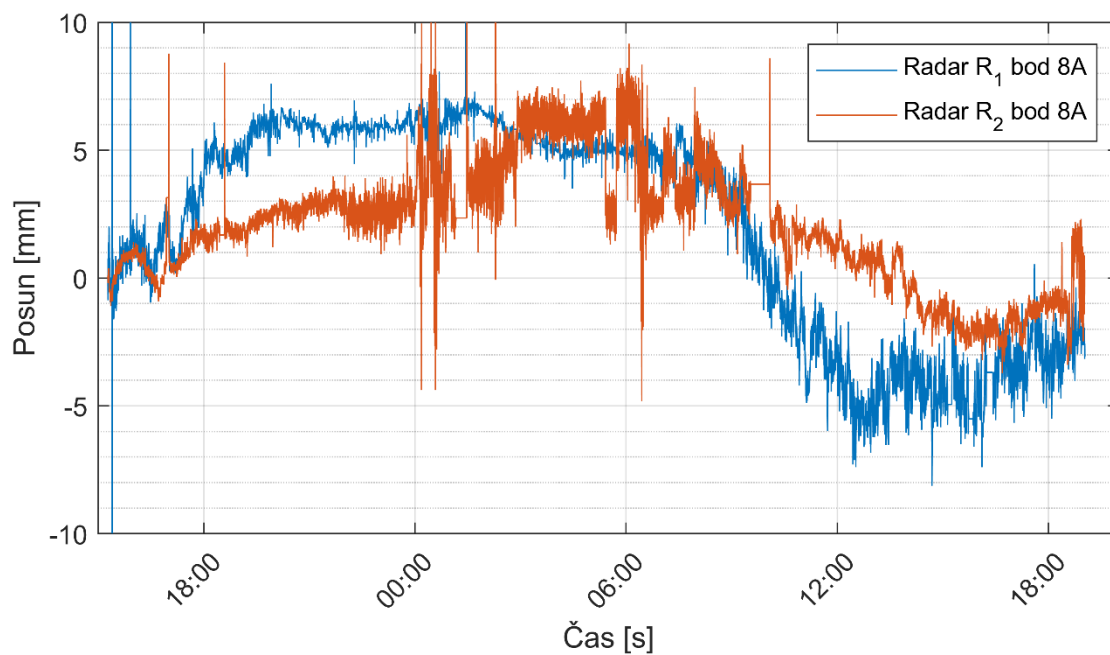
Obr. 19 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 5A



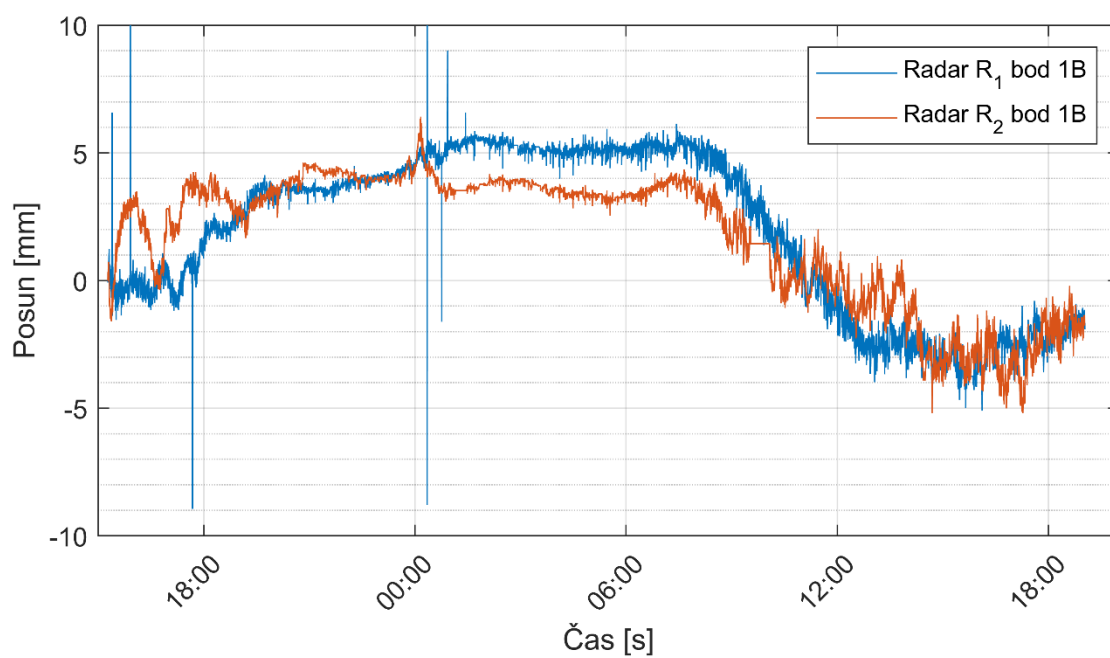
Obr. 20 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 6A



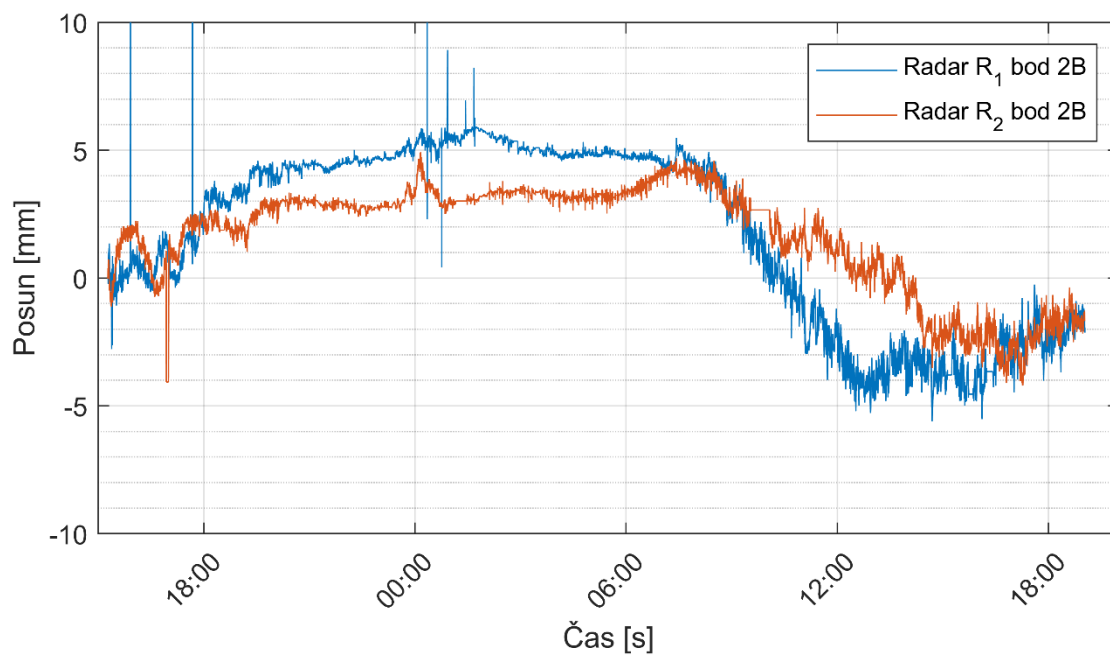
Obr. 21 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 7A



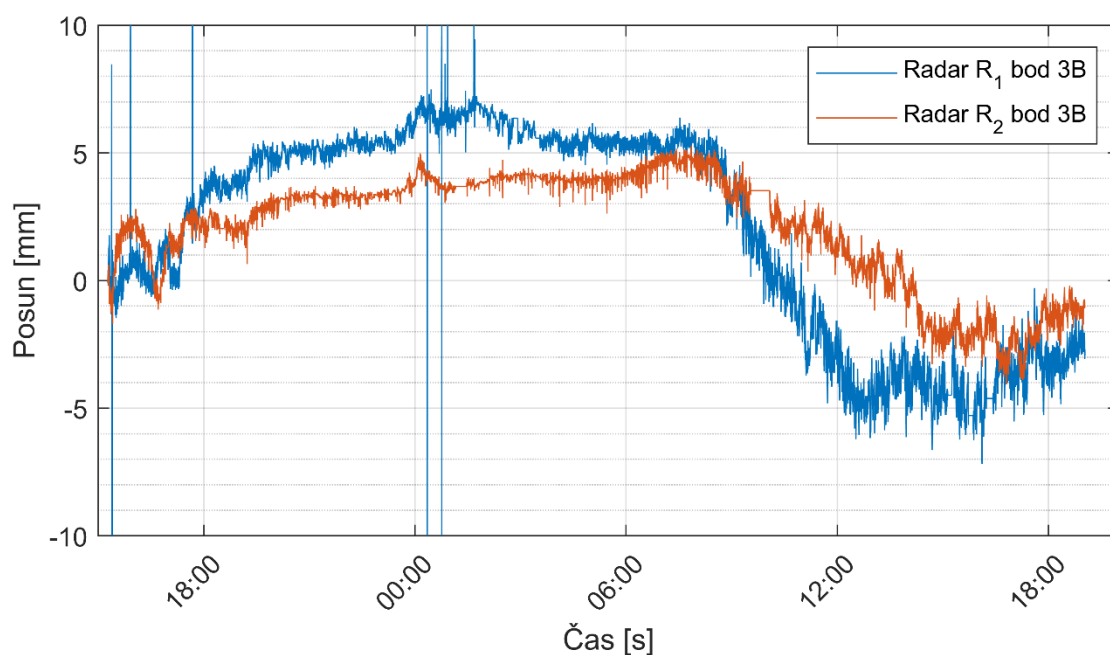
Obr. 22 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 8A



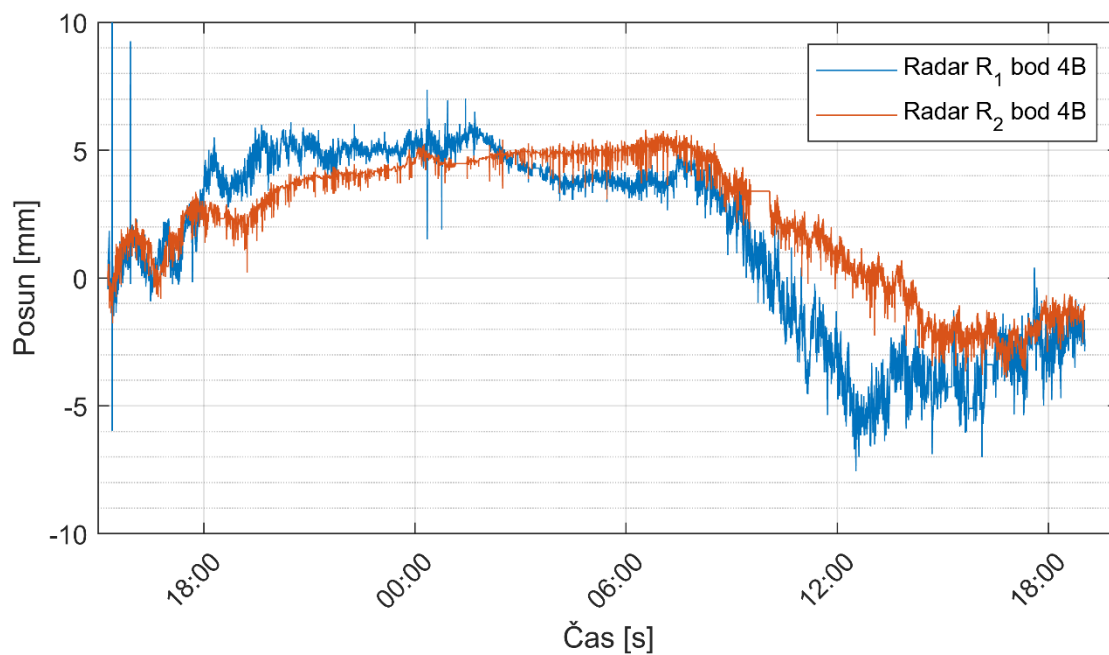
Obr. 23 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 1B



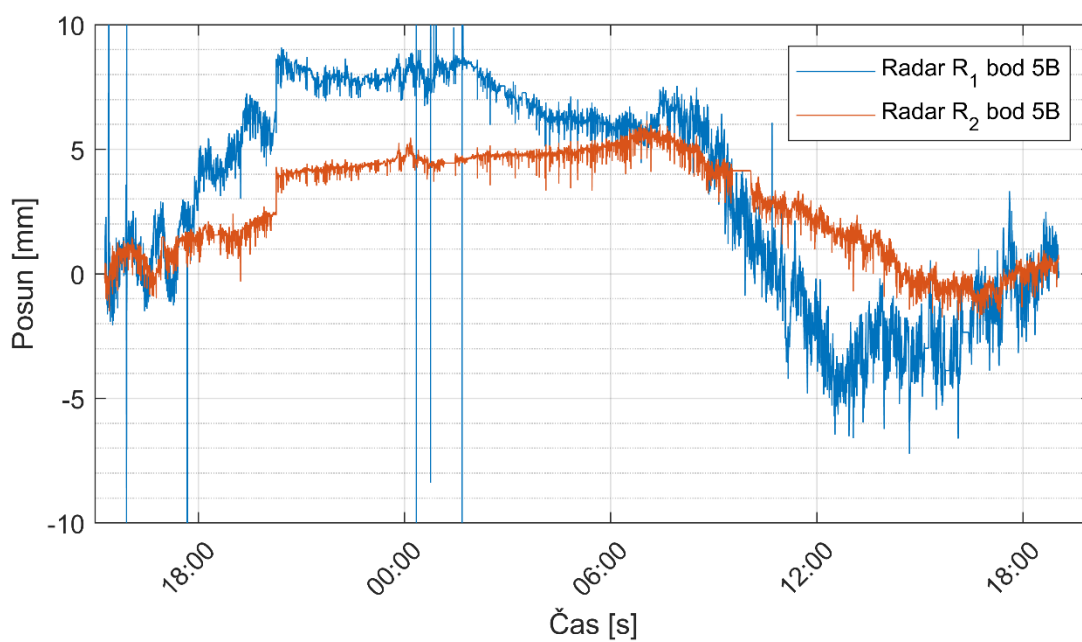
Obr. 24 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 2B



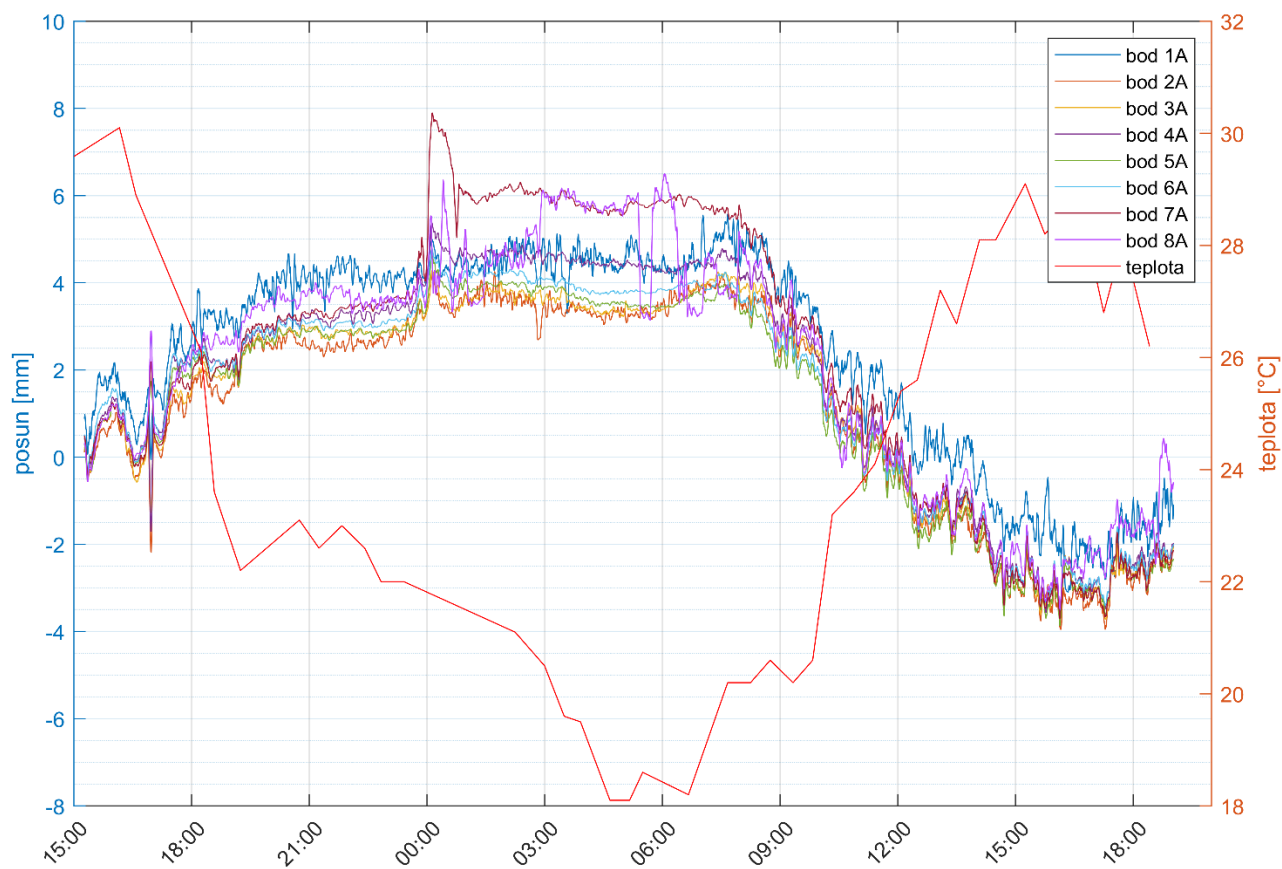
Obr. 25 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 3B



Obr. 26 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 4B



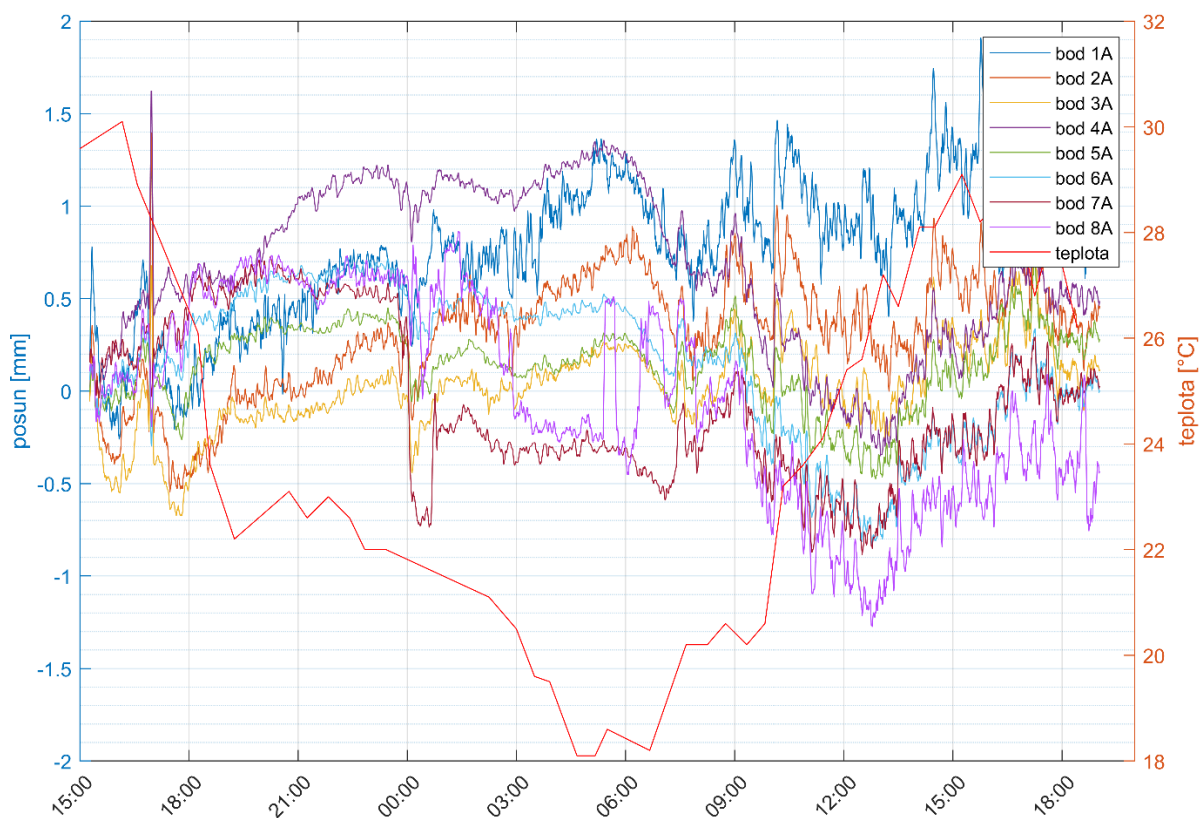
Obr. 27 – Porovnání svislých průhybů měřených zvlášť radarem R1 a R2 v bodu 5B



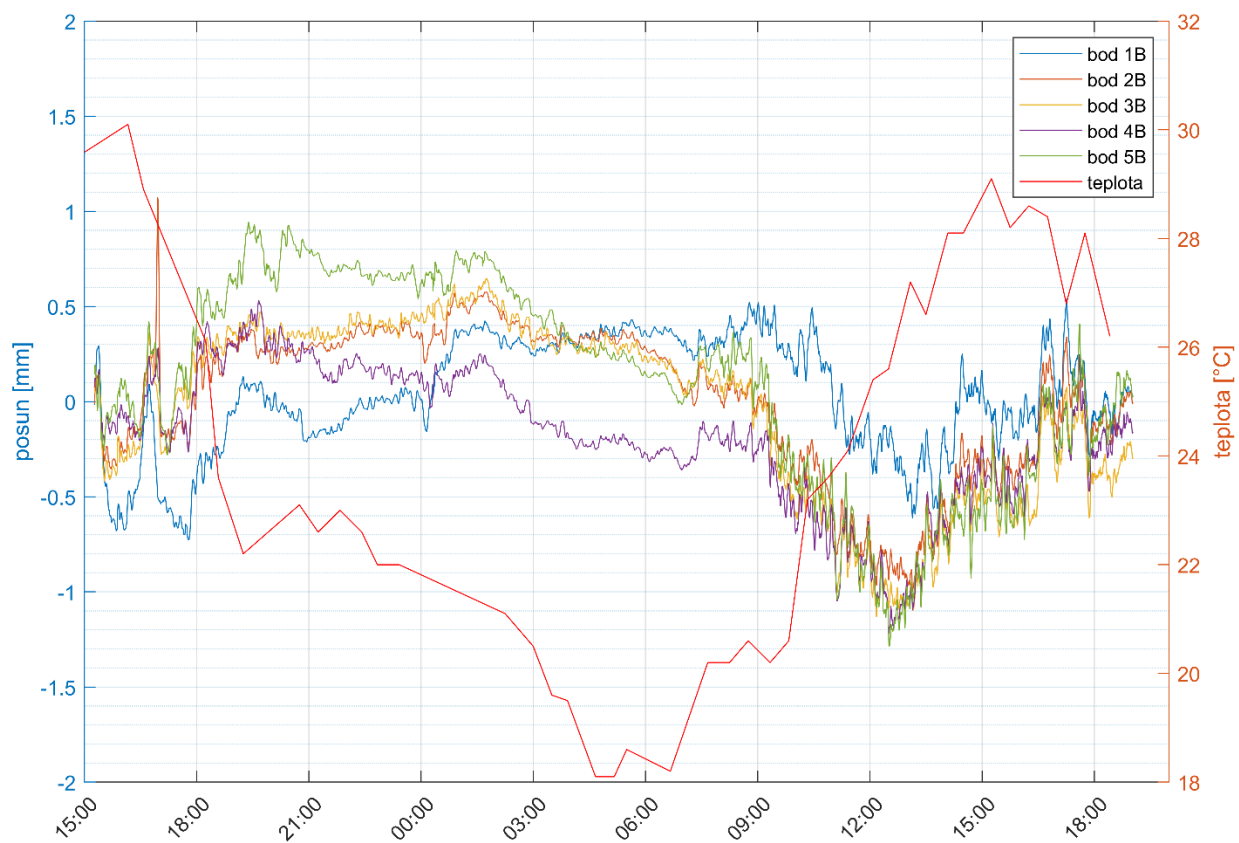
Obr. 28 – Svislé průhyby naměřené na jižní straně mostovky (na pravé straně při pohledu ve směru staničení mostu, respektive na vnější straně směrového oblouku) vypočtené kombinací měření obou radarů (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)



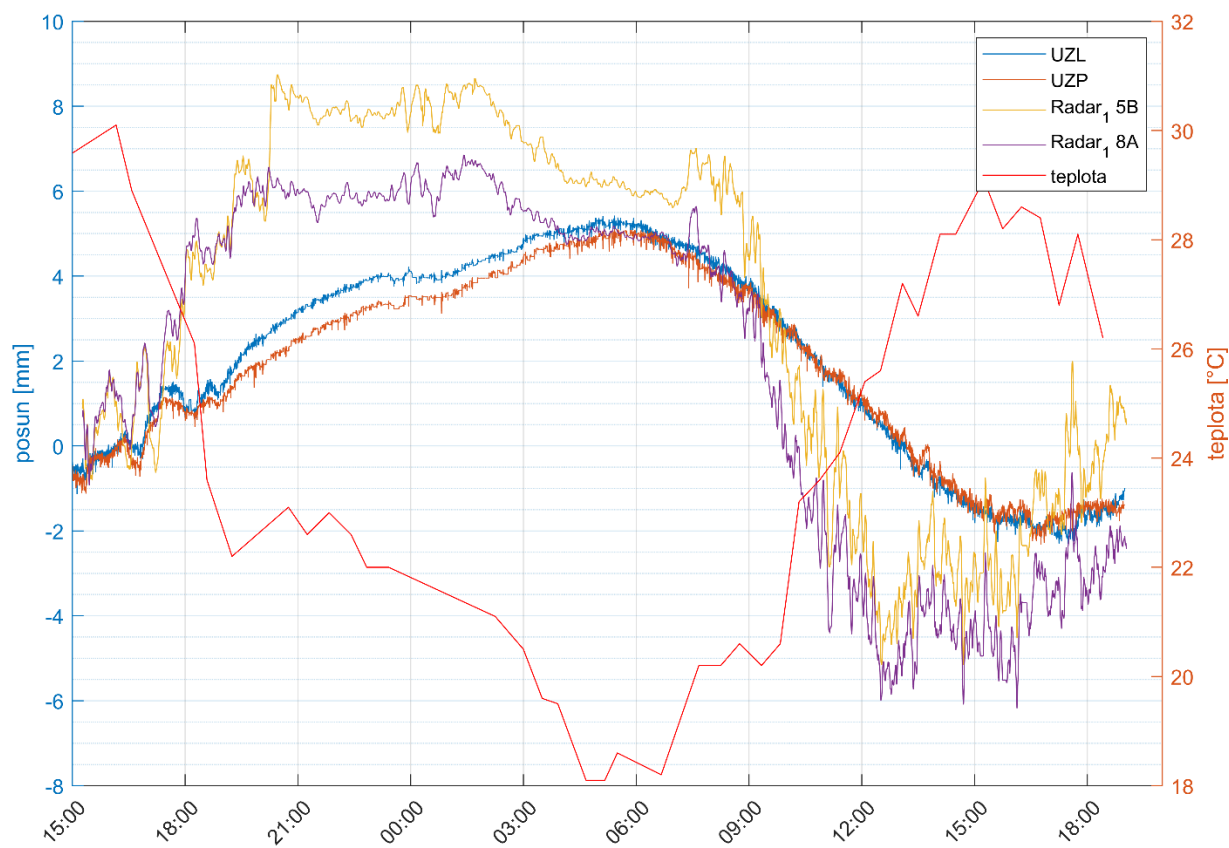
Obr. 29 – Svislé průhyby naměřené na severní straně mostovky (na levé straně při pohledu ve směru staničení mostu, respektive na vnitřní straně směrového oblouku) vypočtené kombinací měření obou radarů (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)



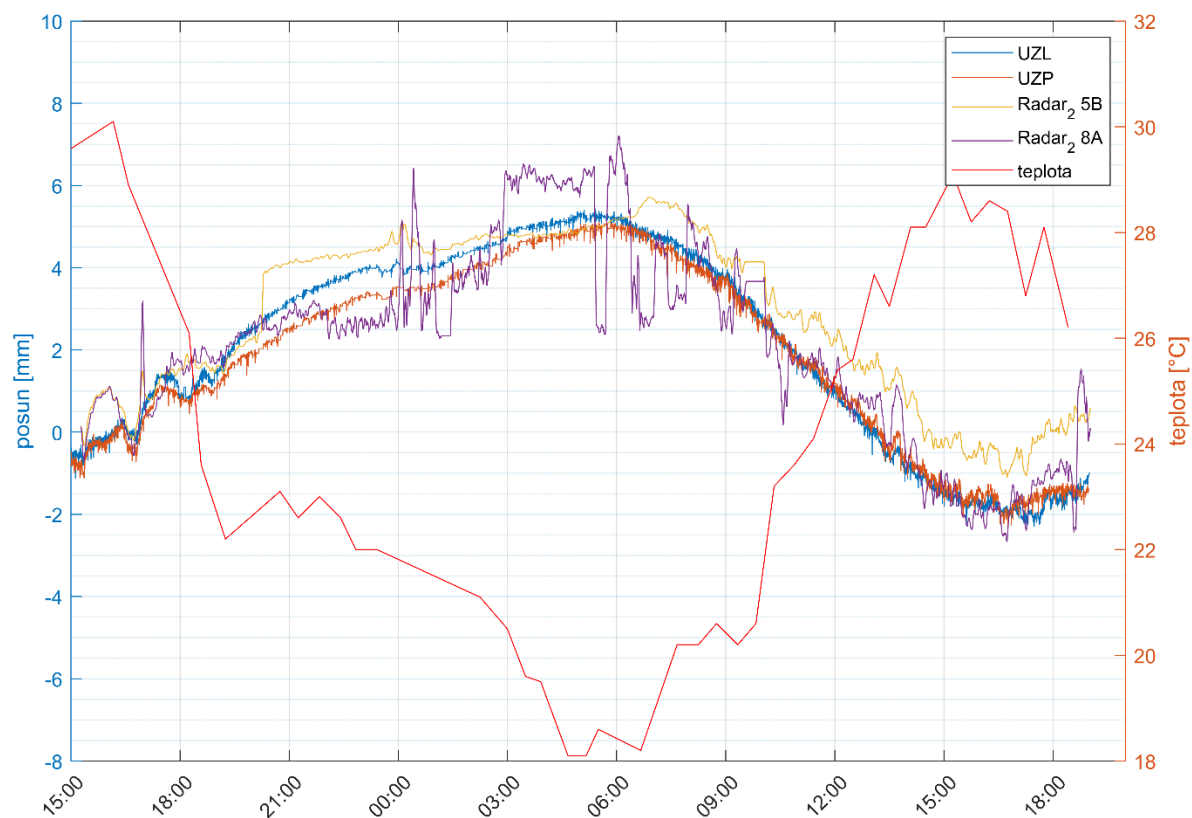
Obr. 30 – Podélné posuny naměřené na jižní straně mostovky (na pravé straně při pohledu ve směru staničení mostu, respektive na vnější straně směrového oblouku) vypočtené kombinací měření obou radarů (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)



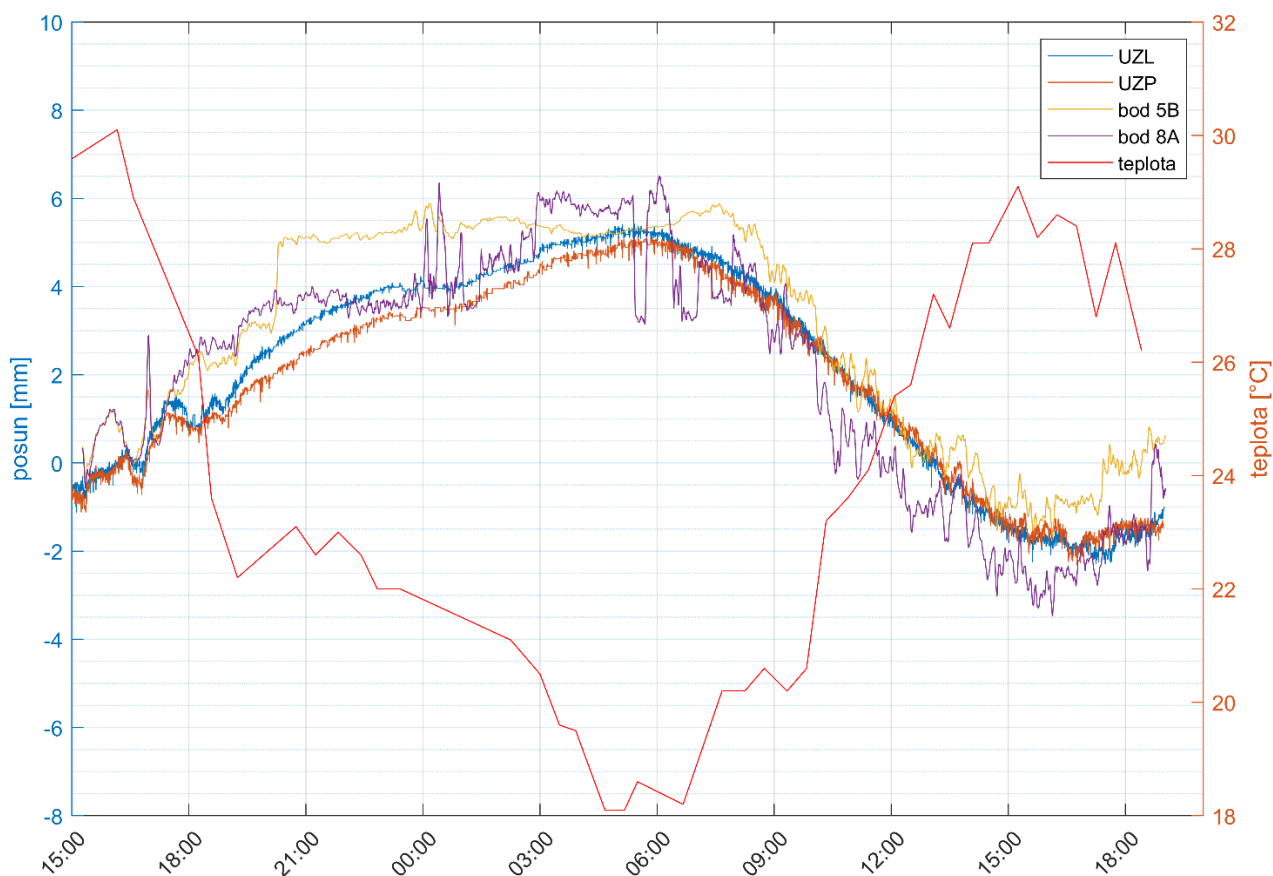
Obr. 31 – Podélné posuny naměřené na severní straně mostu vypočtené kombinací měření obou radarů (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)



Obr. 32 – Porovnání svislých průhybů vyhodnocených z naměřených dat radarem R1 (v bodech 5B a 8A) a relativními snímači dráhy (v bodech UZL a UZP) (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)



Obr. 33 – Porovnání svislých průhybů vyhodnocených z naměřených dat radarem R2 (v bodech 5B a 8A) a relativními snímači dráhy (v bodech UZL a UZP) (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)



Obr. 34 – Porovnání svislých průhybů vypočtené kombinací měření obou radarů (v bodech 5B a 8A) a relativními snímači dráhy (v bodech UZL a UZP) (pro lepší čitelnost grafu byl pro zobrazení měření použit klouzavý průměr)

7. Závěr

Závěr z provedeného ověřovacího měření na silničním mostě u Pelhřimova: výsledky měření realizovaného pomocí technologie radarové interferometrie se v rámci jejich dosažené přesnosti shodují s výsledky měření provedeného relativními snímači dráhy. Svislé průhyby vyhodnocené z měření oběma metodami lze porovnat na obrázcích 32 až 34. Vzniklé větší odchylky lze přičíst především nepřízní počasí během měření, kdy dvě silné bouřky doprovázené silným deštěm a větrem velmi výrazně ovlivnily prostředí pro šíření signálu radarů a tím i výsledky měření. Lze proto konstatovat, že technologie radarové interferometrie byla v praxi ověřena a je vhodná pro určování vlivu teplotních či dalších změn na pohyby mostních konstrukcí.



Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s.

Řásnovka 770/8, Staré Město, 110 00 Praha 1
IČ: 03447286

PROTOKOL

o ověření technologie

Název technologie: Technologie určování vlivu teplotních či dalších změn na pohyby mostních konstrukcí současně v podélném i svislém směru pozemní radarovou interferometrií

Řešitel: Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, veřejná výzkumná instituce
(ÚTIA AV ČR, v. v. i.)
Pod Vodárenskou věží 4,
182 08 Praha 8
IČ: 67985556

Výše uvedená technologie je hlavním aplikačním výsledkem č. V2 projektu: „*Pokročilá technologie rychlého určování deformací mostů radarovou interferometrií a její využití v diagnostice*“, ev. č. VI20192022167, jehož je Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. reprezentativním uživatelem výsledků (aplikačním garantem). Technologie byla ověřena a byla prokázána její realizovatelnost a uplatnitelnost v oblasti působnosti Technické správy komunikací hl. m. Prahy, a.s. .

Osoba odpovědná za správnost protokolu:

Dne: 21. prosince 2021

Ing. Josef Richtr

Místopředseda představenstva

TECH. SPRÁVA KOMUNIKACÍ
hl. m. PRAHY, a.s.
110 00 Praha 1, Řásnovka 770/8
oddělení správy mostů
-2-