



Validace InSAR na trati 140 v úseku Hájek - Dalovice

Srovnání výsledků z mapování pohybů metodou InSAR a geodetických měření

Autoři: Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D., Mgr. Jan Kolomazník, Ing. Juraj Struhár (Gisat s.r.o.)

Datum: 15.9.2022

Verze: 1.0

1. Motivace, data k porovnání

Cílem aktivity je posoudit přesnost InSAR měření oproti trigonometrickým či nivelačním měřením prováděným na trati.

Pro posouzení byly SŽG poskytnuty technické zprávy vč. naměřených dat (v přílohách) [0-4]:

- trigonometrická měření kolejí, každá kolej samostatně (sm. odchylka cca 8-9 mm [5], 4,2 mm pro rozdíl dvou etap [0,1,2])
- nivelační měření stožárů (sm. odchylka 2,1 mm pro rozdíl dvou etap [1, 2, 5])

Trigonometrické měření bylo prováděno z volných stanovisek určených protínáním zpět [5], tj. při zobrazení s podrobnou škálou jsou rozdíly v posunech na navazujících úsecích.

U trigonometrických měření posuzujeme z důvodu přímé srovnatelnosti pouze výšku koleje ("Vka").

Geodetické měření bylo provedeno v následujících etapách:

- etapa 0: 20.4. 2021
- etapa 1: 21.7. 2021 (3 měsíce)
- etapa 2: 8.10. 2021 (2,5 měsíce)
- etapa 3: 14.1. 2022 (3 měsíce)
- etapa 4: 1.4. 2022 (2,5 měsíce)

Ihned po 2. etapě bylo provedeno podbití kolejí na úseku trati Dalovice-Hájek.

InSAR měření jsou v čase relativní, je tedy zapotřebí je vztáhnout k určitému časovému okamžiku. Navíc jsou InSAR měření ovlivněna šumem a typicky se neuvažují jednotlivé naměřené hodnoty posunů, ale spíše dlouhodobý trend (rychlost posunu, celkový kumulativní posun). InSAR měření z družice Sentinel-1 byly zpracovány pro období duben 2015 - říjen 2021, výsledná časová řada tedy končí v okamžiku podbití kolejí po etapě 2.

InSAR měření se z důvodu podbití kolejí nebudou doplňovat o pozdější měření, protože by došlo k jejich dekorelaci ("kontaminaci") podbitím.

InSAR zpracování bylo provedeno ze 4 satelitních drah (2 vzestupné s pohledem ze západu, 2 sestupné s pohledem z východu), a to plošně. Body vzdálené více než 20 m od osy trati (mezi kolejnicemi) byly ze zpracování vyloučeny. InSAR měření jsou v šikmém směru (směr od družice k danému bodu, dále jen LOS (line of sight)) a odhad směru pohybu lze provést jen částečně a jen tam, kde jsou k dispozici měření s více směrů (alespoň 1 bod ze sestupné a 1 bod ze vzestupné dráhy). Přepočtení měření do jiného směru je možný jen při znalosti skutečného směru pohybu (v oblasti Dalovic nelze aplikovat).

Odhad směru pohybu (tzv. rozklad do směrů, dekompozice) se provádí pouze do vertikálního a východozápadního směru. Vzhledem k nízkým citlivostem InSAR metody k pohybům v severojižním směru se případná složka pohybu v tomto směru zanedbává¹.

¹ Zanedbání severojižní složky vede k vychýlenému odhadu vertikální složky, a to cca o 20 % skutečné severojižní složky pohybu.

2. Postup validace

2.1 Trigonometrické měření kolejí (příloha 3 geodetické zprávy) - příprava dat

- výběr bodů (byly použity pouze body, pro které jsou k dispozici měření pro etapy 0,1 či 1,2), a zaokrouhlení staničení na 0,1 m; finální počet bodů pro každou kolej byl vyšší než 1000
- převod staničení na geografické souřadnice, sloučení měření z obou kolejí do jednoho datasetu
- výpočet rozdílů mezi etapami 0, 1 a 1, 2 (pohyb za 3 měsíce)
- průměrování těchto dvou rozdílů za účelem zvýšení přesnosti trigonometrického měření (volná stanoviště jsou při každém měření jiná, přesnost by tedy měla být nezávislá)². Předpoklad: konstantní rychlost pohybu v období mezi etapami 0, 2

2.2 InSAR měření - příprava dat

- aproximace celého období křivkou po částech lineární (minimální délka úseku 270 dnů), odhad neplatných časových segmentů (vyloučení na základě vysokého šumu), odhad posunu za období mezi etapami 0,1 a 1,2 (pro většinu bodů jsou tyto hodnoty identické, protože spadají do stejné části křivky). Tuto aproximaci dále nazýváme modelem
- rozdělení oblasti kolejí do buněk (vždy celá oblast kolejí na šířku, délka buňky 30 m, vždy se překrývají 3 buňky s odstupem 10 m)³. Neuvažuje se, které body náleží přímo kolejím a které stožárům (špatná rozpoznatelnost) či jiným objektům⁴
- pro každou buňku, do které spadá alespoň 1 bod ze sestupné dráhy, a alespoň 1 bod ze vzestupné dráhy, je proveden rozklad (dále dekompozice či COMPO) pohybu do vertikálního a východozápadního směru (se zanedbáním pohybu v severojižním směru). Do dekompozice vstupují modelové hodnoty posunů (úseky jsou obecně jiné pro každý bod, který do dekompozice vstupuje). Dále jsou uvažovány pouze vertikální pohyby. Poloha výsledných bodů je dána jako střed dané buňky (vzájemná závislost sousedních bodů se neuvažuje).

² Pokud bychom chtěli přesnost dále zvýšit, je možno přidat do průměru rozdíl mezi etapami 3,4. Zde je ale už menší pravděpodobnost toho, že rychlosti v tomto období jsou stejné jako v dřívějším období.

³ Vzhledem k lokálnosti pohybů nedoporučujeme větší buňky, protože lokální pohyby by mohly zaniknout při průměrování s ostatními body. Vzhledem k rozlišení družice a zastínění stromy (především plošší dráhy 95, 44) nedoporučujeme menší buňky, protože by v nich nebyl dostatečný počet bodů. Překryv buněk vede k tomu, že sousední buňky na sobě nejsou nezávislé. Volíme ho z důvodu robustnosti výsledků (pokud by byly např. dva body blízko sebe, ale v odlišných buňkách, bez překryvu by nebyl výsledek v žádné buňce).

⁴ Na základě analýzy bylo zjištěno, že téměř po celé délce trati se signál odráží jak od kolejnic (žel. svršku), tak od sloupů RV. Nicméně v místech, kde je trať rovnoběžná s radarovým paprskem (cca 10 stupňů od východozápadního směru), ve výsledcích z příslušné dráhy (A nebo D) dominují odrazy od sloupů RTV. Tento "hluchý úhel" bez odrazů od svršku je široký cca 10-15 stupňů.



2.3 Nivelační měření na sloupech RTV (přílohy 2, 5 geodetické zprávy) - příprava dat

- převod všech etap do jednoho datasetu a odečet měřených hodnot Z, vyloučení zničených a poškozených bodů

2.4 Srovnání InSAR a trigonometrického měření

- v 30m okolí každého InSAR měření nalezeny všechny InSAR body a všechny trigonometricky měřené body na kolejích
- z těchto bodů je spočten průměrný posun
- sm.odchylka tohoto průměrného posunu odvozena z a-priorních směrodatných odchylek (zvlášť pro trigonometrická a InSAR měření)
- testujeme nulovou hypotézu o shodě průměrů (dvouvýběrový t-test)

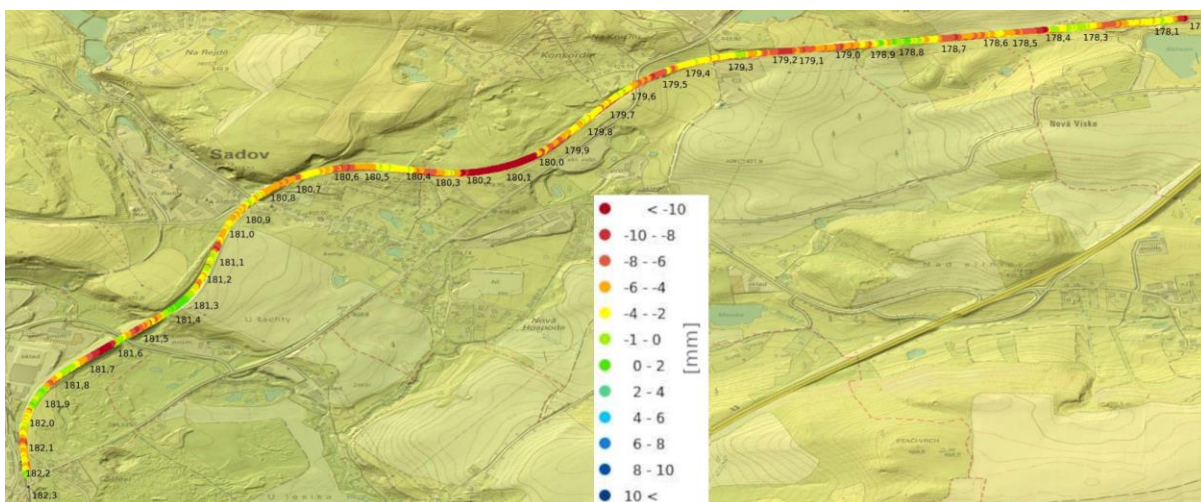
2.5 Srovnání InSAR a nivelačního měření na sloupech RTV

- nivelační měření: nenulové hodnoty posunů byly naměřeny pouze na sloupech RTV v rekonstruovaném úseku (Dalovice)
- v případě měření pomocí senzoru středního rozlišení na družici Sentinel-1 nelze ve výsledcích z InSAR jednoznačně rozlišit signál odrazů od železničního svršku a od sloupů RTV či dalšího příslušenství; pohyby jsou detekovány i na jiných úsecích trati
- nivelační měření na pravém a levém sloupu RTV byla před porovnáním zprůměrována
- je k nim přiřazen nejbližší InSAR dekomponovaný bod (body odpovídají středu buňky, proto jsou v pravidelných rozestupech a na ose kolejiště)

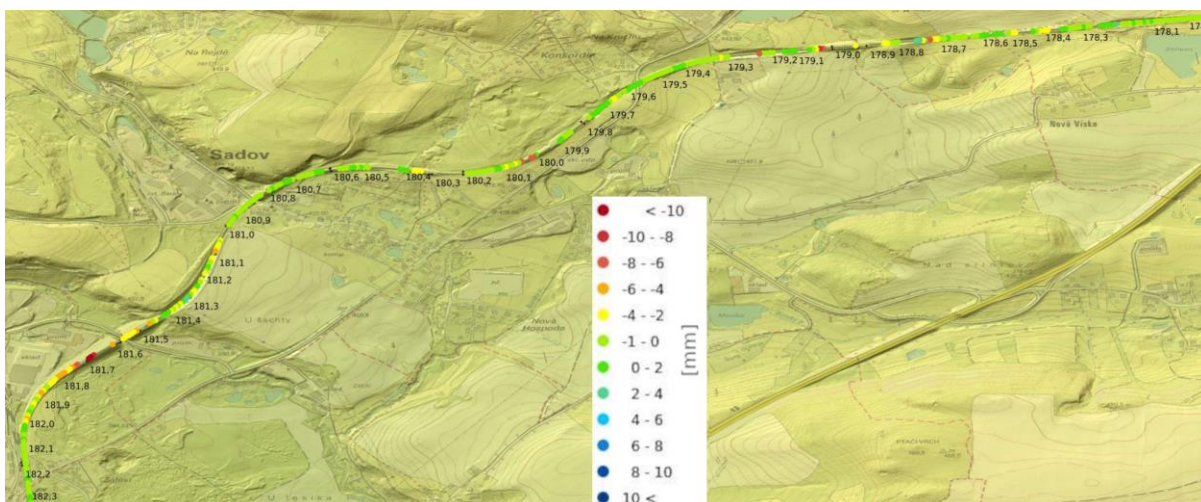
3. Výsledky

3.1 srovnání InSAR a trigonometrického měření

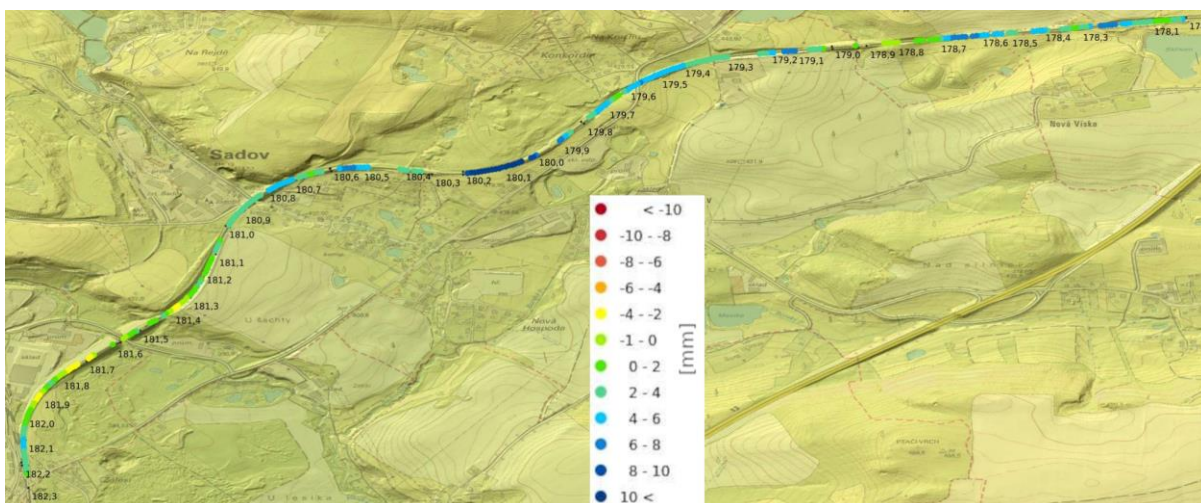
Validace na základě trigonometrického měření (dle odstavce 2.4) byla vyhodnocena pro 304 InSAR bodů. Při nastavení a-priorních směrodatných odchylek na 1 mm pro InSAR a 5 mm pro trigonometrická měření není pro žádný bod nulová hypotéza o shodě průměrů vyvrácena. Při nastavení a-priorních směrodatných odchylek na 1 mm pro InSAR a 3 mm pro trigonometrická měření je nulová hypotéza vyvrácena pro 6 bodů ve vzájemné těsné blízkosti (nelze tedy vyloučit systematickou chybu v trigonometrických měřeních). Při nastavení a-priorních směrodatných odchylek na 1 mm pro obě metody je nulová hypotéza vyvrácena pro 47 bodů (celkem 6 úseků, mimo rekonstruovanou oblast Dalovic; viz obr. 4). Výsledky jsou zobrazeny na obr. 1-5.



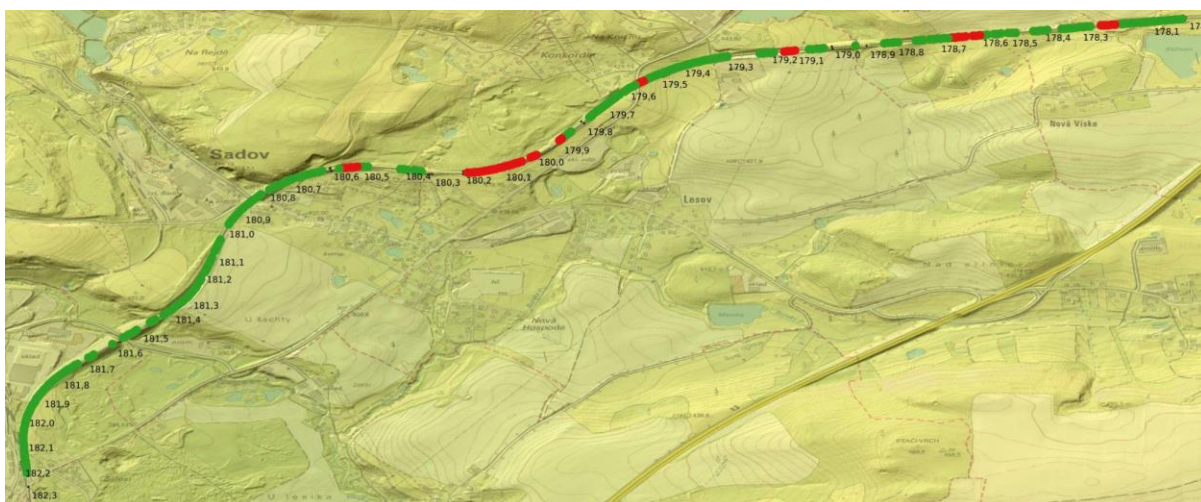
Obr.1: Trigonometrická měření kolejí (průměrný posun mezi etapami 0,1 a 1,2)



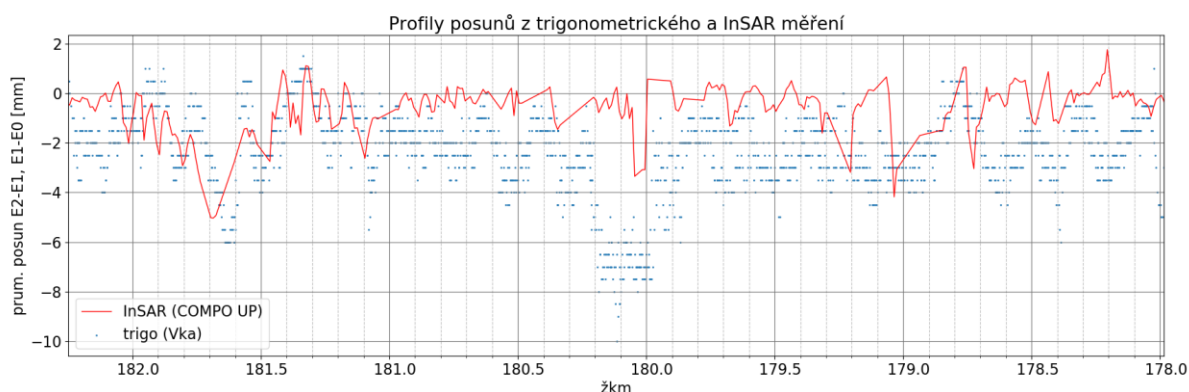
Obr. 2: Výsledky InSAR zpracování kolejí (průměrný posun mezi etapami 0,1 a 1,2)



Obr.3: Rozdíl průměrných posunů (mezi etapami 0,1 a 1,2, tj. zhruba za 3 měsíce): InSAR - trigonometrické měření



Obr.4: Výsledky testování hypotézy o shodě obou měření (při nastavení apriorních sm. odchylek 1 mm jak pro InSAR, tak pro trigonometrické měření): zelená barva značí nezamítnutou hypotézu, červená barva zamítnutou nulovou hypotézu



Obr. 5: Porovnání profilů dekomponovaného InSAR a trigonometrického měření pro celý validovaný úsek. Pozn: osa x (staničení) je zrcadlově otočená tak, aby odpovídala orientaci mapek. Oblast Dalovic je tedy v levé části profilu

Obr. 5 zobrazuje porovnání profilů výškového měření. InSAR a trigonometrická měření se v liší o méně než 2 mm na téměř celé délce úseku: výjimkou je oblouk východně od Sadova (staničení 180.0 - 180.2 km), kde je rozdíl až 6 mm. V tomto úseku (jako jediném) je také nulová hypotéza o identitě obou měření zamítnuta i při nastavení a-priorních sm. odchylek 1 mm pro InSAR a 3 mm pro trigonometrická měření.

Na tomto úseku byly trigonometricky naměřeny pohyby v horizontálním směru kolmo na trať ("Ska") mezi Etapami 0 a 2 [2 - Příloha 3 a 4]. Není nám známo, zda se jedná o pohyby ve směru na sever nebo na jih. Vzhledem k tomu, že citlivost InSAR metody k tomuto směru je nízká a při odhadu se severojižní složka zanedbává, ovlivňují případné skutečné pohyby v tomto směru vertikální složku odhadnutého pohybu ("Up"), a to jeho nadhodnocením nebo podhodnocením o hodnotu rovnou zhruba 20% skutečného pohybu v severo-j jižním směru (v závislosti na směru - tedy znaménku).

Na základě přibližného vyhodnocení trigonometrických měření ve směru kolmém na trať odhadujeme pohyb za 3 měsíce v tomto úseku až 4 mm, což by znamenalo vychýlení odhadu InSAR měření až o 1

mm (za 3 měsíce). Pokud by skutečný pohyb byl od severu k jihu, zvyšovalo by to odhad InSAR vertikálního pohybu (od záporných pohybů směrem ke kladným).

Domníváme se, že velký rozdíl mezi InSAR a trigonometrickým měření v tomto úseku lze částečně zdůvodnit tímto zanedbáním.

3.2 Srovnání InSAR a nivelačního měření na sloupech RTV

Nivelační měření vykázalo nenulové posuny pouze na 4 (rozdíl etap 2,0), resp. 6 (rozdíl etap 4,0) sloupech RTV, vykázaných v přílohách 5 Technických zpráv. Na ostatních RTV (mimo oblast Dalovic) jsou tedy nivelované posuny uváděny jako nulové. Tabulka 1 indikuje rozdíly mezi InSAR a nivelačním měření v této lokalitě.

InSAR dává obdobné hodnoty rozdílů E1-E0 a E2-E1, protože se jedná o hodnoty odvozené z modelu (minimální délka jednoho úseku v modelu je zde 240 dnů, viz odstavec 2.2), a to i když se modelují průběhy na původních bodech v LOS (viz odstavec 2.2).

sloup(y)	E1-E0					E2-E1				
	nivelace: rozdíl výšek (mm)			InSAR: rozdíl výšek (mm)		nivelace: rozdíl výšek (mm)			InSAR: rozdíl výšek (mm)	
	levá	pravá	sm.od.	UP	sm.od.	levá	pravá	sm.od.	UP	sm.od.
RTV137/138	-4	-5	2	-3	1	-2	-1	2	-3	1
RTV141/142	-6	-6	2	-3	1	-4	-1	2	-3	1
RTV143/144	-6	-2	2	-5	1	-6	-5	2	-5	1

Tabulka 1: Porovnání niveačního měření vert. posunů na sloupech RTV v oblasti Dalovic s měřením InSAR na okolních PS bodech.

Rozdíl mezi InSAR měřeními a nivelačními měřeními na sloupech RTV v oblasti Dalovic nikde nepřesahuje 3 mm (za 3 měsíce). V případě InSAR měření jsou sm. odchylky nízké - to lze zdůvodnit, že se jedná o aproximaci dlouhodobým modelem (princip InSAR měření je právě zpracování dlouhého období a aproximace; přesnost jednoho měření je nižší, cca 3-5 mm). V případě přepočtu dlouhodobého modelu na krátké časové období (3 měsíce) jsou pak sm. odchylky nízké, ale nezahrnují nepřesnost lineárního modelu.

Rozdíly mezi InSAR a nivelačními měřeními na sloupech RTV lze zdůvodnit jednak touto aproximací dlouhodobým modelem v případě InSAR měření (pohyb není ve skutečnosti v čase lineární, u některých bodů může daný časový úsek zasahovat do období rekonstrukce, kdy se měnily výrazně jak odrazivé vlastnosti jednotlivých pixelů (se kterými souvisí i šum), i výšky, jejichž změny řádově přesahují možnost detekce InSAR metody (cca 1.5 cm mezi následnými měřeními)), a dále tím, že v případě InSAR nejde o měření čistě na sloupech RTV. Výměna sloupů RTV v tomto úseku v průběhu roků 2020 a 2021 také přispívá ke zhoršení přesnosti měření a především nemožnosti přiřadit body měřené z InSAR ke konkrétnímu sloupu RTV.

4. Diskuse

Porovnání trigonometrických a InSAR měření není přímočaré a věrohodnou validaci v podstatě provést nelze, protože při použití reálných sm. odchylek si všechna měření odpovídají, resp. jejich rozdíly nejsou signifikantní.

Pro interpretaci analýzy je nutné si uvědomit rozdílné charakteristiky porovnávaných výsledků z jednotlivých technik.

Trigonometrická měření, resp. jejich interpolovaný derivát, jsou na úseku trati rozložena v pravidelných rozestupech. Distribuce bodů přímo z InSAR měření (trvalé odražeče) je více stochastická a nepravidelná - závisí na řadě faktorů (orientace trati, povrch svršku, průběh a charakter údržbových činností v průběhu sledování). Pro porovnání byl použit dekomponovaný derivát, taktéž s pravidelnými rozestupy, v některých místech však měření k dispozici nejsou (vlivem absence nebo nedostatečného počtu bodů trvalých odražečů).

Přesnost trigonometrických měření s volnými stanovisky je negativně ovlivněna metodou měření, která vede k proměnlivým chybám na různých úsecích trati. Přesto se (a-priorní) přesnost trigonometrických měření uvádí jako konstantní pro celý úsek trati. Při porovnání trigonometrických (s touto uváděnou přesností) a InSAR měření nejsou detekovány signifikantní rozdíly. Ty byly detekovány teprve s uměle zvýšenou přesností trigonometrických měření.

Přesnost InSAR dekomponovaných měření je také proměnlivá v prostoru, závisí na počtu a přesnosti původních měřených bodů. Pro validaci byla také použita konstantní hodnota přesnosti pro celý úsek trati.

Zatímco trigonometrická měření jsou k dispozici v pravidelných tříměsíčních intervalech a zohledňují tím aktuální posuny, porovnávané posuny získané metodou InSAR odvozeny z aproximace měřených posunů dlouhodobým lineárním modelem. Nelinearity posunů v čase či změny povrchu v průběhu sledování např. vlivem rekonstrukce či podbíjení vedou k zašumění signálu a mají negativní vliv na přesnost InSAR měření.

V případě InSAR měření ve středním rozlišení (tedy z družice Sentinel-1) nelze rozlišit body na sloupech RTV (a dalšího příslušenství) od bodů na kolejích, které mohou podléhat jiným posunům (v případě železničních náspů pravděpodobně podléhají). Proto jsou do odhadu posunů zahrnuty všechny body v určité vzdálenosti od osy trati, a to váženě na základě odhadnuté přesnosti (koherence) jednotlivých měřených InSAR bodů, která závisí na síle odrazu a je negativně ovlivněna i nelinearitou pohybu.

V oblasti Dalovic se kombinuje více deformačních vlivů: sedání náspu (ve svislém směru) s potenciálním sesuvem (v nesvislém směru), a s případným sedáním nových sloupů RTV. Výměna sloupů bohužel RTV negativně ovlivňuje InSAR měření - v některých případech došlo ke změně polohy, což vede k variabilitě odrazivosti v časových řadách InSAR měření (zvýšení odrazivosti a přesnosti některých pixelů, snížení jiných). Kombinace rozmanitých faktorů s rozdílnými časovými vlastnostmi (začátek sledování, rychlost) vede v případě InSAR měření, která se v čase aproximují lineárním modelem a v prostoru skládají do buněk bez ohledu zdroj odrazu, k těžkostem při jejich interpretaci.



Zdroje

[0] SŽG – RP Plzeň. Technická zpráva: Monitoring železničního svršku na trati 0112 Hájek-Dalovice. Etapa 0 (2021)

[1] SŽG – RP Plzeň. Technická zpráva: Monitoring železničního svršku na trati 0112 Hájek-Dalovice. Etapa 1 (2021)

[2] SŽG – RP Plzeň. Technická zpráva: Monitoring železničního svršku na trati 0112 Hájek-Dalovice. Etapa 2 (2021)

[3] SŽG – RP Plzeň. Technická zpráva: Monitoring železničního svršku na trati 0112 Hájek-Dalovice. Etapa 3 (2022)

[4] SŽG – RP Plzeň. Technická zpráva: Monitoring železničního svršku na trati 0112 Hájek-Dalovice. Etapa 4 (2022)

[5] SŽG - Poustka R. Ing.: Osobní konzultace, srpen 2022

..



Projekt CK02000203 Monitoring a vyhodnocení rizikových jevů v okolí dopravní infrastruktury s využitím DPZ je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu DOPRAVA2020+.