

# **Metodika určování vodorovných pohybů výškových objektů 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 Ledec 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 .....	8
6. Postup měření .....	9
6.1. Výběr sledovaných míst na objektu a jejich signalizace.....	9
6.2. Stanovisko radaru.....	9
6.3. Příprava a zacílení radaru .....	11
6.4. Provedení měření radarem .....	12
6.5. Doplnková měření .....	13
7. Postup výpočtu.....	15
7.1 Teoretický úvod a základní rozbor přesnosti.....	15
7. 2. Výpočet a výběr bodů k vyhodnocení .....	16
8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků .....	18
8.1 Analýza a vyhodnocení výsledků .....	18
8.2 Způsob dokumentace výsledků .....	20
9. Závěr .....	22
10. Uplatnění metodiky a pro koho je metodika určena .....	23
11. Srovnání „novosti postupů“, jejich zdůvodnění a jejich srovnání s postupy v zahraničí.....	24
12. Seznam použité související literatury .....	25
13. Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány (pokud existují), případně výstupy z originální práce.....	26

## 1. Předmět a cíl metodiky

Tento dokument popisuje metodiku pro měření vodorovných pohybů výškových objektů 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 pohyby v celé délce sledovaného objektu 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 povrchu stožáru je možno pohyby měřit na dálku bez nutnosti přístupu ke stožáru. Vodorovné pohyby objektů jsou vyvolány buď vlivem povětrnostních podmínek, nestabilitou základů objektu nebo působením vlastních sil, vyvolaných mechanickým zařízením na objektu.

Cílem metodiky je poskytnout odborné veřejnosti z řad především geodetických firem návod jak provádět přesné měření vodorovných pohybů výškových objektů pozemním interferometrickým radarem.

## 2. Struktura metodiky

Metodika je rozdělena do těchto hlavních oblastí:

- popis přístrojového vybavení,
- výčet specifík pro měření pozemním interferometrickým radarem,
- rekognoskace měřeného výškového objektu a okolního terénu,
- měření výškového objektu: selekce měřených míst na objektu, volba vhodného stanoviska radaru, měření objektu a doplňková měření pro vyhodnocení,
- výpočty měření: základní rozbor přesnosti, výběr bodů pro vyhodnocení měření a samotný výpočet pohybů výškových objektů
- 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 odrážejí 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 bezhranovým 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 přímku (resp. pohyby po kulové ploše procházející sledovaným bodem se středem v radaru).
- 3) Velikost přímo měřených pohybů odpovídá průmětům skutečných pohybů kolmo na směr záměry (LOS). Aby bylo možno z přímo měřených dat určit velikost skutečného pohybu výškového objektu, je třeba naměřené pohyby zpětně promítnout do směru předpokládaného pohybu objektu, tj. kolmo od směru záměry do vodorovné roviny, neboť se předpokládá, že sledovaná místa na výškovém objektu se kývají pouze ve vodorovné rovině. 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 vodorovný.
- 4) Směr záměry není obecně totožný se směrem skutečného (maximálního) pohybu (kývání) výškového objektu. Naměřená (určená) výchylka ve vodorovné rovině udává skutečný pohyb objektu jen tehdy, pokud směr svislé roviny záměry je shodný se směrem kývání tělesa objektu. Směr záměry radaru je proto třeba volit tak, aby svislá rovina určená směrem záměry radaru byla co nejméně odlišná od roviny kývání objektu. Pohybuje-li se objekt v jiném směru, než ve směru záměry, pak jsou naměřené vodorovné výchylky menší než skutečný pohyb objektu. To zavádí do výsledku měření chybu, kterou nelze odhalit. Tato chyba se neprojeví, pokud směr záměry odpovídá směru kývání objektu. Toto vše platí pouze v případě, že kývání se děje po úsečce. Jestliže však dochází ke kývání ve dvou směrech současně, např. po elipse, je nutné provádět měření současně ve dvou směrech dvěma radary. Svislé roviny určené směry záměr obou radarů by na sebe měly být přibližně kolmé. Budeme-li předpokládat, že kývání se v čase výrazně nemění, je možné provést dvě měření jedním přístrojem ihned po sobě. Vzhledem k nemožnosti časové synchronizace zjištěných pohybů ve dvou směrech pak ovšem není možné odhalit skutečný charakter pohybů, zda se jedná např. o kružnici, elipsu, úsečku či osmičku nebo jiný periodický tvar (může to být i nepravidelný nebo dokonce chaotický pohyb). Je možné určit alespoň maximální velikost výkyvu objektu, případně frekvenci kmitání, což může být nejdůležitější údaj z hlediska potřeb praxe.

- 5) Maximální hodnota pohybu mezi dvěma po sobě následujícími časy záznamu dle vzorkovací frekvence je dána nejednoznačností měřené fáze. Pro radar IBIS činí  $\pm\lambda/4 = 4,38\text{mm}$ . Při překročení této hodnoty dojde k chybnému výpočtu velikosti pohybu a znehodnocení výsledku měření. Tuto chybu nelze odhalit.

## 5. Přípravné práce a rekognoskace

Před začátkem vlastního měření je nutná rekognoskace výškového objektu a jejího okolí. Před rekognoskací v terénu je vhodné nalézt dostupné informace a fotografie objektu i z jiných zdrojů (vyžádat si je od vlastníka či správce objektu, internet apod.). Při rekognoskaci v terénu se zjistí, zda se na objektu nacházejí prvky, které odráží radarový signál. 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 v systému JTSK. Tento plán pak může sloužit k navržení umístění a orientace radaru.

Při volbě stanoviště radaru je vhodné brát v úvahu mimo jiné také umístění přirozených odražečů na objektu a polohu stanoviště zvolit tak, aby je bylo možno při měření využít. Stejně tak je také vhodné při volbě stanoviště vzít v úvahu i okolní objekty, které by mohly do měření vstoupit nebo ho rušit nežádoucími odrazy.



## 6. Postup měření

### 6.1. Výběr sledovaných míst na objektu a jejich signalizace

Odrážná místa by měla být rozložena rovnoměrně po celé délce objektu nebo jeho sledované části a měla by být od sebe dostatečně vzdálena, aby každé odrazné místo padlo do jiné radiální spádové oblasti radaru. Rozdíl šikmých délek spojnic radaru a sousedních odrazných míst by tedy měl být větší než radiální (délková) rozlišovací schopnost radaru ( $\Delta R = 0,75\text{m}$ ). Odráživé vlastnosti objektu zásadně ovlivňuje jeho tvar, struktura a materiál. Radarový signál nejlépe odráží objekty kovové (vodivé) a plochy kolmé k záměrné přímce. Je-li tedy povrch objektu členitý a vyskytují se na něm nějaké kovové výstupky s plochou kolmou k záměrné přímce radaru (v ideálním případě), lze očekávat, že dostaneme v těchto místech kvalitní odraz a je možné vystačit si pro vyhodnocení objektů s těmito přirozenými odražeči. Pokud je však objekt jednodušší, bez výraznějších výstupků, nelze se na přirozené odražeče spolehnout. Většina odrazů totiž pravděpodobně nebude příliš výrazná, aby posloužily ke spolehlivému určení místa na objektu, které je měřeno. Je tedy třeba použít koutové odražeče a připravit způsob, jak je umístit na objekt. Na výškových objektech se často nacházejí různé dílčí konstrukce, které mohou být zdrojem dobrého odrazu. Takovéto konstrukce je nutno rozlišit na ty, které jsou k objektu připojeny pevně a mohou být využity jako přirozené odražeče (např. sváry, žebříky, plošiny apod.) a ty, které mohou kmitat nezávisle na pohybu vlastního objektu (antény, hromosvody apod.) a to i ve svislém směru.

### 6.2. Stanovisko radaru

Výběr stanoviska radaru pro měření objektu ovlivňují následující kritéria:

#### 1) Směr a druh pohybů sledovaného objektu

Vodorovné pohyby výškových objektů jsou nejčastěji vyvolány tlakem vzduchu (větrem) na plášť objektu. Úzké výškové objekty jako např. tovární komín, vysílač, vodojem nebo větrná elektrárna, vykonávají kmitavé pohyby po kružnici, elipse, úsečce či osmičce nebo jiném periodickém tvaru. Může to však být i nepravidelný nebo dokonce chaotický pohyb. Směr měření pohybu objektu, tedy směr spojnice stanoviska radaru a sledovaného objektu, by měl tedy být v ideálním případě rovnoběžný se směrem větru. V praxi je ovšem vzhledem k dalším faktorům, jako jsou např. charakter terénu, překážky v měření, umístění odrazných prvků nebo proměnlivý směr větru obtížné tohoto ideálního případu dosáhnout a je potřeba směr záměry zvolit tak, aby se v mezích možností blížil směru vanoucího větru.

#### 2) Geometrie měření

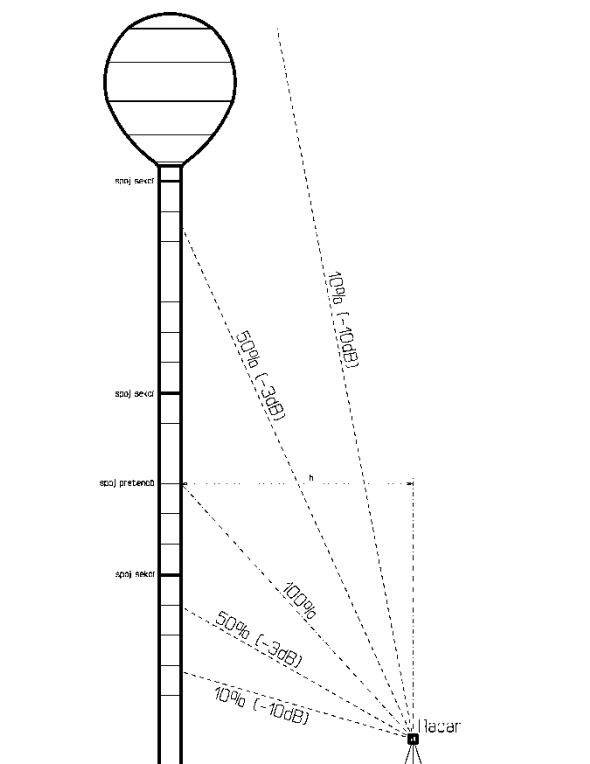
Při volbě umístění radaru je velice důležitá geometrie měření. Geometrie měření určuje velikost projekčního faktoru (poměr šikmé ku vodorovné vzdálenosti) při promítání pohybu

měřeného ve směru záměry do vodorovné roviny a tím ovlivňuje přesnost určovaných pohybů. Při volbě geometrie měření výškových objektů je nutno brát ohled na účinný dosah radaru vzhledem ke kvalitě odrazných míst na objektu a na sklon záměr k jednotlivým sledovaným místům objektu, který určuje projekční faktor promítání měřených pohybů do vodorovné roviny. Dále je potřeba, aby celá část objektu ozářená radarem ležela nad vodorovnou spojnicí radaru a objektu. Kdyby tato podmínka nebyla splněna, nebylo by možno rozlišit, ke které části objektu detekované pohyby přísluší, zda k části nad nebo pod vodorovnou spojnicí radaru a objektu.

Při vybírání vhodného stanoviska radaru je nutné vzít v úvahu následující faktory:

- Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od paty výškového objektu, aby byla dodržena vhodná geometrie při měření i na nejvyšší měřené body, tj. aby projekční faktor byl pro nejvyšší sledovaný bod co nejmenší.
- Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od paty objektu, aby přirozené nebo koutové odražeče nespádaly do stejných radiálních spádových oblastí, tj. aby rozdíly šikmých délek mezi radarem a sousedními místy odrazu signálu byly pokud možno co největší a ne menší než rozlišovací schopnost radaru 0,75m.
- Radar se umístí do takové vzdálenosti od paty objektu, aby odrazy byly dostatečně silné, tj. aby vzdálenosti mezi radarem a místy odrazu na objektu byly co nejmenší.

Podle bodu a) by tedy měla být vzdálenost mezi radarem a patou objektu spíše delší. Naopak podle bodů b) a c) by měla být vzdálenost krátká. Obecně lze říci, že používaná hodnota vodorovné vzdálenosti mezi radarem a objektem je mezi  $\frac{2}{3}$  až  $\frac{1}{4}$  výšky nejvyššího sledovaného místa na objektu, měřeno od jeho paty.



Obr. 1: Umístění a orientace radaru při sledování pohybů výškového objektu

### 3) Okolí sledovaného objektu a jeho viditelnost

Při volbě stanoviště radaru je třeba dbát i na to, aby antény radaru ozářily zájmovou část sledovaného objektu. Zájmovou částí výškového objektu zpravidla bývá jeho horní polovina, kde se předpokládají větší pohyby, než ve spodní části. Může jí však být i objekt jako celek. Vzdálenost stanoviště radaru volíme tak, aby vertikální vyzařovací úhel antén radaru pokryl zájmovou část sledovaného objektu a zároveň aby rozdíl šikmých délek na sousední sledované body byl větší než radiální rozlišovací schopnost radaru ( $\Delta R = 0,75\text{m}$ ), tj. aby tyto sousední body dokázal radar rozlišit. Při volbě stanoviště radaru je také nutno vyhnout se překážkám bránícím výhledu na sledovaný objekt z místa stanoviště radaru. Dalším faktorem je charakter terénu. Je třeba vybrat takové místo, kde bude možné radar dostatečně pevně stabilizovat, zároveň na toto místo nesmí působit vibrace z okolí zapříčiněné např. projíždějícími vozidly.

### 4) Stav počasí během měření

Vodorovné pohyby výškových objektů jsou do značné míry závislé na aktuálním počasí, především na síle a směru větru. Interferometrický radar je schopen detekovat i velmi malé pohyby, proto je třeba výsledky měření vždy interpretovat v kontextu povětrnostní situace při měření. Je-li účelem měření vyhodnotit extrémní hodnoty pohybu výškového objektu, je třeba vybrat k měření odpovídající počasí, tedy den se silným, nebo naopak velmi slabým větrem podle účelu měření. Výsledky měření tedy nelze zobecňovat, aniž by byl objekt proměřen za různých povětrnostních podmínek.

Při sledování pohybů s přesností až na setiny mm je nutno dbát zvýšené opatrnosti při zajištění stability radaru při měření. Do nebezpečného terénu je vhodné radar umístit na pečlivě zašlápnutý těžký stativ s dostatečně široce rozloženými nohama. Na zpevněný povrch je možno použít lehký fotostativ dodávaný výrobcem. V měkkém terénu nelze radar dostatečně pevně stabilizovat. Před měřením je nutno zkontrolovat pevnost uchycení radaru ke stativu a pevnost stativu. V zimním období je nutno vyvarovat se možnosti rozmrzání terénu pod nohama stativu nejlépe umístěním stativu 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 vhodné stativ 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 a zacílení radaru

Na radar je vhodné připevnit antény, které mají vertikální vyzařovací úhel 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.

Radar se zacílí puškohledem směrově na střed objektu, výškově pak na vybraný bod na objektu, který se zaměří později při doplňkovém měření polární metodou či jinak. Výškové zacílení je vhodné provádět při zapnutém přístroji, kdy je možno zároveň sledovat profil odrazivosti zobrazovaný na ovladači radaru (notebooku). Na něm se zobrazí výrazná maxima poměru signálu k šumu (SNR) ve vzdálenostech, kde se na objektu nacházejí odrazná místa. Nejvýhodnější výškový úhel je pak možno nastavit tak, aby hodnoty poměru signálu k šumu (SNR) na odrazných místech na objektu byly dostatečně vysoké (nejlépe nad 50 dB). To nastává obvykle v případě, kdy je zacíleno do horní poloviny objektu blíže ke vzdálenějším odrazným bodům, případně přímo na vrchol objektu. Protože SNR klesá se vzdáleností mezi radarem a sledovaným bodem a dále s úhlem mezi spojnicí radaru se sledovaným bodem a záměrnou přímkou radaru (osou antén), poměr signálu k šumu na vzdálenějších (vyšších) bodech bude snížen větší vzdáleností, ale zvýšen menším úhlem k záměrné přímce radaru. Na bližších (nižších) bodech bude tento poměr naopak snížen větším úhlem k záměrné přímce radaru, ale zvýšen menší vzdáleností mezi těmito body a radarem. Dosavadní zkušenosti také ukazují, že odraz radarového signálu na svarech a spojích nosného sloupu je lepší při strmé záměře (je-li poměr vodorovné délky mezi radarem a objektem vůči výšce bodu, na který je radar zacílen nejméně 1/2).

#### 6.4. Provedení měření radarem

Zaměření vodorovných pohybů výškového objektu se provede v dynamickém pracovním režimu s vysokou vzorkovací frekvencí tak, aby se podrobně zachytil pohyb objektu v čase měření. Přitom se předpokládá, že se objekt kývá s určitou periodou a zároveň se mění amplituda kmitání v závislosti na měnící se síle a směru větru. Pro zpracování měření je třeba do programu ovladače radaru zadat geometrické parametry měření, které se odhadnou, případně změří (viz. doplňková měření). Zadávanými geometrickými parametry jsou:

a) Výška objektu

Tento parametr slouží zejména ke grafickému znázornění situace a staničení odrazných míst od zvoleného počátku.

b) Náklon objektu

U výškových objektů jsou sledována místa na jeho plášti. Protože některé typy výškových objektů, zejména betonové a zděné komíny, mají obvykle kónický tvar, je jejich plášť mírně nakloněn k ose komína tak, že u paty je plášť od osy nejdál a na vrcholu nejbližší. Náklon pláště objektu ovšem bývá malý a na promítání pohybů ve směru záměry do vodorovných pohybů má tak malý vliv, že je možno jej zanedbat a do programu ovladače zadat sklon 0°.

c) Souřadnice x a y radaru

Souřadnice x radaru vyjadřuje výškové staničení od začátku komínu, teoreticky od jeho paty. Začátek ale můžeme (při zanedbání náklonu komína) zvolit libovolně, např. ve výšce

radaru. Souřadnice  $y$  vyjadřuje vodorovnou vzdálenost mezi komínem a radarem. Protože plášť komína je mírně nakloněn (viz. odst. 6.4.b), je nutno vypočítat průměrnou hodnotu nebo vybrat hodnotu vodorovné délky k některému odraznému místu ve střední části komína. Do programu ovladače se souřadnice  $y$  radaru zadává se záporným znaménkem. Souřadnice  $y$  radaru slouží k určení faktoru projekce pro výpočet vodorovných pohybů.

#### d) Náklon radaru

V případě výškového objektu je to zenitová vzdálenost střední záměrné přímky radaru (podélné osy antén). Tento úhel slouží zejména ke grafickému znázornění situace a normalizovaného grafu závislosti ztráty antény na úhlu od podélné osy antény.

#### e) Maximální rozsah záznamu měřených dat

Maximální vzdálenost, v jejímž rozsahu jsou zaznamenávána data, je dána šikmou délkou mezi radarem a nejvzdálenějším odrazným místem na objektu. Nejvzdálenější odrazné místo na objektu se na profilu odrazivosti znázorní jako nejvzdálenější výrazné maximum SNR, za ním je už jen šum s proměnlivými hodnotami SNR. Zkušený měřič je schopen jej rozeznat již po několika praktických měřeních s radarem. Do programu ovladače je vhodné zadat o málo vyšší hodnotu, aby bylo maximum SNR na profilu odrazivosti jasně patrné. Doba měření je pak vhodné zvolit dostatečně dlouhou, aby se zachytilo tlumení či zesilování kývání objektu a případně změny složeného kmitání za různě silného větru. (U složitějších sledovaných objektů může docházet také ke skládání dvou nebo více kmitavých pohybů.) Doba měření ale nesmí být příliš dlouhá, aby měření nebylo příliš ovlivněno změnami atmosférických vlivů, deformacemi stavivu, podloží, na němž je staviv apod. Optimální doba měření je dle dosavadních zkušeností 20 až 30 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. K jejich určení v terénu tedy stačí pouhý odhad. Při rekognoskaci je možné provést zaměření polohopisu a výškopisu objektu a jejího okolí a vytyčit i stanovisko radaru. Pak je možné 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 odrazných míst na objektu. Odrazná místa na objektu se v profilu odrazivosti zobrazovaném programem ovladače zobrazí jako výrazná maxima SNR a 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 nejlépe místo radaru na jeho stativu. U výškových objektů to je obtížné, protože záměry ze stativu radaru jsou příliš strmé a nelze cílit pomocí dalekohledu. Řešením je vybavit totální stanici zalomeným okulárem, použít totální stanici s digitální kamerou a cílením na displeji (angl. Imaging Total Station) nebo umístit totální stanici dále od objektu na přímku střed komínu - stanoviště radaru. Brání-li tomu překážky, je možno zaměřit situaci obecně z jakéhokoli místa v okolí, z něhož je vidět objekt a stanoviště radaru. Přímkou střed objektu - stanoviště radaru je možno přibližně vytyčit puškohledem radaru. Zaměří se zejména bokorys (profil) objektu ve směru záměry, odrazná místa na objektu, stanoviště radaru, výrazné překážky ve výhledu a základní polohopis a výškopis okolí objektu, nebyl-li zaměřen při rekognoskaci. Stanoviště radaru je možno signalizovat odrazným hranolem umístěným na stativ radaru.

Doplňková měření není obecně nutno provádět s přesností obvyklou v geodézii, protože to není ani prakticky možné, např. radar měří délky s rozlišovací schopností  $\Delta R = 0,75$  m, obecně není znám počátek měření délek radarem, nelze ani 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 či při použití adaptéru na šroub stativu 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:

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

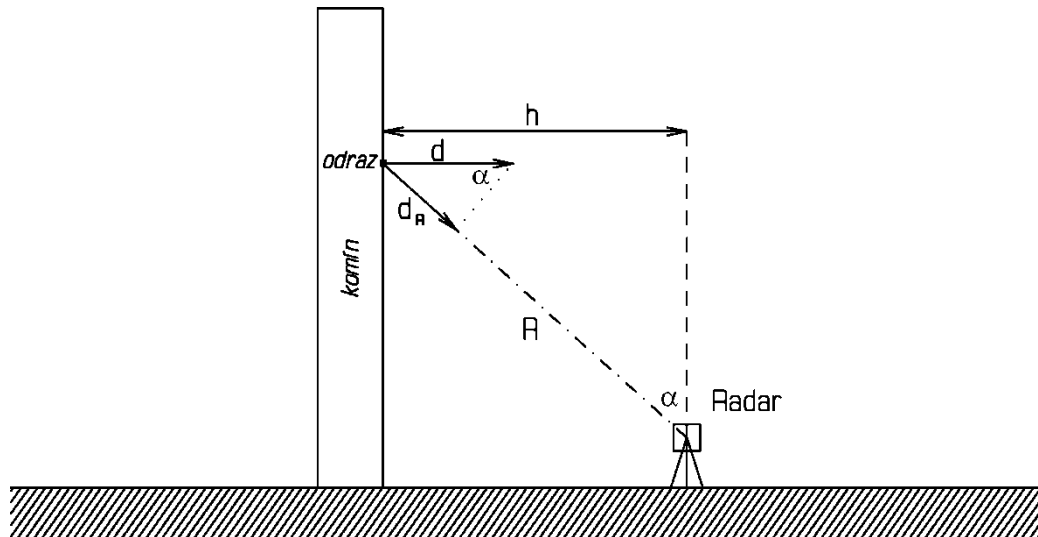
Pro promítnutý pohyb pak platí:

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

kde  $E = R/h$  je tzv. projekční faktor,  $R$  je šikmá délka měřena radarem a  $h=y$  je vzdálenost mezi radarem a sledovaným objektem (viz. obr. 8).

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 variací pro danou směrodatnou odchylku délky  $R$  a vzdálenosti  $h$  ( $\sigma_R, \sigma_h$ ):

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



Obr. 2: Promítání přímo měřeného pohybu  $d_R$  do vodorovné roviny

Směrodatnou odchylku  $\sigma_R$  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  $R$ . Vzdálenost  $h$  tedy není třeba měřit tak přesně jak je v geodézii 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  $\sigma_E$  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 objektu 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 faktor projekce. Z dalších voleb je užitečná např. možnost snížit snímací frekvenci pro zpracování měřených dat byla-li v terénu nastavena zbytečně 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 data a zpřístupní další funkce programu.

Po výpočtu je nutno vybrat konkrétní body resp. rozlišovací buňky radaru k vyhodnocení. Výběr rozlišovacích buněk radaru 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. Pro kontrolu je možno provést identifikaci odrazných míst na objektu, které odpovídají vybraným rozlišovacím buňkám radaru k vyhodnocení porovnáním šikmých délek (poloměrů rozlišovacích buněk radaru) R a šikmých délek měřených polární metodou.

## 8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků

### 8.1 Analýza a vyhodnocení výsledků

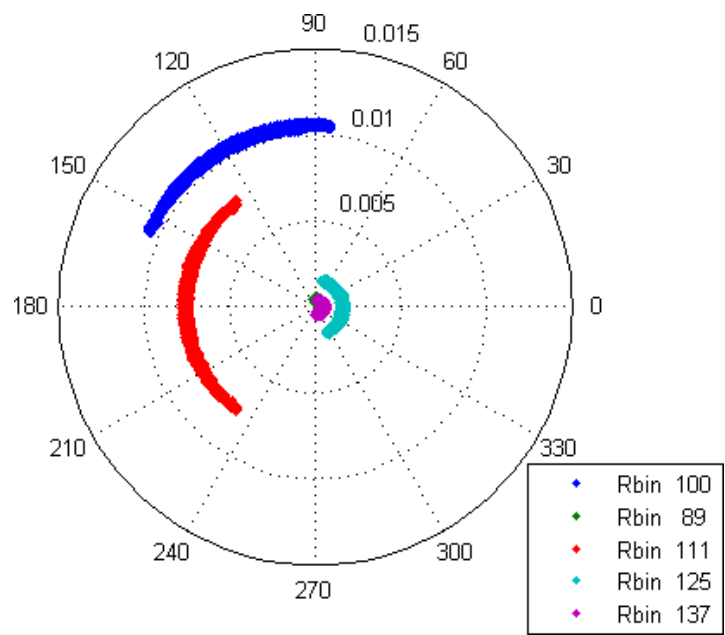
#### 1) Dynamická analýza

Dynamická analýza vybraných rozlišovacích buněk 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.

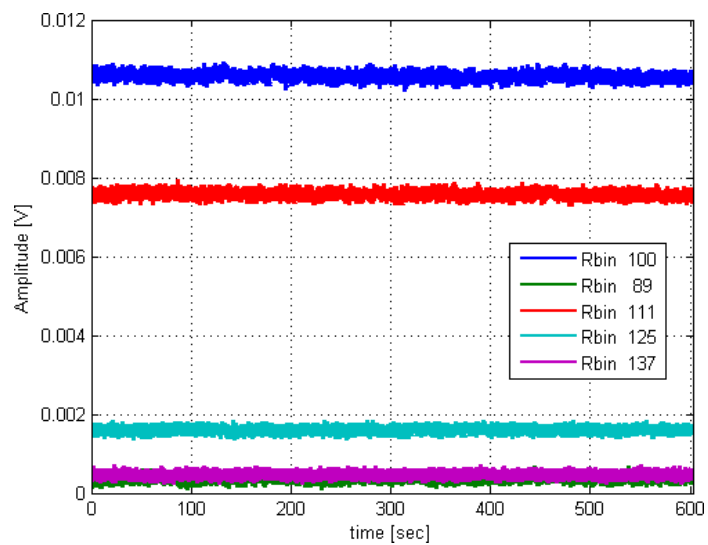
Prvním výstupem dynamické analýzy je polární graf, který zobrazuje vztah fáze resp. fázového posunu a amplitudy. Tento graf slouží zejména k posouzení kvality sledovaných bodů. Pokud se na polárním grafu zobrazí tvar C s malým rozptylem v radiálním i tangenciálním směru, znamená to, že v dané radiální 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 projekčním faktorem promítnuté podobě. K frekvenční analýze slouží tzv. periodogramy výše zmíněných veličin.

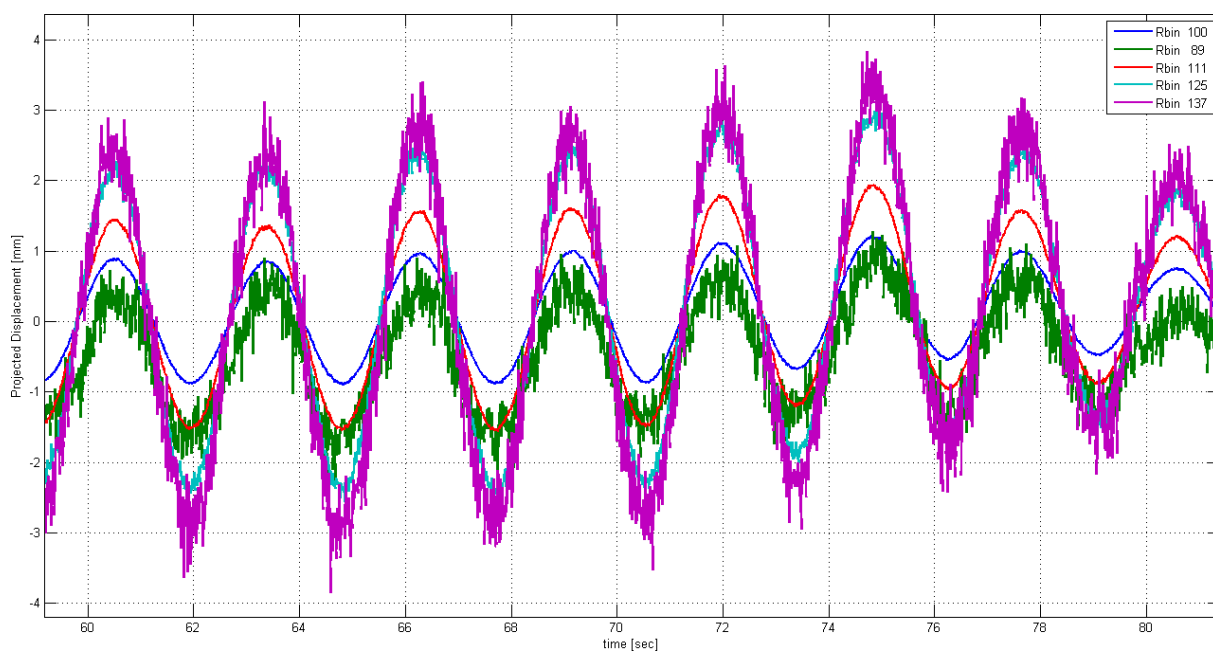
Data všech grafů zobrazovaných programem IBIS Data Viewer je možno exportovat do textových souborů pro další zpracování.



Graf 1: Příklad polárního grafu amplitudy a fázového posunu přijatého signálu



Graf 2: Příklad závislosti amplitudy přijatého signálu na čase



*Graf 3: Příklad vodorovných pohybů sledovaných míst na objektu ve směru záměry v čase 59 až 81s od začátku měření*

## 2) Modální analýza

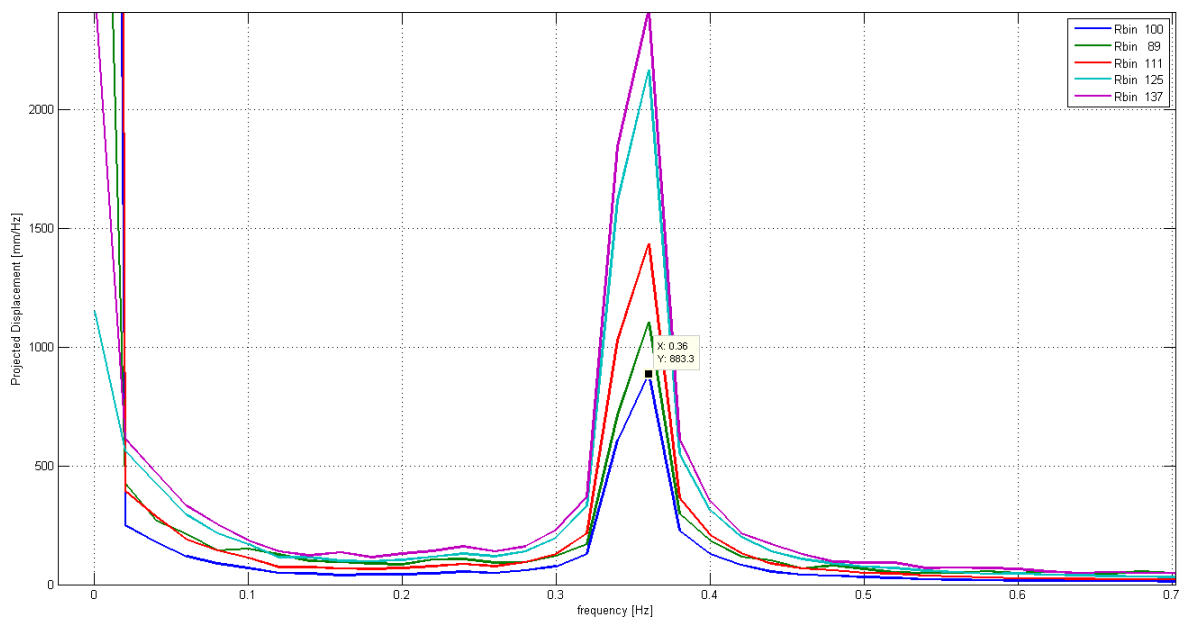
Modální analýza slouží k vytvoření animace pohybů sledovaného objektu ve zvoleném rozsahu frekvencí. Je to spíše doplňkový nástroj k vizualizaci výsledků měření. Výsledky měření je možno dokumentovat technickými zprávami, měřickými náčrti, grafy, tabulkami v tištěné či elektronické podobě a vizualizacemi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

## 8.2 Způsob dokumentace výsledků

Výsledky měření je možno dokumentovat technickými zprávami, měřickými náčrti, grafy, tabulkami v tištěné či elektronické podobě a vizualizacemi a animacemi v digitální podobě. Nejdůležitějšími výsledky měření výškového objektu 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 vodorovných pohybů.
- 2) Graf vodorovných pohybů bodů nebo spojů výškového objektu ve vybraných radiálních spádových oblastech zachycující celou délku měření a detailní grafy zachycující vybrané časové úseky podrobněji znázorňující např. složené pohyby.
- 3) Periodogramy vodorovných pohybů s určením frekvencí 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 4: Příklad periodogramu vodorovných pohybů ve směru záměry*

## 9. Závěr

Předkládaná metodika zahrnuje postup měření vodorovných pohybů výškových objektů 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 objektu. Kvalitu odrazu objektu zlepšuje přítomnost kovových prvků na jeho plášti. Pokud těleso objektu, případně kovové části na něm upevněné, neposkytuje dostatečně kvalitní odraz, je nutné na vhodná místa upevnit koutové odražeče. Bývá pak snadnější jednoznačná identifikovatelnost míst odrazu. Z geometrických parametrů je nejvýznamnější výška objektu a vzdálenost radaru od jeho paty. Tyto parametry ovlivňují hodnoty projekčních faktorů u sledovaných bodů, na nichž závisí přesnost určení vodorovných pohybů objektu. Přesnost měření je také ovlivněna povětrnostními podmínkami, zejména silou a směrem větru. Změna směru a síly větru v průběhu měření značně snižuje kvalitu výsledků. Pokud směr záměry radaru neodpovídá směru kývání objektu, jsou naměřené výkyvy systematicky menší než jeho skutečné pohyby.

Jestliže však dochází ke kývání objektu ve dvou směrech současně, např. po elipse, je nutné pro určení skutečné dráhy pohybů provádět měření současně ve dvou směrech (pokud možno na sebe kolmých) dvěma radary. Budeme-li předpokládat, že kývání se v čase výrazně nemění, je možné provést dvě měření jedním přístrojem ihned po sobě. Vzhledem k nemožnosti časové synchronizace zjištěných pohybů v obou směrech pak ovšem není možné odhalit skutečný charakter pohybů, zda se jedná např. o kružnici, elipsu, úsečku, osmičku nebo složitější, nepravidelný tvar. Je však možné určit maximální velikost výkyvu objektu a jejich frekvenci, což bývá nejdůležitější údaj z hlediska potřeb praxe.

## **10. Uplatnění metodiky a pro koho je metodika určena**

Uplatnění metodiky je především ve stavebnictví při stavbách a kontrolách stability výškových objektů. Využívat ji budou hlavně geodetické firmy provádějící tyto práce na zakázku stavebních firem a firem zabývajících se statikou výškových 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 vodorovných pohybů výškových 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.

I ve světovém srovnání se jedná o zcela špičkové měřické technologie, kde v některých případech bylo docíleno jedinečných výsledků dosud nedosažených a ani nepublikovaných nikým jiným (například vodorovné pohyby stožárů větrných elektráren či vodojemů s detailním určením frekvencí a velikosti jejich kmitání).



## 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., Antoš F., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů továrních komínů pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2012, 12 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [8] Talich M., Hankus D., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2013, 12 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [9] Talich M., Hankus D., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2013, 12 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [10] Talich M., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů výškových budov pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2014, 8 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [11] Talich M., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů věžových vysílačů pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2014, 9 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)

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

- [1] 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
- [2] Talich M., Hankus D., Soukup L., Hauser T., Antoš F., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů továrních komínů pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2012, 12 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [3] Talich M., Hankus D., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2013, 12 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [4] Talich M., Hankus D., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2013, 12 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [5] Talich M., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů výškových budov pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2014, 8 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)
- [6] Talich M., Glöckner M., Antoš F., Soukup L., Havrlant J., Böhm O., Závorská M., Šolc J.: Ověřená technologie určování vodorovných pohybů věžových vysílačů pozemním interferometrickým radarem. ÚTIA, 2014, 9 s., Dostupné z: [www.p-insar.cz](http://www.p-insar.cz)



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

uděluje

## CERTIFIKAČNÍ LIST

č.j. ČÚZK-05898/2016-22

pro

Název certifikované metodiky: Metodika určování vodorovných pohybů výškových objektů pomocí technologie radarové interferometrie

Autor: ÚTIA AV ČR, v.v.i. – F. Antoš, M. Talich, M. Glöckner, O. Böhm L. Soukup,  
J. Havrlant, M. Závrská, 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 vodorovných pohybů výškových objektů 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 Nedvěď

.....  
Podpis zástupce ČÚZK,  
oprávněného k udělení certifikace

Dne: 7.4.2016