

Ověřená technologie určování vodorovných pohybů továrních komínů pozemním interferometrickým radarem

Milan Talich, Daniel Hankus, Lubomír Soukup, Tomáš Hauser,
Filip Antoš, Jan Havrlant, Ondřej Böhm, Miroslava Závorská, Jakub Šolc

Obsah

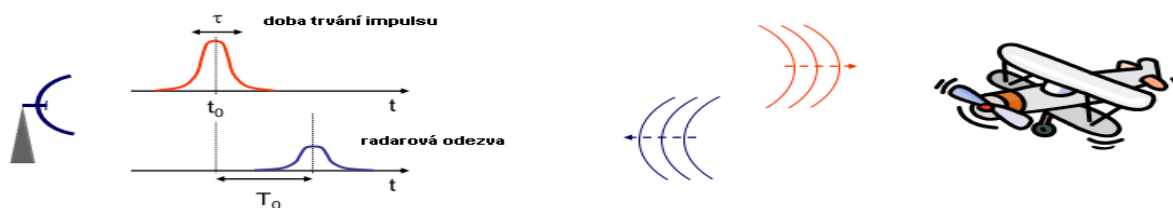
1. Úvod	1
2. Přehled použité teorie - základní principy radarové interferometrie s IBIS-S.....	1
3. Přístrojové vybavení a jeho technické parametry	4
4. Obecné zásady	5
5. Přípravné práce a rekognoskace	5
6. Postup měření	6
6.1. Výběr sledovaných míst a jejich signalizace	6
6.2. Umístění radaru	6
6.3. Příprava a zacílení radaru	7
6.4. Provedení měření radarem.....	8
6.5. Doplnková měření	10
6.6. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu	11
7. Postup výpočtu	11
7.1. Teoretický úvod a základní rozbor přesnosti	11
7.2. Výpočet a výběr bodů k vyhodnocení	13
8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků	13
9. Komparace a ověřovací měření	14
10. Závěr.....	14
11. Seznam použité literatury	15
12. Seznam příloh.....	15

1. Úvod

Tato příručka popisuje metodický postup pro měření vodorovných pohybů továrních komínů pozemním interferometrickým radarem IBIS-S. Tato inovativní metoda umožňuje měřit vodorovné pohyby v několika sledovaných bodech na komínu současně. Měření probíhá kontinuálně s vysokou snímací frekvencí (až 200 Hz) a vysokou přesností (až 0,01mm). Při dobrých podmínkách odrazu radarového signálu je možno měřit pohyby komína na dálku bez nutnosti přístupu ke komínu.

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

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 **souvislé frekvenční stupňovité vlny** (angl. stepped frequency continuous wave, zkráceně SFCW), a **diferenční interferometrii** (angl. differential interferometry).



Obr. 1: Princip radarové diferenční interferometrie

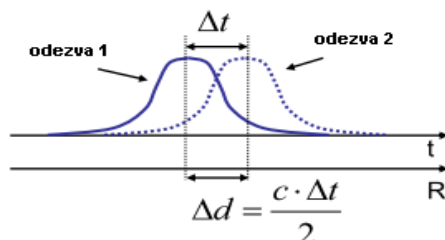
Technologie souvislé frekvenční stupňovité vlny slouží k určení vzdálenosti cílového objektu od radaru. Mikrovlnné frekvence jsou vysílány ve velmi krátkých impulzech o velkém výkonu. Vzdálenost detekovaných předmětů je určována na základě časové korelace vyslaného a přijímaného signálu. Využitím této technologie IBIS vytváří 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

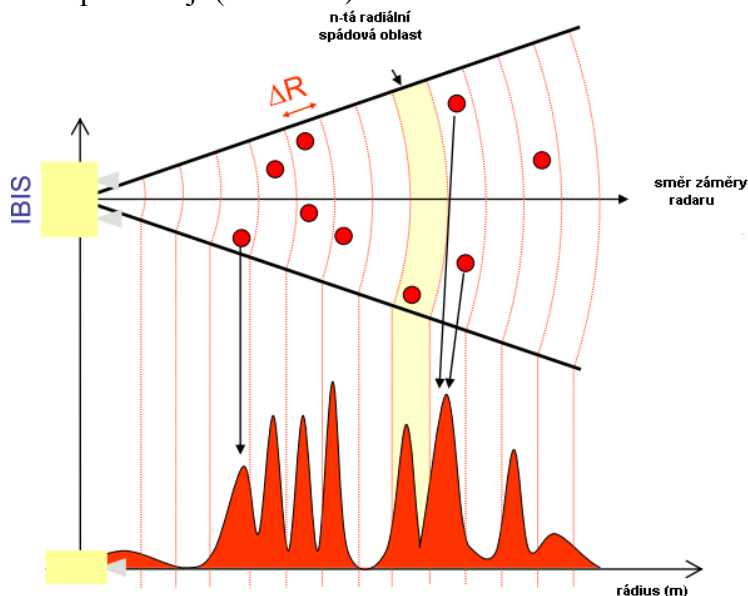
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2},$$

kde τ je doba trvání vyslaného 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-S. Vodorovná osa znázorňuje radiální vzdálenost od radaru. Radar typu IBIS-S dokáže rozlišovat detekované objekty jen v jenom 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

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

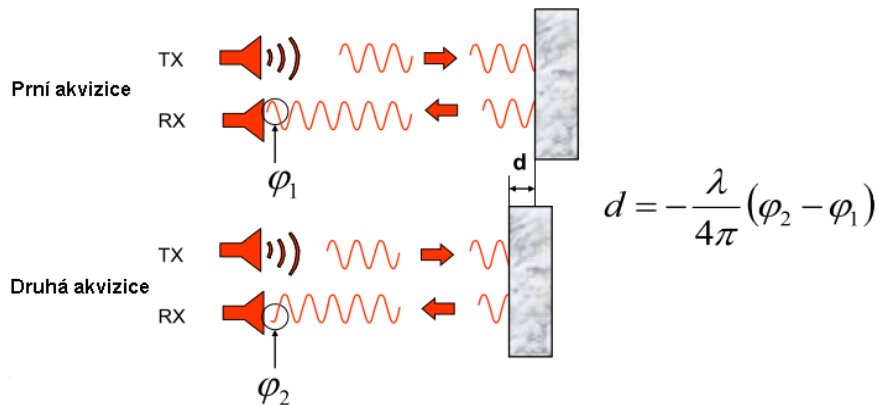
$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{\sum}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2,$$

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 k šumu:

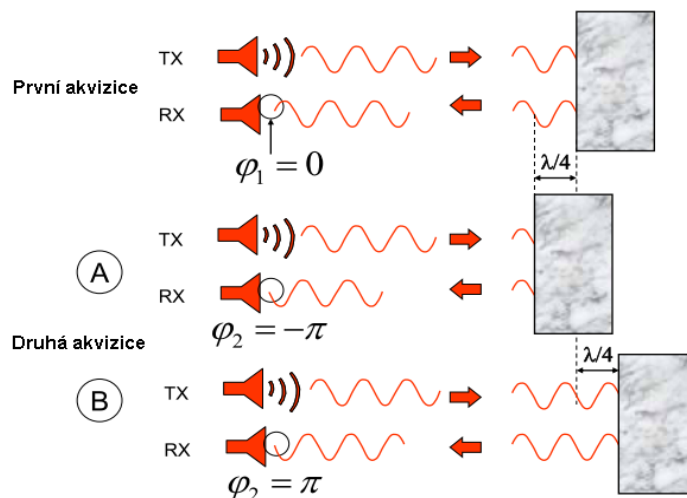
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{\sum}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{\sum}} \right)$$

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.



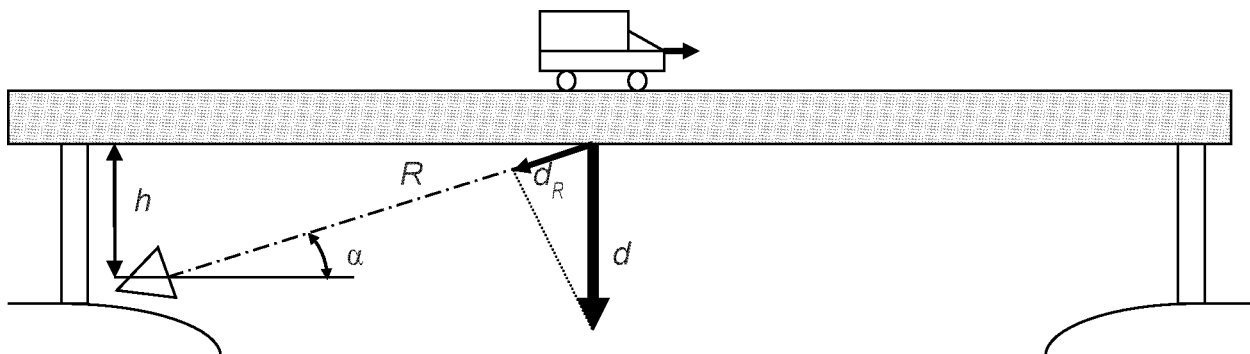
Obr. 4: Princip diferenční interferometrie

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



Obr. 5: Nejednoznačnost měření fáze

Veškeré posuny jsou měřeny ve směru záměry. Není-li záměra orientována přesně ve směru očekávaného posunu, je potřeba skutečné posuny dopočítat dle vzorců $d=d_R/\sin(\alpha)$, kde $\sin(\alpha)=h/R$ a tudíž $d=d_R \cdot R/h$, kde poměr R/h je projekční faktor (angl. projection factor). Délka R je měřena radarem, převýšení h je třeba určit dodatečným geodetickým měřením, např. laserovým dálkoměrem, pásmem apod. Projekce radarem naměřeného pohybu d_R do svislého směru je znázorněna na obrázku 6.



Obr. 6: Promítání přímo měřeného pohybu d_R do svislého směru

3. Přístrojové vybavení a jeho technické parametry

Pro měření se používá vysoce stabilní koherentní pozemní interferometrický radar IBIS-S. Radar pracuje v mikrovlnném pásmu se střední frekvencí 17 GHz. 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 frekvenci lze zvolit podle požadovaných nároků na podrobnost výsledků zaměření. Směrodatná odchylka radarem zaměřených pohybů dle údajů výrobce je až 0,01mm a závisí zejména na 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 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. Ovladač radaru tvoří odolný notebook Panasonic CF-19 s programem IBIS-S Controller. Ke zpracování měření je možno použít program IBIS Data Viewer.

Pro doplňková měření se použijí vhodné geodetické přístroje, zejména totální stanice s bezhranolovým měřením délek, případně ruční dálkoměr, pásmo apod. 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 a 3D hlava, která je převzata z fotostativu Manfrotto dodávaného výrobcem. 3D hlava umožňuje otáčení radaru podél svislé osy a náklon ve dvou kolmých směrech. K signalizaci sledovaných bodů se používají kovové koutové odražeče různých velikostí, nejčastěji nerezové či hliníkové.

4. Obecné zásady

- a) Pozemní interferometrický radar měří pouze relativní pohyby po určitou dobu, kterou vhodně zvolí měřič. 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.
- b) Pozemní interferometrický radar měří přesné pohyby pouze ve směru záměry, tzn. po spojnici radaru a sledovaného bodu (angl. Line of Sight, zkráceně LOS). Není proto schopen zaznamenat pohyby kolmé na záměrnou přímkou (resp. pohyby po kulové ploše procházející sledovaným bodem se středem v radaru).
- c) Velikost přímo měřených pohybů odpovídá průmětům skutečných pohybů kolmo na směr záměry (LOS). Aby bylo možno z přímo měřených dat určit velikost skutečného pohybu komína, je třeba naměřené pohyby zpětně promítnout do směru předpokládaného pohybu komína, tj. kolmo od směru záměry do vodorovné roviny (viz. obr. 8), neboť předpokládáme, že sledovaná místa na komínu se kývají pouze ve vodorovné rovině. Tento zpětný průmět provádí program IBIS-S Controller v průběhu měření. Kdyby se sledovaná místa na komínu 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.
- d) Směr záměry není obecně totožný se směrem skutečného (maximálního) pohybu (kývání) komína. Výchylka ve vodorovné rovině udává skutečný pohyb komína jen tehdy, pokud směr svislé roviny záměry je shodný se směrem kývání tělesa komínu. Směr záměry radaru je proto třeba volit tak, aby svislá rovina určená směrem záměry radaru byla co nejméně odlišná od roviny kývání komína. Pohybuje-li se komín v jiném směru, než ve směru záměry, pak jsou naměřené vodorovné výchylky systematicky menší než skutečný pohyb komína. To zavádí to do výsledku měření chybu, kterou nelze odhalit. Tato chyba se neprojeví, pokud směr záměry odpovídá směru kývání komína. 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 komínu, což může být nejdůležitější údaj z hlediska potřeb praxe.

5. Přípravné práce a rekognoskace

Před začátkem vlastního měření je nutná rekognoskace komína a jejího okolí. Před rekognoskací v terénu je vhodné nalézt dostupné informace a fotografie komína i z jiných zdrojů (internet, vyžádat si je od vlastníka či správce komína apod.). Při rekognoskaci v terénu se zjistí, zda se na komínu 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 S-JTSK. Tento plán pak může sloužit k navržení umístění a orientace radaru později v kanceláři. Při volbě stanoviska radaru je vhodné brát v úvahu mimo jiné také umístění přirozených odražečů na komínu a polohu stanoviska zvolit tak, aby je bylo možno při měření využít.

6. Postup měření

6.1. Výběr sledovaných míst a jejich signalizace

Odrážná místa by měla být rozložena rovnoměrně po celé délce komínu 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 komína zásadně ovlivňuje jeho tvar, struktura a materiál. Radarový signál nejlépe odráží objekty kovové (vodivé) a plochy kolmé k záměrné přímce. Je-li tedy povrch komína členitý, tzn. 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 jednolitý, bez výraznějších výstupků, nelze se na přirozené odražeče spolehnout. Většina odrazů totiž pravděpodobně bude příliš nevýrazná, aby posloužily ke spolehlivému zaměření. Je tedy třeba s tímto počítat a připravit si koutové odražeče a způsob jak je umístit na objekt. Na komínech se často nacházejí různé dílčí konstrukce, které mohou být zdrojem dobrého odrazu. Takovéto konstrukce je nutno rozlišit na ty, které jsou ke komínu připojeny pevně a mohou být využity jako přirozené odražeče (např. žebříky zděných komínů) a ty, které mohou kmitat nezávisle na pohybu vlastního komínu (antény, hromosvody apod.) a to i ve svislém, tedy rušivém směru.

6.2. Umístění radaru

Umístování radaru ovlivňují především následující kritéria:

a) Směr a druh pohybů sledovaného objektu

U továrních komínů se předpokládá, že se kývají, jejich pohyb tedy probíhá po kružnici, elipse, úsečce či osmičce nebo jiném periodickém tvaru. Může to však být i nepravidelný nebo dokonce chaotický pohyb. Směr kývání je dán převážně směrem síly působící na komín, která je příčinou tohoto pohybu. U komína je jeho pohyb nejčastěji způsoben tlakem proudění vzduchu na plášť komínu (větrem). Směr sledování pohybu továrního komínu, tedy směr spojnice stanoviska radaru a sledovaného komína, by měl tedy být v ideálním případě rovnoběžný se směrem větru. V praxi je ovšem vzhledem k dalším faktorům omezující polohu stanoviska radaru (charakter terénu, překážky v měření, umístění žebříku, proměnlivý směr větru) obtížné tohoto ideálního případu dosáhnout a je potřeba směr záměry zvolit tak aby se v mezích možností blížil směru vanoucího větru.

b) Geometrie měření

Při volbě umístění radaru je velice důležitá geometrie měření. Geometrie měření určuje velikost projekčního faktoru při promítání pohybu ve směru záměry do vodorovné roviny a tím ovlivňuje přesnost určovaných pohybů. Při volbě geometrie měření továrních komínů je nutno brát ohled na účinný dosah radaru vzhledem ke kvalitě odrazných míst na komínu a na sklon záměru na jednotlivá

sledovaná místa komínu, 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 komínu.

c) Okolí sledovaného objektu a jeho viditelnost

Při volbě stanoviště radaru je třeba dbát na to, aby antény radaru ozářily zájmovou část sledovaného komínu. Zájmovou částí komínu zpravidla bývá jeho horní polovina, kde se předpokládají větší pohyby, než ve spodní části, může jí však být i celý komín. Vzdálenost stanoviště radaru volíme tak, aby vertikální vyzařovací úhel antén radaru pokryl zájmovou část sledovaného komínu 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.

d) Stav počasí během měření

Je zřejmé, že vodorovné pohyby komínu jsou do značné míry závislé na aktuálním počasí, především na síle a směru větru. Interferometrický radar je schopen detekovat i velmi malé pohyby, které mohou indikovat spíše stav počasí během měření nežli skutečný stav komínu z hlediska jeho mechanické stability. Výsledky měření je proto třeba vždy interpretovat v kontextu povětrnostní situace při měření. Je-li účelem měření vyhodnotit extrémní hodnoty pohybu komínu, 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 komín proměřen za různých povětrnostních podmínek.

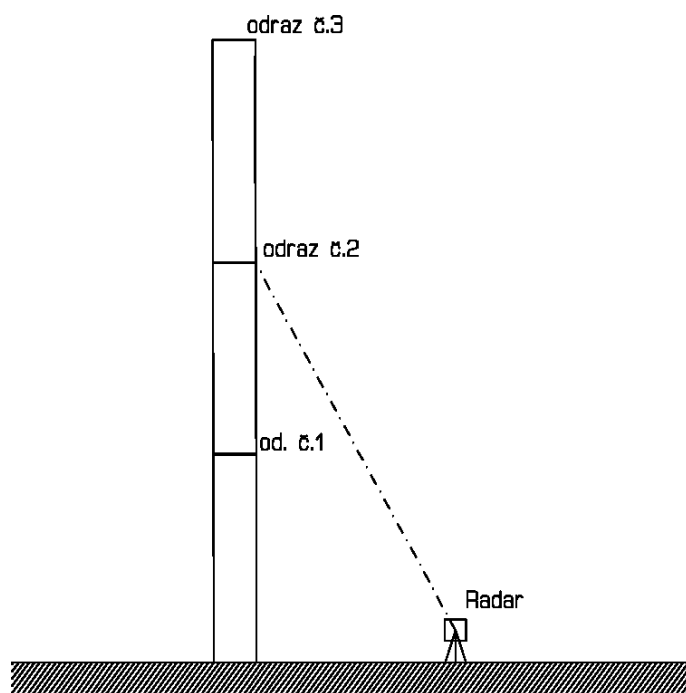
Při sledování pohybů s přesností až na setiny mm je nutno dbát zvýšené opatrnosti při zajištění stability radaru při měření. Do nebezpečného terénu je vhodné radar umístit na pečlivě zašlápnutý těžký stativ s dostatečně široce rozloženými nohama. Na zpevněný povrch je možno použít lehký fotostativ dodávaný 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, nepřilíš 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 se upevní antény zpravidla typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39), jejichž vertikální vyzařovací úhel je větší než horizontální. V případě použití jiného typu antén, které mají horizontální úhel záběru větší než vertikální je nutno radar s anténami sklopit do svislé polohy.

Radar se zacílí puškohledem směrově na střed komínu, výškově pak na vybraný bod na komínu,

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 komínu nacházejí odrazná místa. Nejvýhodnější výškový úhel je pak možno nastavit tak, aby hodnoty poměru signálu k šumu (SNR) na odrazných místech na komínu byly dostatečně vysoké (nejlépe nad 50 dB). To nastává obvykle v případě, kdy je zacíleno do horní poloviny komínu blíže ke vzdálenějším odrazným bodům, případně přímo na vrchol komínu. Protože SNR klesá se vzdáleností mezi radarem a sledovaným bodem a s úhlem mezi spojnicí radaru a sledovaného bodu 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 výšky bodu, kde je radar zacílen nejméně 1/2).



Obr. 7: Umístění a orientace radaru při zaměřování komína

6.4. Provedení měření radarem

Zaměření vodorovných pohybů továrního komína se provede v dynamickém pracovním režimu s vysokou frekvencí, tak aby se podrobně zachytil pohyb komínu v čase měření. Přitom se předpokládá, že se komín kývá s určitou periodou a zároveň se mění amplituda kmitání v závislosti na měnící se síle a směru větru. Geometrické parametry zadávané do programu ovladače IBIS-S Controller se odhadnou, případně změří (viz. doplňková měření). Zadávanými geometrickými parametry jsou:

a) Výška komína

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

b) Náklon komína

U komína jsou sledována místa na jeho plášti. Protože zejména betonové a zděné komíny mají obvykle kónický tvar, v podélném průřezu ve směru záměru je jejich plášť mírně nakloněn k ose komína tak, že u paty je plášť od osy nejdál a na vrcholu nejbližší. Náklon pláště komína je ovšem malý a na promítání pohybů ve směru záměru 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 komínu je to zenitová vzdálenost střední záměrné přímky radaru (podélné osy antén). Jeho hodnotu je možno vypočítat ze vzorce $\alpha = 90^\circ - \alpha'$, kde hodnotu α je možno odečíst ze stupnice 3D hlavy radaru s přesností odpovídající přesnosti její horizontace na stativu. Tento úhel slouží zejména ke grafickému znázornění situace a normalizovaného grafu závislosti ztráty antény na úhlu od podélné osy antény. (Zadávat se do kolony nazvané výškový náklon - angl. Vertical Tilt, tento název je platný pro geometrii při měření mostů).

e) Maximální rozsah záznamu měřených dat

Maximální vzdálenost, v jejímž rozsahu jsou zaznamenávána data, je dána šikmou délkou mezi radarem a nejbližším odrazným místem na komínu. Nejbližší odrazné místo na komínu se na profilu odrazivosti znázorní jako nejbližší 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.

Délku měření je pak vhodné zvolit dostatečně dlouhou, aby se zachytilo tlumení či zesilování kývání komínu a případně změny složeného kmitání za různě silného větru. (U složitějších sledovaných objektů může docházet také ke skládání dvou nebo více kmitavých pohybů.) Délka měření ale nesmí být příliš dlouhá, aby měření nebylo příliš ovlivněno změnami atmosférických vlivů, deformacemi stativu, podloží, na němž je stativ 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 (IBIS-S Controller) a provede se ještě před vlastním měřením radarem. Veškeré hodnoty zadávané v terénu do programu ovladače kromě maximální vzdálenosti, po kterou jsou zaznamenávány měřená data lze později při zpracování programem IBIS Data Viewer změnit. K jejich určení v terénu tedy stačí pouhý odhad. Bylo-li provedeno zaměření polohopisu a výškopisu komínu a jejího okolí při rekognoskaci a stanovisko radaru odpovídá naplánovanému umístění, je možno použít geometrické parametry z tohoto měření. K přibližnému určení potřebných geometrických parametrů postačí také měření ručním dálkoměrem, pásmem apod.

Dále může toto měření sloužit ke kontrolní identifikaci odrazných míst na komínu. Odrazná místa na komínu se v profilu odrazivosti zobrazovaném programem ovladače IBIS-S Controller 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 IBIS Data Viewer určenému k výpočtu a vyhodnocení výsledků měření pozemním interferometrickým radarem (tyto parametry jsou stejné jako parametry zadávané do programu ovladače IBIS-S Controller 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 komínů to je ovšem obtížné, protože záměry na komín ze stativu radaru jsou příliš strmé a nelze cílit pomocí dalekohledu. Řešením je vybavit totální stanicí zalomeným okulárem, použít totální stanicí s digitální kamerou a cílením na displeji (angl. Imaging Total Station) nebo umístit totální stanicí dále od komínu na přímku střed komínu - stanovisko radaru. Brání-li tomu překážky, je možno zaměřit situaci obecně z jakéhokoli místa v okolí, z něhož je vidět komín a stanovisko radaru. Přímkou střed komínu - stanovisko radaru je možno přibližně vytyčit puškohledem radaru. Zaměří se zejména bokorys (profil) komínu ve směru záměry, odrazná místa na komínu, stanovisko radaru, výrazné překážky ve výhledu a základní polohopis a výškopis okolí komínu, nebyl-li zaměřen při rekognoskaci. Stanovisko radaru je možno signalizovat odrazným hranolem umístěným na stativ radaru.

Doplnková 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, obecně nelze přesně určit body odrazu na sledovaném objektu, při záměně radaru a totální stanice či odrazného hranolu nelze dodržet stejnou výšku přístroje či cíle a při náklonu 3D hlavy či při použití adaptéru na šroub stativu ani centraci, puškohledem radaru nelze přesně cílit apod.

6.6. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu

V terénu je možno naměřená data předběžně vypočítat a vyhodnotit pomocí programu IBIS Data Viewer, který je možno nainstalovat např. do ovladače radaru (notebooku). Výpočet a vyhodnocení se provede podobným způsobem, jako závěrečné vyhodnocení v kanceláři, které je popsáno dále.

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:

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

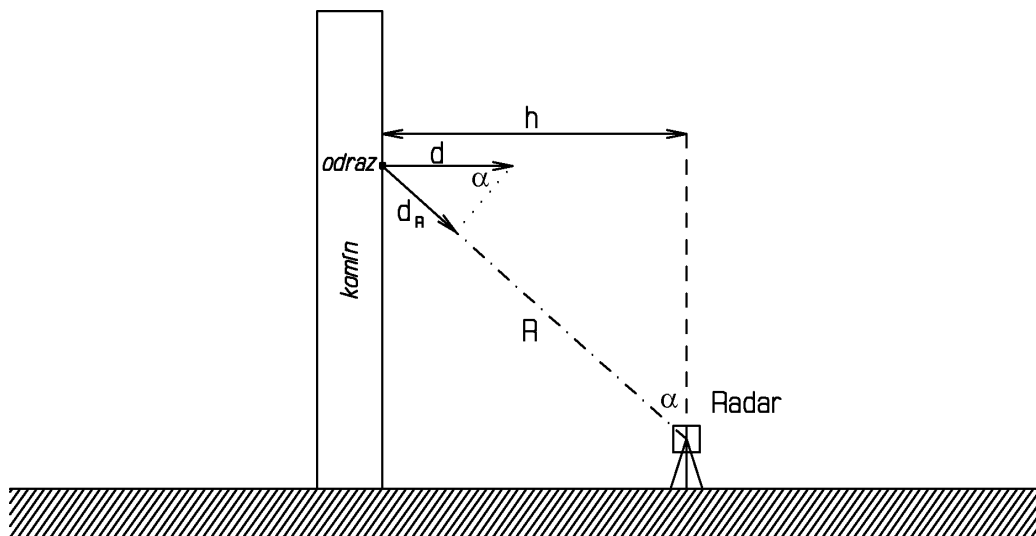
kde SNR je prostý (nelogaritmický) poměr signálu k šumu. Program IBIS Data Viewer vyjadřuje poměr signálu k šumu dvěma způsoby – jako tepelný SNR_t a odhadnutý SNR_e . Odhadnutý poměr signálu k šumu SNR_e je vhodný pro odhad přesnosti měření. Směrodatnou odchylku pohybu ve směru záměry lze tedy vyjádřit 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 je vzdálenost mezi radarem a sledovaným objektem (viz. obr. 8).



Obr. 8: Promítání přímo měřeného pohybu d_R do vodorovné roviny

Přesnost promítnutého pohybu d závisí na přesnosti pohybu ve směru záměry a na projekčním faktoru E a jeho přesnosti. Směrodatnou odchytku projekčního faktoru lze určit pomocí zákona hromadění variancí pro danou směrodatnou odchytku délky R a vzdálenosti h (σ_R, σ_h):

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

Směrodatnou odchytku σ_R je možné odhadnout pomocí rozlišovací schopnosti $\Delta R = 0,75$ m. Polovinu rozlišovací schopnosti lze považovat za mezní odchytku a stanovit $\sigma_R = \Delta R / 2 / t$, kde hodnotu parametru t je možné 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 odchytky promítnutého pohybu je pak:

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

kde σ_E je směrodatná odchytky projekčního faktoru E .

Směrodatnou odchytku σ_R je možné odhadnout pomocí rozlišovací schopnosti $\Delta R = 0,75$ m. Polovinu rozlišovací schopnosti lze považovat za mezní odchytku a stanovit $\sigma_R = \Delta R / 2 / t$, kde hodnotu parametru t je možné volit z intervalu $2 < t < 3$. Přesnost určení vzdálenosti 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 odchytky promítnutého pohybu je pak:

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

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 komínu 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 např. byla-li v terénu chybně nastavena příliš vysoká. Další parametry není dle doporučení výrobce nutno měnit, jejich nastavení přísluší pouze zkušeným uživatelům.

Po zadání potřebných parametrů je možno provést výpočet, při němž se zpracují surová 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 komínu, které odpovídají k vyhodnocení vybraným rozlišovacím buňkám radaru porovnáním šikmých délek (poloměrů rozlišovacích buněk radaru) R a šikmých délek měřených polární metodou.

8. Analýza, vyhodnocení a způsob dokumentace výsledků

Program IBIS Data Viewer rozlišuje vyhodnocení výsledků na tzv. dynamickou a modální analýzu.

a) 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.

b) Modální analýza

Modální analýza slouží k vytvoření animace pohybů sledovaného objektu ve zvolené rozsahu frekvencí. Je to spíše doplňkový nástroj k vizualizaci výsledků měření.

Základní formou uchování měřených dat jsou datové soubory uložené programem IBIS-S Controller. Základní formou uchování zpracovaných dat jsou soubory projektů uložené programem IBIS Data Viewer. Výsledky měření je možno dokumentovat technickými zprávami, měřickými náčrtky, grafy, tabulkami v tištěné či elektronické podobě a vizualizacemi a animacemi v digitální podobě.

9. Komparace a ověřovací měření

Zprávy o provedení komparace a ověřovacího měření jsou přílohami tohoto dokumentu (viz. seznam příloh).

10. Závěr

Předkládaná technologie zahrnuje postup měření vodorovných pohybů továrních komínů 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 komína. Kvalitu odrazu poněkud zlepšuje přítomnost kovového žebříku, avšak obvykle na něm nelze jednoznačně identifikovat místa odrazu. Pokud těleso komína, případně kovové části na něm upevněné, neposkytuje dostatečně kvalitní odraz, je nutné na vhodná místa upevnit koutové odražeče. Z geometrických parametrů je nejvýznamnější výška komína a vzdálenost radaru od paty komína. Tyto parametry ovlivňují hodnoty projekčních faktorů u sledovaných bodů, na nichž závisí přesnost určení vodorovných pohybů komína. 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 komína, jsou naměřené výkyvy systematicky menší než skutečné pohyby komína. Měření zděných komínů s kovovými žebříky je tedy obzvláště citlivé na specifické podmínky konstrukčního charakteru komína, geometrické konfiguraci radaru vůči komínu i na povětrnostní situaci.

Jestliže však dochází ke kývání komína 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 komínu, což může být nejdůležitější údaj z hlediska potřeb praxe.

11. Seznam použité 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) Sabine Rödelsperger, Gwendolyn Läufer, Carl Gerstenecker, Matthias Becker, Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L, Journal of applied Geodesy 4 (2010), 41-54.

12. Seznam příloh

1. Zpráva o provedených ověřovacích měřeních Ověřené technologie určování vodorovných pohybů továrních komínů pozemním interferometrickým radarem.
2. Zpráva o polní komparaci pozemního interferometrického radaru IBIS-S.

Zpráva o provedených ověřovacích měřeních Ověřené technologie určování vodorovných pohybů továrních komínů pozemním interferometrickým radarem

Ing. Daniel Hankus

Obsah

1. Úvod	1
2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí	1
3. Postup měření	1
4. Výpočet a vyhodnocení doplňkového měření polární metodou	2
5. Výpočet a vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem	2
6. Závěr.....	7

1. Úvod

V rámci ověřování přínosů technologie pozemního interferometrického radaru pro určování deformací rizikových objektů a lokalit bylo provedeno sledování vodorovných pohybů zděného továrního komína firmy Novodur v Ledči nad Sázavou.

2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí

Komín v areálu firmy Novodur je zděný cca 100 m vysoký. Komín se sice nachází v údolí u řeky Sázavy, ale protože je vysoký, je pravděpodobné, že je vystaven působení větru. Na jihovýchodní a severozápadní straně komínu je kovový žebřík. V blízkém okolí komínu je oplocený soukromý pozemek. Na jihovýchod od komínu se nacházejí výrobní haly, z tohoto směru tedy nelze komín zaměřit. Na severozápad od komínu je pás listnatých stromů a za ním travnatá plocha v okolí vodárny. Z této travnaté plochy je viditelná horní polovina komína, spodní polovina je zakryta stromy.



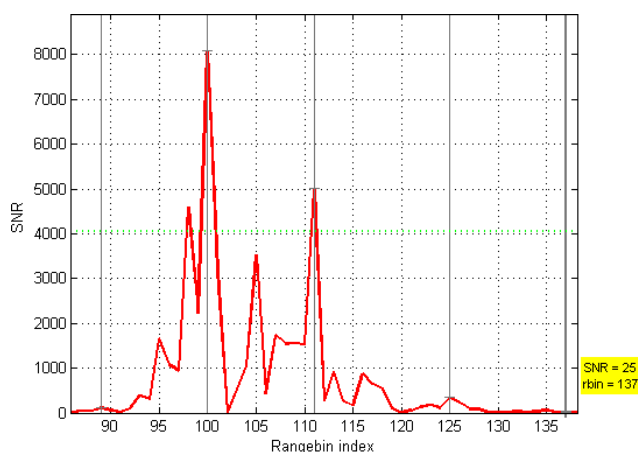
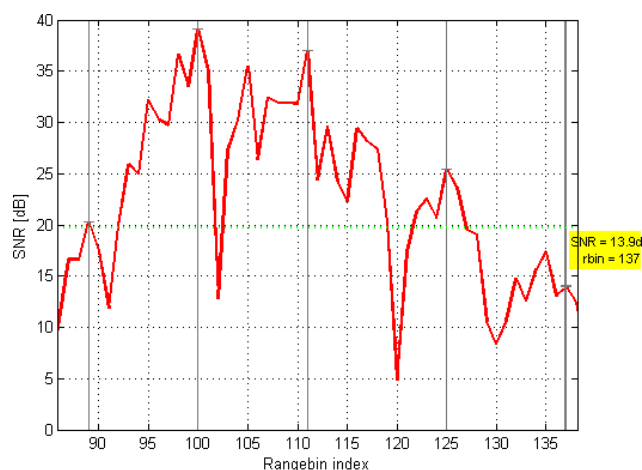
Foto 1: Pohled na komín ze severozápadu



Foto 2: Detail kovových žebříků ze severovýchodu

3. Postup měření

Sledování vodorovných pohybů komína bylo provedeno dne 18.10.2012 při středně silném severovýchodním větru. Stanovisko radaru bylo umístěno od komína přibližně po směru větru tak, aby kovový žebřík na

Graf 1: Profil odrazivosti vyjádřený lineárním SNR_e Graf 2: Profil odrazivosti vyjádřený logaritmičným SNR_e

Po jejich výběru byly exportovány a vypočteny jejich parametry (viz. násl. tabulka):

Tabulka 1: Parametry rozlišovacích buněk vybraných k vyhodnocení

Rozlišovací buňka č.	R [m]	SR [m]	SNR_e [dB]	σ_{d_R} [mm]	E	σ_E/E [%]	σ_d [mm]
89	65,8	30,9	20,3	0,0950	1,13	0,4	0,107
100	74,0	45,9	39,1	0,0110	1,27	0,4	0,014
111	82,2	58,2	37,0	0,0139	1,42	0,4	0,020
125	92,7	72,2	25,4	0,0530	1,60	0,4	0,085
135	101,7	83,5	13,9	0,1984	1,75	0,4	0,347

Hodnoty R, SR, SNR_e , σ_{d_R} a E jsou výstupy programu IBIS Data Viewer, další hodnoty jsou vypočteny. Význam veličin v tabulce je následující:

R ... šikmá délka měřená radarem.

SR ... výška v místním systému (z angl. Structure Range).

SNR_e ... odhadnutý poměr signálu k šumu.

σ_{d_R} ... směrodatná odchylka pohybu ve směru záměry určené ze SNR_e .

E ... projekční faktor ($E = h/R$).

σ_E/E ... poměr směrodatné odchylky projekčního faktoru ku projekčnímu faktoru v procentech. Směrodatná odchylka projekčního faktoru byla určena pomocí vzorce:

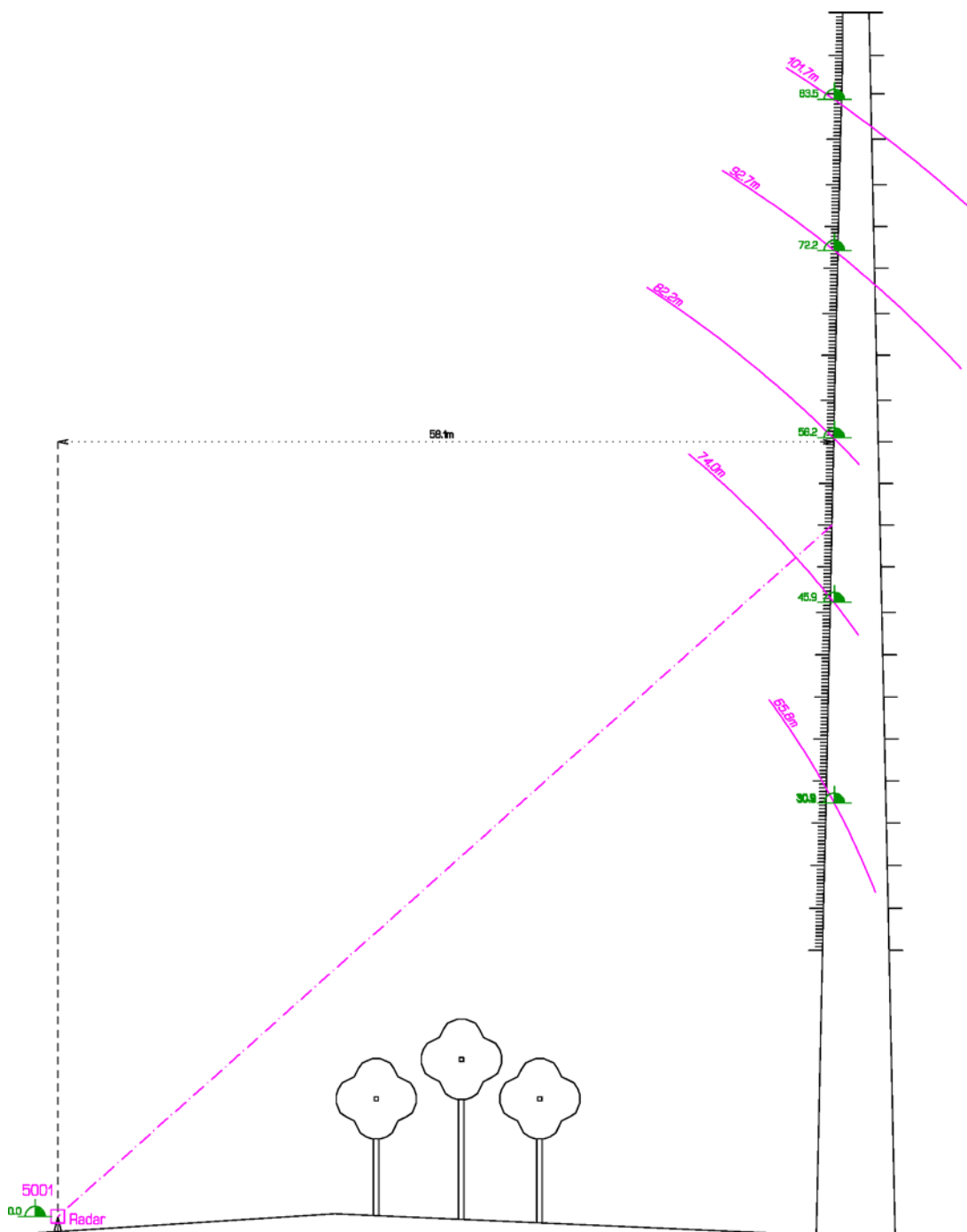
$$\sigma_E = \frac{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_h^2 \frac{R^2}{h^2}}}{h}$$

kde $\sigma_h = 0,2m$ a $\sigma_R = \Delta R/2t$, kde $\Delta R = 0,75m$ a $t = 2$. Mál hodnoty poměru σ_E/E dokazují, že projekční faktor je možno dostatečně přesně určit i z geometrických parametrů R a h zaměřených s přesností několika decimetrů.

σ_d ... směrodatná odchylka vodorovného pohybu ve směru záměry promítnutého projekčním faktorem ($d = d_R E$) určená při zanedbání σ_E pomocí vzorce $\sigma_d = \sigma_{d_R} E$.

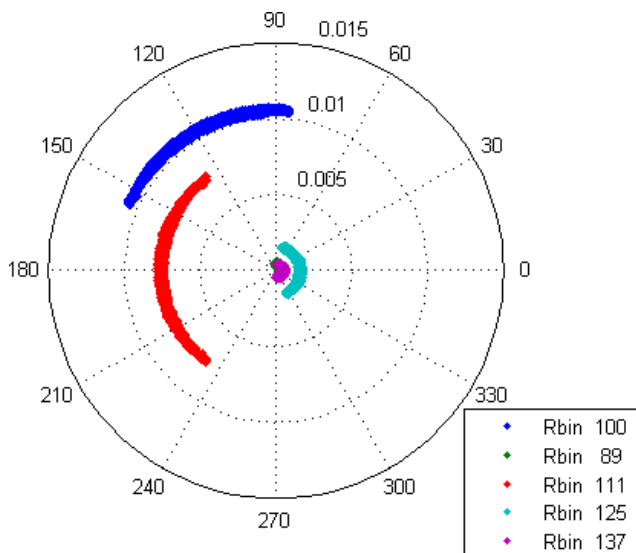
Dále je nutno nalézt na komínu místa odrazu odpovídající vyhodnocovaným radiálním spádovým oblastem

(provést identifikaci radiálních spádových oblastí radaru). Radarový signál se může odrazet od kovových příček komínu nebo přímo od povrchu komínu (např. spár mezi cihlami). Protože jednotlivé příčky žebříku i spáry cihel se nacházejí na komínu v malých rozestupech (příčky žebříku jsou od sebe vzdáleny pouze 26 cm a rozdíl šikmých délek mezi radarem a sousedními příčkami je ve střední části komína pouhých 16cm), obsahuje jedna radiální spádová oblast radaru ($\Delta R = 0,75\text{m}$) více malých odrazných ploch a přijatý signál každé rozlišovací buňky je součtem odrazů od všech odrazných ploch v této radiální spádové oblasti. Místo odrazu radarového signálu na komínu je pak možno přibližně určit jako průsečík kružnice o poloměru radiální spádové oblasti měřené radarem (R) s pláštěm komína zaměřeným polární metodou, jak je znázorněno v následujícím bokorysu. Výšky míst odrazu vypočtené na základě zadaných geometrických parametrů je možno exportovat přímo z programu IBIS Data Viewer.

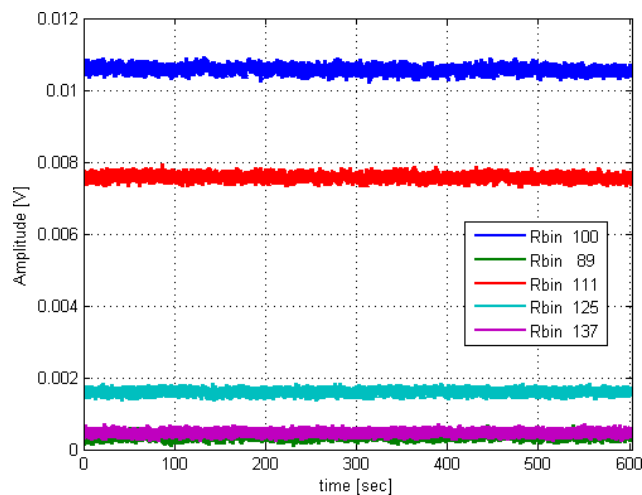


Obr. 2: Umístění a orientace radaru a sledovaných míst na komínu

Dalším krokem je kontrola kvality naměřených dat. V tabulce 1 jsou patrné značné rozdíly směrodatných odchylek vodorovných pohybů komína. Směrodatné odchylky pohybů míst odrazu v radiálních spádových oblastech č. 100 a 111 jsou výrazně nižší než u ostatních radiálních spádových oblastech. Příčinou je velká amplituda přijatého signálu, což jasně ukazují následující grafy.



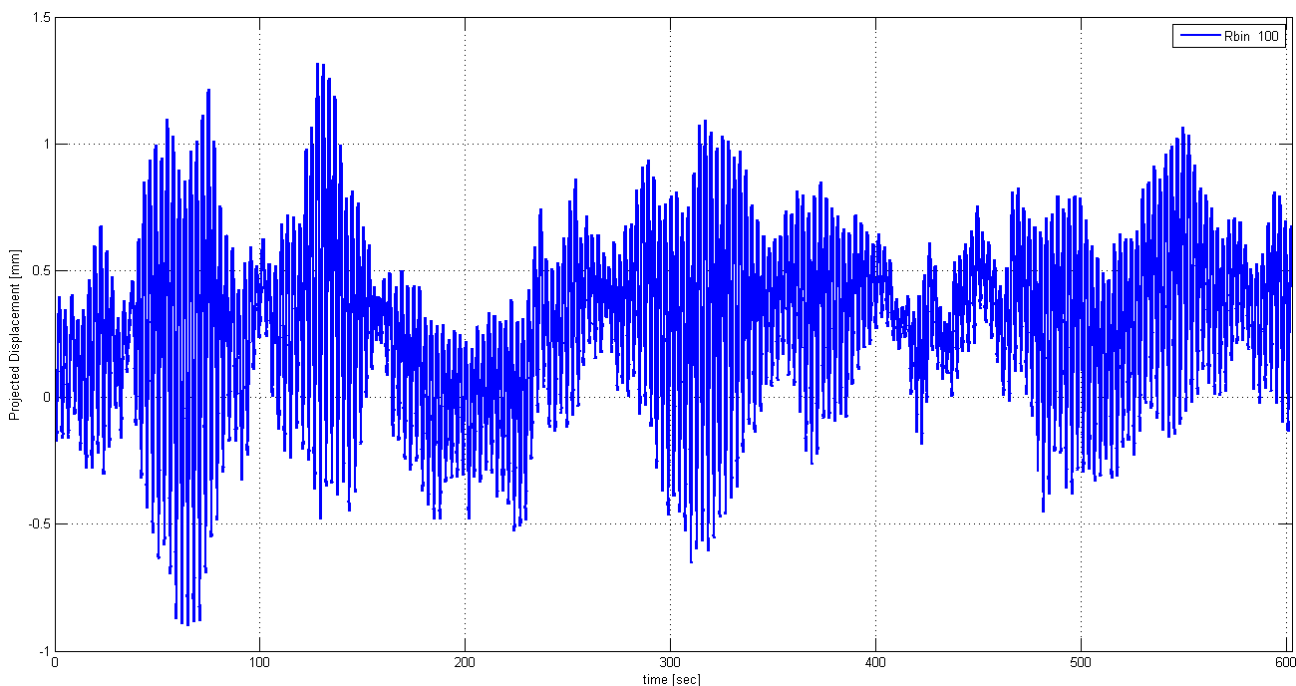
Graf 3: Polární graf amplitudy a fázového posunu přijatého signálu



Graf 4: Závislost amplitudy přijatého signálu na čase

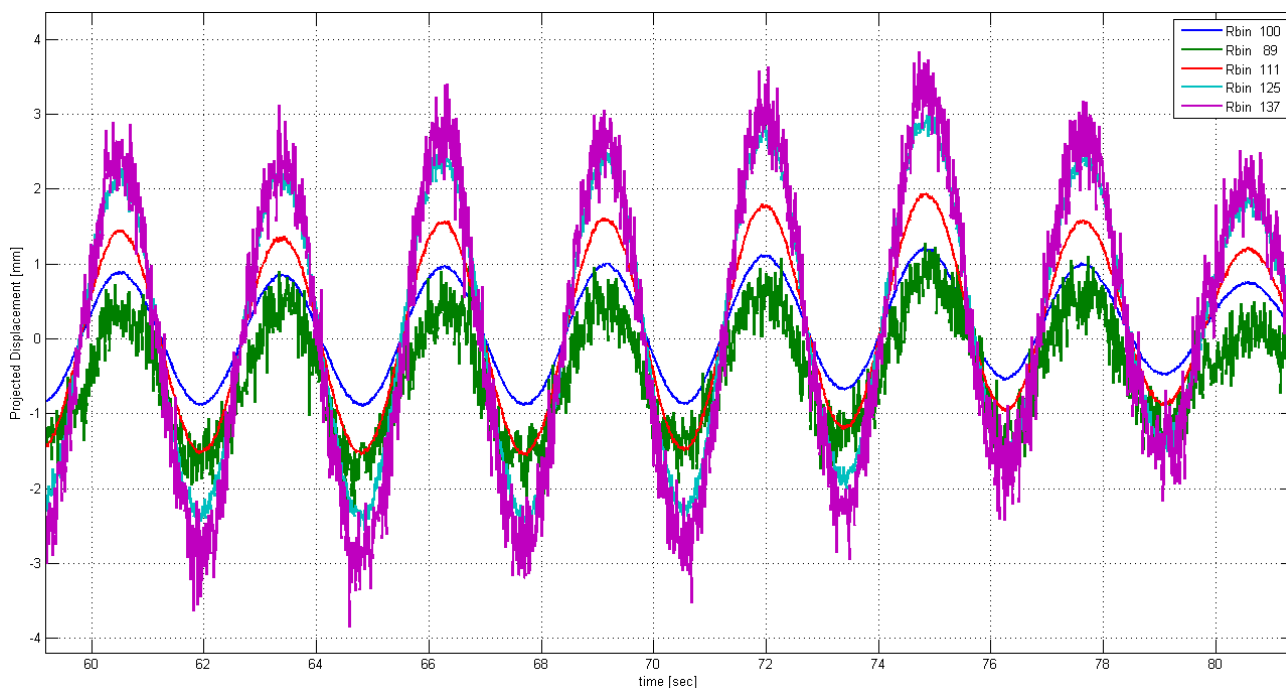
Nejvyšší amplitudu přijatého signálu mají sledovaná místa, která jsou nejbližší střední záměrné přímce radaru (podélné ose antén). Na polárním grafu jsou také patrné shluky bodů ve tvaru C, které indikují kmitání sledovaných míst na komínu.

Vlastním výsledkem měření jsou vodorovné pohyby sledovaných míst na komínu ve směru záměry, které jsou zobrazeny na následujícím grafu. Z důvodu přehlednosti je zobrazen pouze graf pro sledované místo v radiální spádové oblasti č. 100.



Graf 5: Vodorovné pohyby ve směru záměry sledovaného místa na komínu v radiální spádové oblasti č. 100

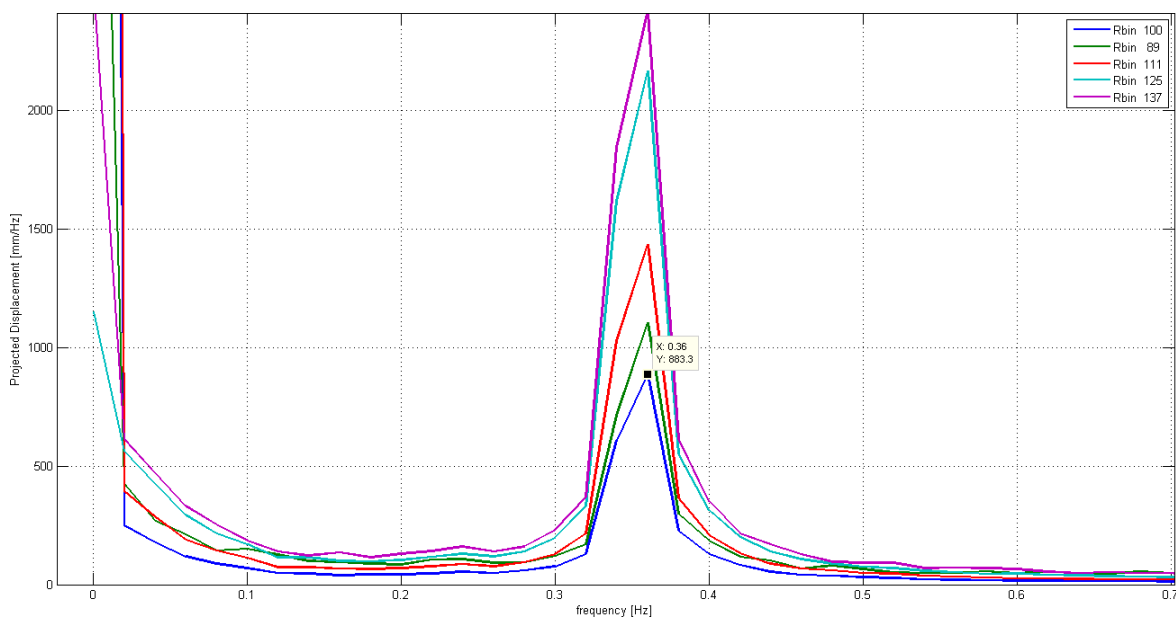
Na grafu je po celou dobu měření patrné kmitání sledovaných míst na komínu. Velikost amplitudy a střední polohy je proměnlivá a závisí zřejmě na proměnlivé síle a směru větru působící na sledovaný komín. K podrobnější analýze pohybů všech sledovaných míst na komínu je nutno zobrazit tento graf pro kratší časové období:



Graf 6: Vodorné pohyby sledovaných míst na komínu ve směru záměry v čase 59 až 81s od začátku měření

Z grafu je patrné, že všechna sledovaná místa na komínu kmitají se stejnou frekvencí a velikost amplitudy kmitání se zvětšuje s výškou sledovaného místa na komínu. Dále je zřejmý výrazný rozdíl přesnosti určení pohybů jednotlivých sledovaných míst. S nejvyšší přesností je určen pohyb u sledovaných míst v radiálních spádových oblastech č. 100 a 111. V ostatních radiálních spádových oblastech je patrný vyšší šum.

Frekvenci kmitání komínu je možno přesně odečíst z periodogramu pohybů:



Graf 7: Periodogram vodorných pohybů ve směru záměry

Na něm je u všech sledovaných míst na komínu znatelná výrazná frekvence kmitání 0,36 Hz, tj. cca 7 kmitů za 20 vteřin. Tato frekvence odpovídá kmitání znázorněnému na grafu vodorovných pohybů sledovaných míst na komínu (grafu 6).

6. Závěr

Výše popsaným měřením bylo ověřeno, že pozemním interferometrickým radarem je možno úspěšně sledovat vodorovné pohyby zděných komínů, jsou-li k tomuto měření vhodné podmínky, zejména při dostatečně silném větru. Vítr by měl být přibližně tak silný, aby u nejnižšího odrazného místa (30,9m) byl zaznamenán měřitelný výkyv (alespoň 0,5mm). Odrazivost zděného komína s kovovým žebříkem je specifická v tom smyslu, že nelze jednoznačně identifikovat místa odrazu. Povrch komína má velmi nízkou odrazivost. Kovový žebřík kvalitu odrazu sice poněkud zlepšuje, ale pravidelný rozestup příček je natolik malý (26 cm), že žebřík neposkytuje dostatečně vzdálená charakteristická odrazná místa v různých radiálních spádových oblastech (Rbin) o velikosti radiální rozlišovací schopnosti radaru ($\Delta R = 0,75$ m). Msta odrazu radarového signálu na komínu je tedy možno určit pouze geometricky za pomoci doplňkových měření (viz obr. 2). Poměr signálu k šumu a tedy i přesnost určení pohybů odrazných míst na komínu klesá s jejich vzdáleností od střední záměrné příčky, protože signál odražený od komína není ničím rušen (komín se tyčí do volného prostoru. Proto lze vyhodnotit i odrazná místa s relativně slabým odrazem. Měření zděných komínů s kovovými žebříky je tedy obzvláště citlivé na specifické podmínky konstrukčního charakteru komína, geometrické konfiguraci radaru vůči komínu i na povětrnostní situaci.

Zpráva o polní komparaci interferometrického radaru IBIS-S

Ing. Tomáš Hauser

Komparace interferometrického radaru probíhala v zimním období koncem roku 2012 v polních podmínkách. K ověření technologie radarové interferometrie bylo měření prováděno dvěma nezávislými metodami. Jedna metoda je založena na radarovém interferometrickém měření změn délky testovací základny. Druhá metoda se opírá o geodetické určení délky téže testovací základny dálkoměrem totální stanice SOKKIA NET1AX. Oba přístroje byly zacíleny na speciální mikrometrické zařízení, na němž byl umístěn kovový koutový odražeč pro radar a skleněný odrazný minihranol pro dálkoměr. Oba odrazné prvky byly pevně spojeny a společně připevněny k mikrometrickému šroubu, který ovládal jejich posuvný pohyb vůči oběma zacíleným přístrojům. Rozlišovací schopnost mikrometrického šroubu je 0.01 mm, což umožňuje dostatečně přesně nastavovat posuny pro radar i dálkoměr. Konstrukce mikrometrického zařízení s koutovým odražečem a minihranolem je patrná na obrázku č. 1.



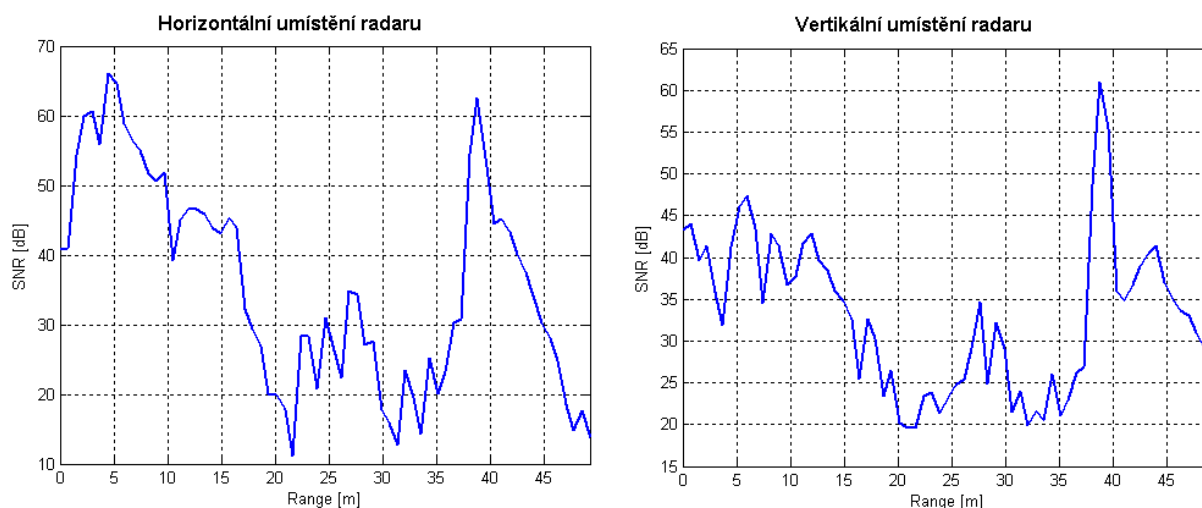
Obr. 1: Mikrometrické zařízení opatřené koutovým odražečem

Testování probíhalo v polních podmínkách (obrázek č. 2). Cílem bylo ověřit funkčnost technologie v terénu. Parametry snímání radaru byly nastaveny následovně: frekvence 10 Hz, dosah 50 m, rozlišení vzdálenosti 75 cm. Délka testovací základny byla zvolena na 39 m. Totální stanice byla nastavena na přesné měření vzdálenosti a cílení. Záznam měřené vzdálenosti probíhal jenom při změně měřené vzdálenosti. Na radar byly namontovány antény typu 5.



Obr. 2: Pohled na místo komparace ve směru záměry

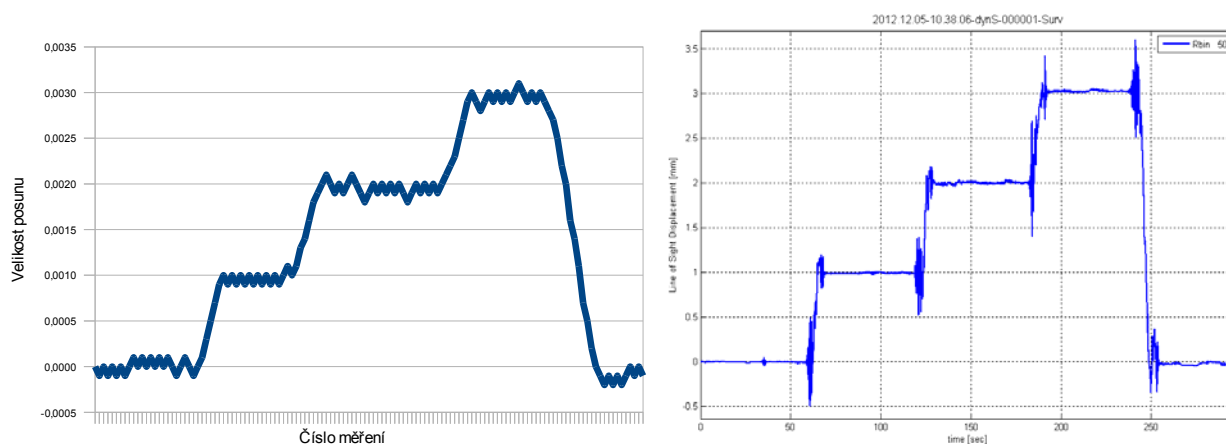
Nejlépeších výsledků bylo dosaženo při náklonu radaru do svislé polohy. Důvodem je charakteristika parametrů antény, jejíž záběr je 39° ve vertikálním směru a 12° v horizontálním směru. Při vodorovném umístění radaru byla do snímaného území zahrnuta větší část okolního terénu než při vertikálním náklonu. To způsobilo šum v signálu odraženém od sledovaného cíle. Přítomnost velkého množství odraženého signálu mimo cílovou spádovou oblast je patrná z obrázku č.3.



Obr. 3: Grafy radiálních odrazivostí

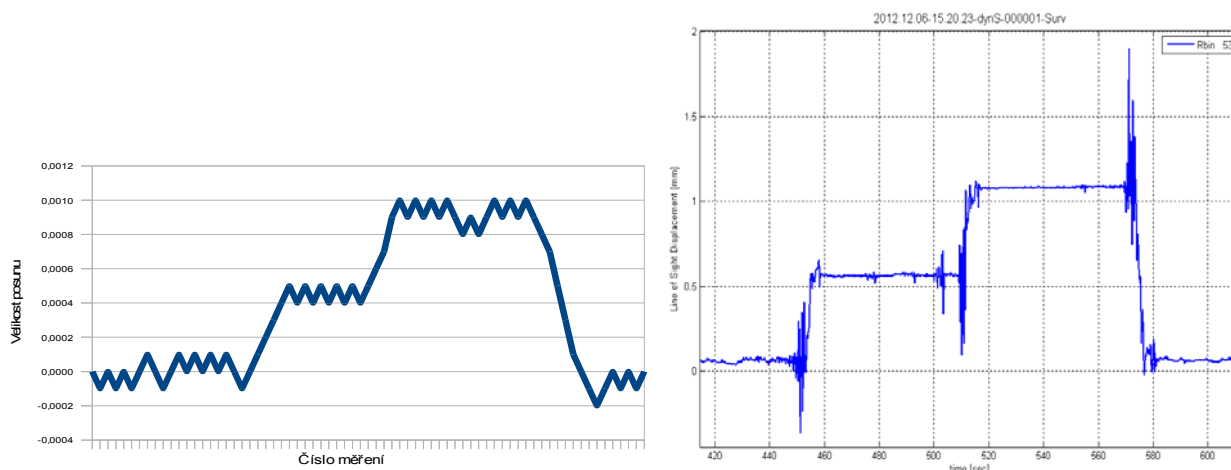
Testovací měření probíhalo ve třech etapách. V první etapě byly mikrometrickým šroubem vyvolány 3 posuny o velikosti 1mm ve směru od radaru, pak posun o 3mm ve směru zpátky k radaru. V druhé etapě byly vyvolány mikrometrickým šroubem 2 posuny o velikosti 0,5mm ve směru od radaru a pak posun o 1mm zpátky k radaru. Třetí etapa uvažovala 5 posunů o velikosti 0,1mm ve směru od radaru a jeden posun o 0,5mm ve směru k radaru.

Posuny byly vyvolávány v intervalu 60 sekund. První etapa je zobrazena na obrázku číslo 4. V levé části je graf posunů měřených totální stanicí, v pravé části jsou zobrazeny posuny měřené technologií radarové interferometrie. Je patrné, že data naměřená technologií radarové interferometrie odpovídají hodnotám měřeným totální stanicí a hodnotám odečteným na mikrometru. Přesnost měření totální stanicí můžeme prohlásit za nižší.



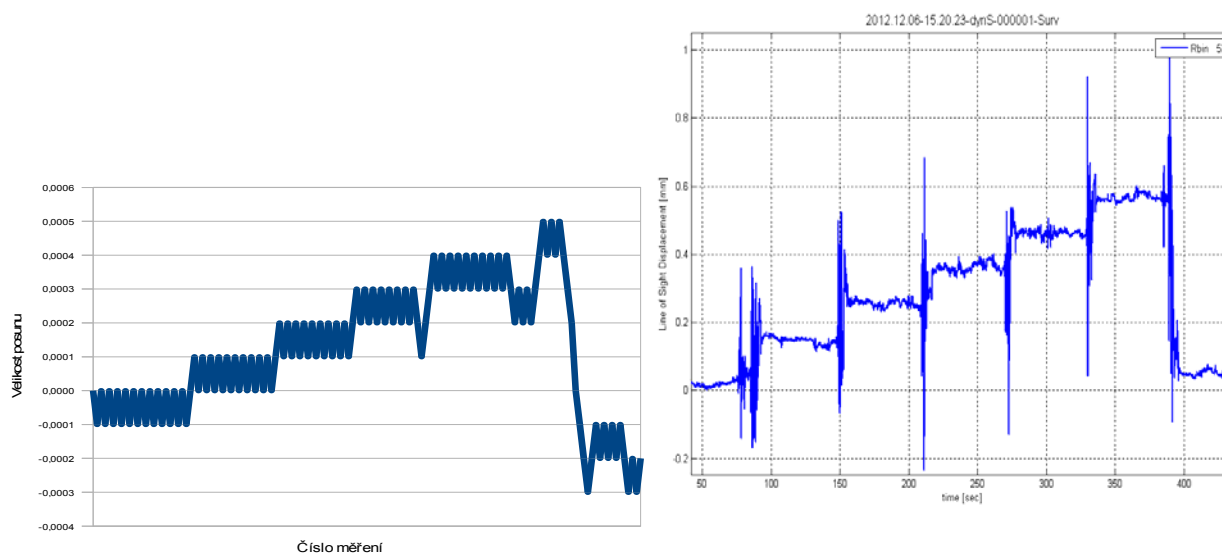
Obr. 4: Grafy posunů o velikosti 1mm měřeny totální stanicí (vlevo) a radarem (vpravo)

Druhá etapa je zobrazena na obrázku číslo 5. Opět je patrné, že přesnost dosažená technologií radarové interferometrie překonává klasickou metodu a to již výrazněji než v první etapě.



Obr. 5: Grafy posunů o velikosti 0,5mm měřeny totální stanicí (vlevo) a radarem (vpravo)

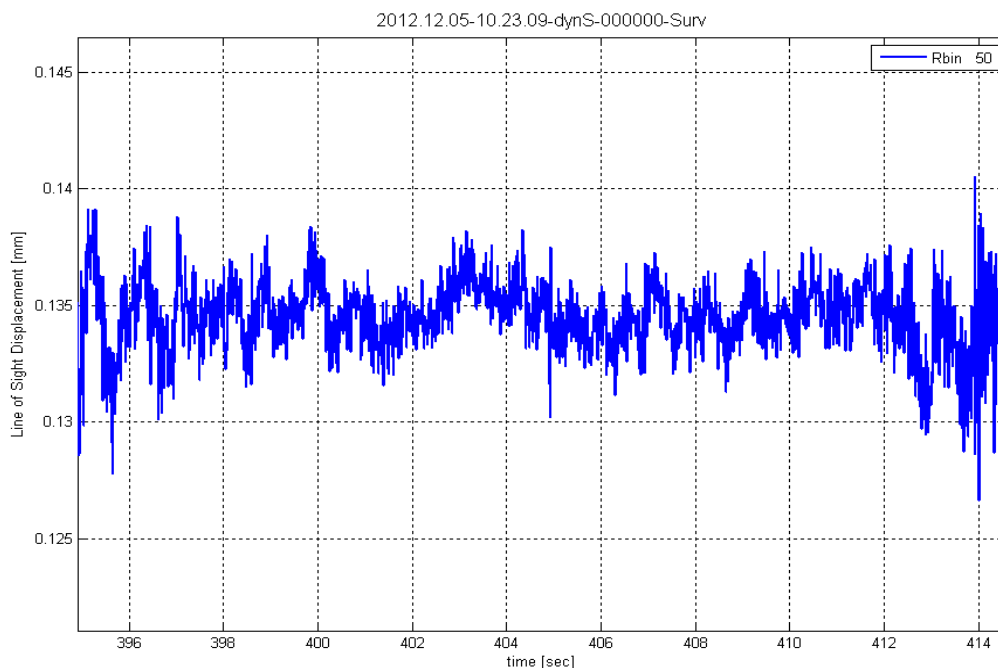
Třetí etapa je zobrazena na obrázku číslo 6. Klasická metoda při měření posunů selhává, jak je patrné z předposledního posunu. Technologie radarové interferometrie spolehlivě změřila posuny o velikosti 0,1mm a to s maximálním rozptylem 0,05mm.



Obr. 6: Grafy posunů o velikosti 0,1mm měřeny totální stanicí (vlevo) a radarem (vpravo)

Šum (výrazné změny posunů) vyskytující se v době, kdy byly posuny vyvolávány mikrometrickým šroubem, je způsoben přítomností figuranta vyvolávajícího posuny a jeho dotykem na mikrometrický šroub. Větší výchylky v klidové době mimo realizace posunů byly způsobeny projížděním aut na blízké silnici. Drobný šum je způsoben odrazy radarového signálu z okolí cíle.

Vnitřní šum přístroje je patrný z obrázku číslo 7 a pohybuje se řádově v setinách milimetru.



Obr. 7: Vnitřní šum radaru v klidové fázi

Funkčnost technologie byla ověřena v polních podmínkách. Testovacím měřením byla dosažena požadovaná přesnost a je proto možno konstatovat, že tuto technologii lze použít k bezkontaktnímu sledování posunů s dosažením přesnosti až 0,05mm. Dosažená přesnost závisí na podmínkách měření a situaci v terénu.