

Ověřená technologie určování vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem

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

Obsah

1. Úvod	1
2. Teoretický úvod do radarové interferometrie	1
2.1. Základní principy	1
2.2. Základní rozbor přesnosti	4
3. Přístrojové vybavení a jeho technické parametry	5
4. Obecné zásady	6
5. Postup měření	6
5.1. Přípravné práce a rekognoskace	6
5.2. Sledovaná místa a jejich signalizace	7
5.3. Doba měření a povětrnostní podmínky	7
5.4. Umístění radaru	7
5.5. Volba antén a zacílení radaru	7
5.6. Provedení měření radarem	8
5.7. Doplnková měření	9
5.8. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu	9
6. Zpracování a vyhodnocení měření	9
6.1. Zpracování měřených dat	9
6.2. Identifikace a výběr bodů k vyhodnocení	10
6.3. Analýza a vyhodnocení výsledků	10
6.4. Způsob dokumentace výsledků	11
7. Závěr	11
8. Seznam použité literatury	12
9. Seznam příloh	12

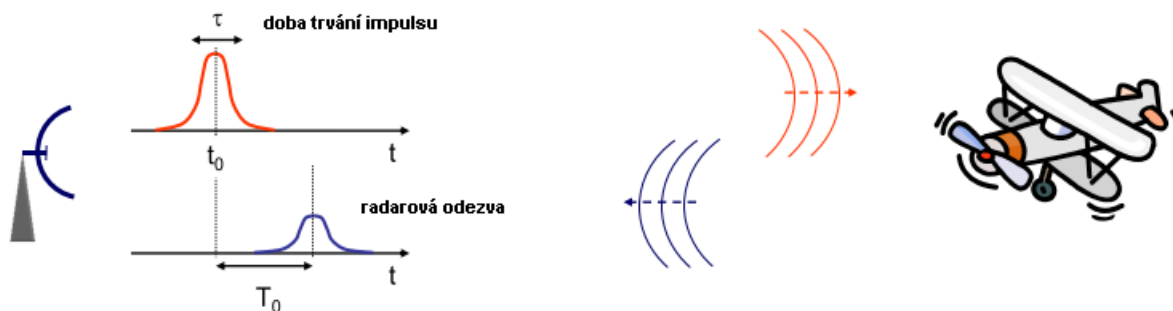
1. Úvod

Tento dokument popisuje ověřenou technologii pro měření vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem. Tato nová technologie umožňuje měřit pohyby v několika sledovaných bodech vodojemu současně. Měření probíhá kontinuálně s vysokou vzorkovací frekvencí (až 200 Hz) a vysokou přesností (až 0,01mm). S využitím přirozených odrazečů radarového signálu na sloupu vodojemu je možno pohyby měřit na dálku bez nutnosti přístupu k vodojemu.

2. Teoretický úvod do radarové interferometrie

2.1. Základní principy

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** .

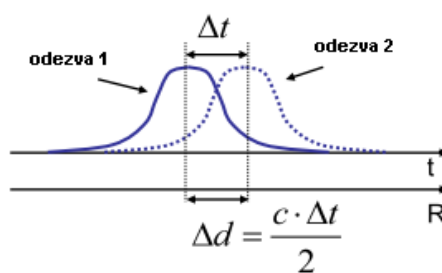
Vzdálenost je určena pomocí rychlosti světla c podle vztahu

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

kde T_0 představuje opoždění odezvy. Koncepti radiálního rozlišení vyjadřuje vzorec

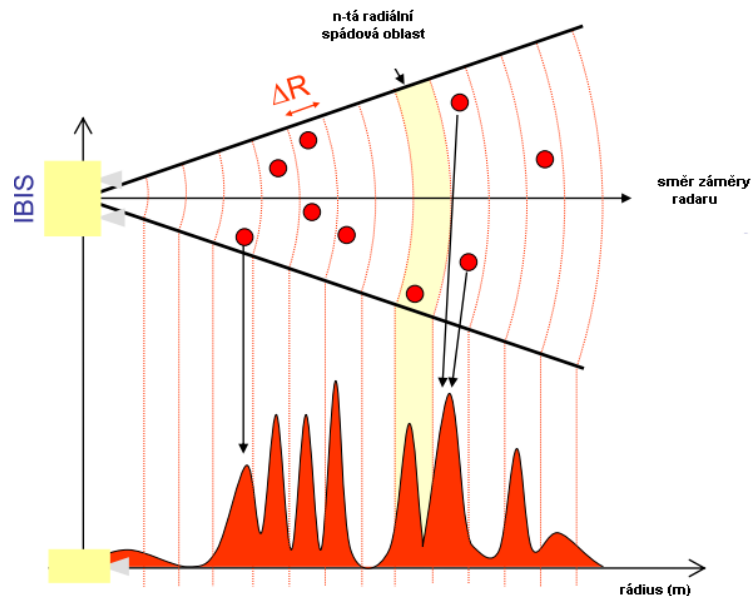
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2},$$

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):

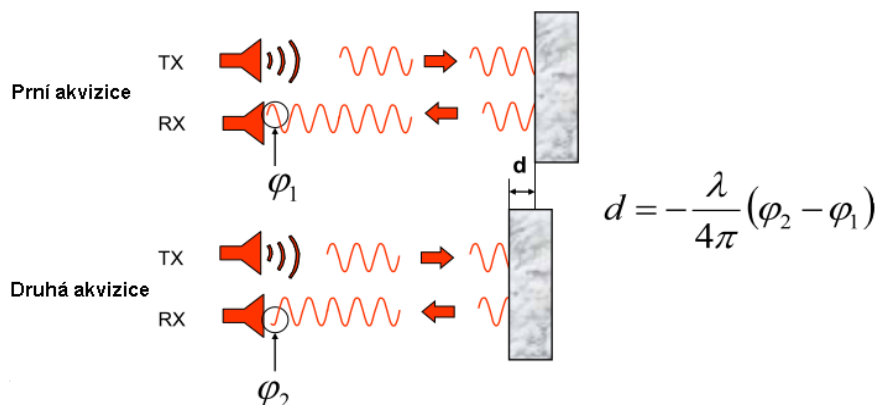
$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{\text{šum}}} \right)^2,$$

kde P_{signal} je výkon přijatého signálu, $P_{\text{šum}}$ je výkon přijatého šumu, A_{signal} je amplituda přijatého signálu a $A_{\text{šum}}$ je amplituda přijatého šumu.

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

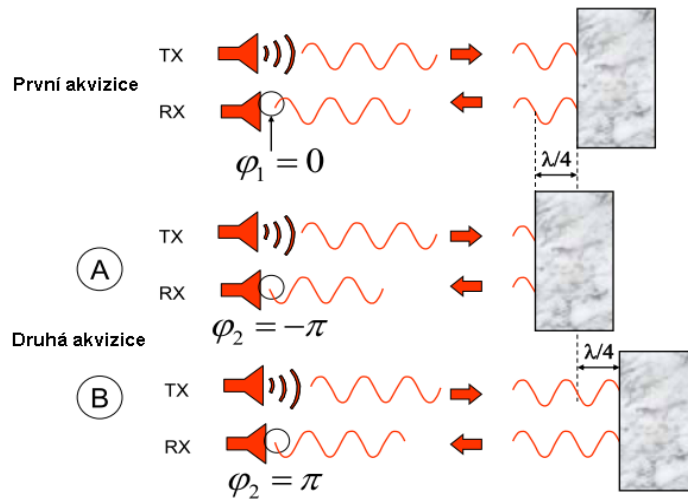
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{\text{šum}}} \right)$$

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



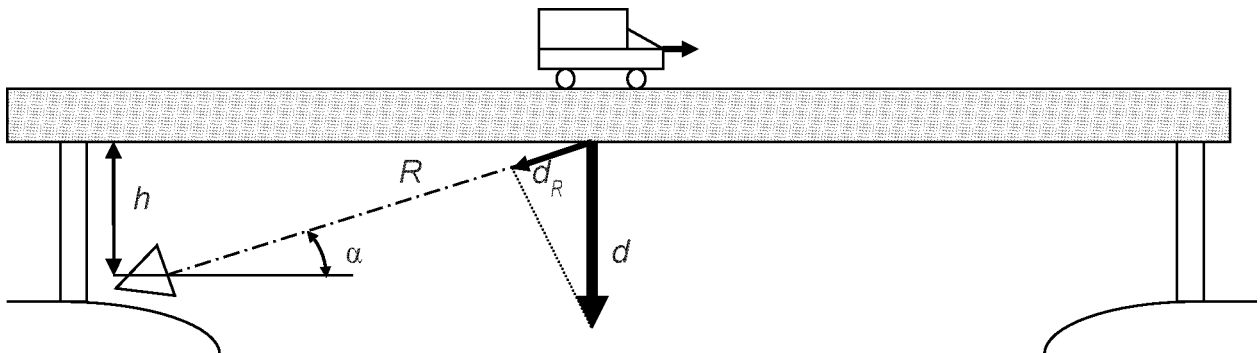
Obr. 4: Princip diferenční interferometrie

Maximální měřitelný posun mezi dvěma 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

2.2. Základní rozbor přesnosti

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

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

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

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

kde SNR je prostý (nelogaritmický) poměr signálu k šumu. SNR se vyjadřuje dvěma základními způsoby a to tepelným SNR_t a odhadnutým SNR_e. Odhadnutý poměr signálu k šumu SNR_e je určen na základě variance amplitudy měření a je vhodný pro odhad přesnosti měření. Směrodatnou odchylku pohybu ve směru záměry lze tedy vyjádřit vzorcem:

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

Pro promítnutý pohyb pak platí:

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

kde E=R/h je tzv. projekční faktor, R je vzdálenost měřena radarem a h je v případě vodorovných pohybů vodorovná délka mezi počátkem radiálních spádových oblastí a sledovaným bodem. Přesnost promítnutého pohybu d závisí na přesnosti pohybu ve směru záměry d_R a na projekčním faktoru E a jeho přesnosti. Směrodatná odchylka pohybu ve směru záměry je odvozena výše, směrodatná odchylka projekčního faktoru je:

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

Směrodatná odchylka 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 většinou tak malá, že je možno ji zanedbat a směrodatnou odchylku promítnutého pohybu počítat ze zjednodušeného vzorce:

$$\sigma_d = \sigma_{d_r} E$$

3. Přístrojové vybavení a jeho technické parametry

Pro měření se používá vysoce stabilní koherentní pozemní interferometrický radar např. typ IBIS-S. Radar IBIS-S pracuje v mikrovlňném pásmu se střední frekvencí 17GHz. Při měření lze radar nastavit do dvou pracovních režimů: statického a dynamického. Při dynamickém režimu radar snímá odražené signály se vzorkovací frekvencí od 10 do 200Hz. Snímací frekvenci je možno zvolit dle požadovaných nároků na podrobnost výsledků měření, 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). Dosah měření radarem je možno dle potřeby zvolit až do maximální hodnoty 1km. Směrodatná odchylka radarem zaměřených pohybů dle údajů výrobce v ideálních podmínkách až 0,01mm. Rozlišovací schopnost jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, je 0,75m (šířka radiální spádové oblasti). K radaru IBIS-S je dodávána anténa typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39). Horizontální vyzařovací úhel této antény je 12° při ztrátě 3dBi (50%) a 25° při ztrátě 10dBi (90%). Vertikální vyzařovací úhel je 39° při ztrátě 3dBi (50%) a 69° při ztrátě 10dBi (90%). K radaru je v případě potřeby možno připevnit i další typy antén, které se liší zejména horizontálním a vertikálním vyzařovacím úhlem. Ovladač radaru tvoří odolný notebook s programem IBIS Surveyor (dříve IBIS-S Controller). Ke zpracování měření je výrobcem dodáván

program IBIS Data Viewer. Radar je upevněn na tzv. 3D hlavě Manfrotto, která je původně určená pro kamery. 3D hlava umožňuje otáčení radaru podél svislé osy a náklon ve dvou kolmých směrech. 3D hlavu je možno upevnit pomocí šroubu k těžkému fotostativu Manfrotto (taktéž dodávaného výrobcem). Ke geodetickému stativu je lze upevnit pomocí adaptéru z menšího šroubu 3D hlavy na větší šroub geodet. stativu příp. pomocí podobného adaptéru do geodetické trojnožky. K signalizaci sledovaných bodů se používají koutové odražeče různých velikostí, nejčastěji hliníkové či nerezové.

Pro doplňková měření se použije totální stanice s možností měření délek bez hranolu, pásmo, příp. ruční dálkoměr apod.

4. Obecné zásady

Pozemní interferometrický radar je senzor, který měří pouze relativní pohyby ve směru záměry vztažené k počáteční příp. jiné hodnotě pohybu v průběhu měření. Maximální velikost pohybu mezi dvěma po sobě následujícími časy záznamu je omezena určitou mezní hodnotou. Z toho vyplývají určité zásady a omezení jeho používání:

- a) Radar není schopen zaznamenat pohyby kolmé na záměrnou přímkou (resp. pohyby po kulové ploše se středem v počátku radiálních spádových oblastí).
- b) V rámci společného souřadného systému nelze obecně spojovat a porovnávat výsledky dynamických měření provedených radarem v různých časech, tedy etapová měření.
- c) Radarem měřené pohyby ve směru záměry jsou při vyhodnocení promítány do vodorovného či svislého směru na základě volby uživatele. Je-li směr pohybu sledovaného objektu resp. bodu ve skutečnosti jiný, než uživatelem zvolený směr, dochází k chybnému vyhodnocení, které nelze odhalit. Např. pohybuje-li se sledovaný objekt resp. bod svisle, projeví se tyto pohyby také ve směru záměry. Předpokládá-li pak uživatel správně, že se objekt resp. bod pohybuje svisle, provede při vyhodnocení promítnutí radarem měřených pohybů ve směru záměry do pohybů svislých a vyhodnotí pohyby sledovaného objektu resp. bodu správně. Předpokládá-li ovšem chybně, že se objekt resp. bod pohybuje vodorovně, provede při vyhodnocení promítnutí radarem měřených pohybů ve směru záměry do pohybů vodorovných a vyhodnotí pohyby sledovaného objektu resp. bodu chybně. K výše uvedeným chybám může částečně dojít také v případě, pohybuje-li se sledovaný objekt resp. bod šikmým směrem, tj. částečně vodorovně a částečně svisle.
- d) Maximální hodnota pohybu mezi dvěma po sobě následujícími časy záznamu je dána maximální hodnotou fázového rozdílu, kterou je možno vyhodnotit, tj. $\Delta\varphi = \pm\pi$ ($\pm 4,38\text{mm}$ při $\Delta R = 0,75\text{m}$). Při překročení této hodnoty dojde k chybnému výpočtu velikosti pohybu a znehodnocení výsledku měření. Tuto chybu nelze odhalit.

5. Postup měření

5.1. Přípravné práce a rekognoskace

Před začátkem vlastního měření je nutná prohlídka neboli rekognoskace vodojemu a jeho okolí. Při ní se zjistí zejména přístupové cesty, přístupnost, překážky ve výhledu a přítomnost a rozstup přirozených odražečů na vodojemu např. spojů na jeho nosném sloupu. Dále se např. z informační cedule nebo na internetu zjistí technické parametry věžového vodojemu, zejména výška a informace o tom, zda je vodojem stále v provozu a zda je pravděpodobné, že obsahuje vodu.

5.2. Sledovaná místa a jejich signalizace

Věžové vodojemy se zpravidla skládají z nosné části a nádrže. Moderní věžové vodojemy jsou tvořeny většinou kovovým nosným sloupem a kovovou nádrží kulového či diskového tvaru. Kovové sloupy těchto vodojemů jsou zpravidla tubusové složené z několika sekcí, jejichž délka je řádově v desítkách metrů. Sekce jsou pak složeny z prstenců jejichž délka je řádově v jednotkách metrů. Spoje sekcí a příp. i prstenců vystupují nad povrch stožáru a tvoří potenciální přirozené odražeče radarového signálu. Pokud těleso věžového vodojemu, případně kovové části na něm upevněné, neposkytují dostatečně kvalitní odraz, je nutné na vhodná místa upevnit koutové odražeče.

5.3. Doba měření a povětrnostní podmínky

Sledování vodorovných pohybů vodojemů je vhodné provádět v době, kdy se vodojem pohybuje, tj. za působení větru. Měření je nutno provádět za větru dostatečně silného a s neproměnlivým směrem. Délku měření je pak nutno zvolit dostatečně dlouhou, aby se zachytilo tlumení či zesilování kývání vodojemu a případné složené kmitání při proměnlivé síle větru. Délka měření ale nesmí být příliš dlouhá, aby měření nebylo příliš ovlivněno změnami atmosférických podmínek, deformacemi stativu, podloží, na němž je stativ umístěn apod. Dynamická měření radarem se obvykle provádějí po dobu řádově v desítkách minut.

5.4. Umístění radaru

Radar se umístí zpravidla na těžký dřevěný stativ na vhodné místo pod věžový vodojem. Je-li možnost volby mezi zpevněným a nezpevněným povrchem, volí se spíše zpevněný povrch. V chladnějším období je vhodné nechat stativ určitou dobu temperovat na teplotu okolního vzduchu. Na stativ nesmí v průběhu měření působit vibrace (stroje, doprava) a nesmí se jej dotýkat předměty ani lidé. Při delším měření za slunečního svitu je vhodné zastínit stativ s radarem slunečníkem apod.

Stanovisko radaru musí být umístěno po nebo proti směru větru od sloupu vodojemu. Vzdálenost radaru od paty sloupu vodojemu je určena třemi požadavky:

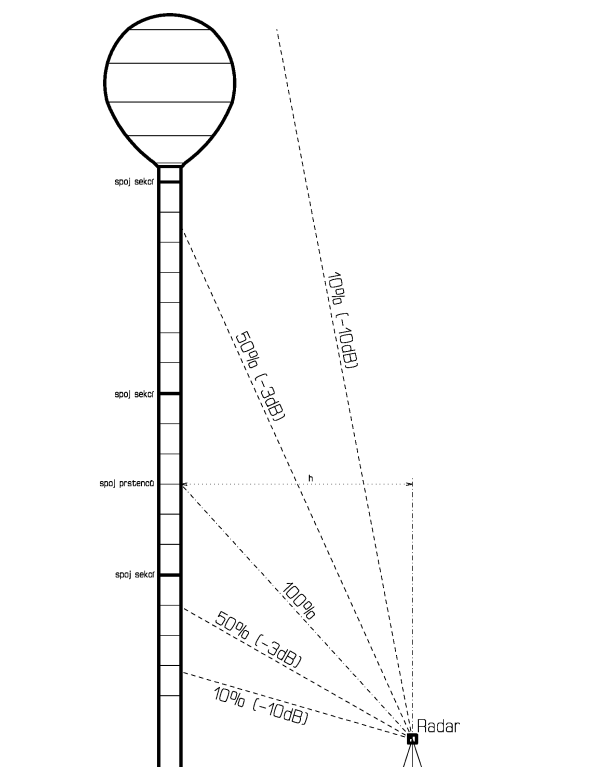
- 1) Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od paty sloupu vodojemu, aby byla dodržena vhodná geometrie při měření i na nejvyšší měřené body, tj. aby projekční faktor (poměr šikmé ku vodorovné vzdálenosti mezi středem rad. spád. oblastí přístroje a nejvyšším sledovaným bodem vodojemu) byl co nejmenší.
- 2) Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od paty sloupu vodojemu, aby spoje sloupu vodojemu nespadaly do stejných rad. spád oblastí, tj. aby rozdíly šikmých délek mezi radarem a sousedními spoji byly pokud možno co největší a ne menší než rozlišovací schopnost radaru 0,75m.
- 3) Radar se umístí do takové vzdálenosti od paty sloupu vodojemu, aby odrazy od spojů sloupu vodojemu byly dostatečně silné, tj. aby vzdálenosti mezi radarem a spoji byly co nejmenší.

Požadavek 1) ovlivňuje vzdálenost mezi radarem a patou sloupu vodojemu směrem nahoru (k vyšší hodnotám), požadavky č. 2) a 3) pak směrem dolů (k nižším hodnotám), výsledná při měření používaná hodnota vodorovné vzdálenosti mezi radarem a vodojemem je pak mezi $\frac{1}{2}$ až $\frac{1}{4}$ výšky nejvyššího sledovaného místa na vodojemu měřené od paty sloupu.

5.5. Volba antén a zacílení radaru

Pro měření věžových vodojemů se volí antény s širokým vertikálním rozsahem a úzkým horizontálním rozsahem. Vhodné jsou např. antény typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39). Radar se

puškohledem zacílí na vybraný bod např. spoj sloupu vodojemu, který se následně zaměří totální stanicí. Bod či spoj vybraný pro zacílení radaru je vhodné zvolit v horní polovině vodojemu. Spoje v horní polovině vodojemu jsou od radaru vzdáleny více než spoje v dolní polovině vodojemu a odrazy od nich jsou proto slabší. Je tedy lépe, když je střed záměrné přímky (osa antén) blíže vzdálenějším spojům, protože odraz slábne také s úhlem od střední záměrné přímky a vlivy vzdálenosti a úhlu od střední záměrné přímky na odraz se tímto způsobem u všech sledovaných bodů částečně vyrovnají. Během cílení je vhodné mít radar již zapnutý a na obrazovce ovladače sledovat měnící se profil odrazivosti při různých úhlech náklonu radaru a zvolit ten nejvhodnější.



Obr. 7: Umístění a orientace radaru při sledování pohybů věžového vodojemu

5.6. Provedení měření radarem

Zaměření vodorovných pohybů věžového vodojemu se provede v dynamickém pracovním režimu s vysokou snímací frekvencí, tak aby se podrobně zachytil pohyb vodojemu v čase měření. Při měření je potřeba zadat do programu IBIS Surveyor alespoň přibližné hodnoty geometrických parametrů a při vyhodnocení je upřesnit dle výsledků doplňkového měření. Větší pozornost je třeba věnovat pouze hodnotě dosahu radaru, protože ta určuje maximální vzdálenost zaznamenávaných dat. Dosah radaru je možno zvolit přímo podle profilu odrazivosti zobrazovaném programem IBIS Surveyor za poslední výrazné maximum poměru signálu k šumu. Hodnoty geometrických parametrů vkládané do programu IBIS Surveyor je možno zadat dle dříve zjištěných parametrů vodojemu (výška), odhadnout nebo orientačně změřit pásmem, ručním dálkoměrem atd. (vodorovná vzdálenost radaru a vodojemu) nebo odečíst ze stupnice hlavy stativu (sklon radaru). Nejdůležitějším parametrem pro vyhodnocení měření (určení projekčních faktorů) je vodorovná vzdálenost středu radiálních spádových oblastí přístroje a sledovaných bodů vodojemu. Pro délkovou rozlišovací schopnost musí být vždy zvolena hodnota 0,75m z důvodu dodržení potřebného pásma radarového signálu dle předpisů EU.

5.7. Doplnková měření

Doplňkové měření slouží k:

- 1) Určení geometrických parametrů pro vyhodnocení měření zadávaných do příslušného programu (IBIS Data Viewer).
- 2) Vytvoření měřických náčrtů – bokorysu a půdorysu.
- 3) Určení šikmých délek mezi počátkem radiálních spádových oblastí a sledovanými body na stožáru pro porovnání těchto délek s délkami měřeními radarem a identifikaci těchto bodů sledovaných radarem.

Doplňkové měření věžového vodojemu je možno provést polární metodou totální stanicí vybavenou dálkoměrem umožňujícím měření délek bez hranolu. Protože při měření věžového vodojemu je nutno naklonit dalekohled totální stanice do strmých úhlů, kdy je již obtížné prohlédnout okulárem dalekohledu, je vhodné vybavit totální stanici zalomeným okulárem či použít totální stanici vybavenou vestavěnou digitální kamerou s možností cílení na displeji. Totální stanice se umístí za radar přibližně na přímkou procházející radarem a středem stožáru, brání-li tomu překážky, zvolí se jiné místo. Totální stanicí se zaměří všechny spoje a významné prvky stožáru větrné elektrárny. Směry měřené totální stanicí je vhodné orientovat na známé referenční body v okolí nebo využít nasazovací kompas apod. Připojení do S-JTSK není nutné, měřické náčrtky mohou být vyhotoveny v místním souřadnicovém systému.

5.8. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu

V terénu je možno provést předběžné zpracování a vyhodnocení naměřených dat programem pro zpracování těchto dat (IBIS Data Viewer), který je nainstalovat např. do ovladače radaru (notebooku). Zpracování a vyhodnocení se provede podobným způsobem, jako závěrečné vyhodnocení v kanceláři.

6. Zpracování a vyhodnocení měření

6.1. Zpracování měřených dat

Nejprve je nutno provést výpočet polární metody, tj. dat měřených totální stanicí. Ze souřadnic počátků rad. spád. oblastí přístroje a zaměřených podrobných bodů na spojích stožáru je pak nutno vypočítat šikmé a vodorovné délky mezi těmito body, příp. i další údaje.

Dále je možno přistoupit k výpočtu pohybů měřených radarem. 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 geometrické parametry měření. Načtením datového souboru měřených dat do programu IBIS Data Viewer tento program převezme parametry nastavené v terénu do programu IBIS Surveyor. Protože v terénu jsou obvykle nastaveny pouze přibližné hodnoty, je možno do programu IBIS Data Viewer zadat přesnější hodnoty určené z výsledků doplňkového měření. Upřesnit je nutno zejména vodorovnou délky mezi počátkem rad. spád. oblastí a sledovaným objektem. K tomu poslouží vodorovné délky měřené nepřímo totální stanicí. Nejvhodnější je zadat hodnotu vodorovné délky na spoji na střední záměrné přímce radaru, kde byl radar zacílen. Ostatní parametry zpravidla není nutno měnit a lze ponechat přibližné hodnoty zadané v terénu, protože nemají přímý vliv na výpočet a určované pohyby. Poté je možno provést zpracování měření aktivací operace „Process“.

Program IBIS Data Viewer umožňuje při nastavení geometrických parametrů měření výběr mezi svislým a vodorovným typem objektu (most nebo věž). Protože program pravděpodobně obsahuje neošetřenou softwarovou chybu, které způsobují chybný výpočet projekčních faktorů a směru promítání pro objekty typu věž, je vhodné pro všechny objekty zpracovávat jako most a volit typ most. Pro výškové objekty to znamená otočení situace o 90° do vodorovné polohy. (Aktuální verze programu IBIS Data Viewer v době vyhotovení tohoto postupu je 03.04.015)

6.2. Identifikace a výběr bodů k vyhodnocení

Protože na tubusovém sloupu vodojemu se zpravidla nacházejí výrazné spoje sekcí, které tvoří dobré odražeče radarového signálu a jsou na sloupu vodojemu rovnoměrně rozloženy, je vhodné k vyhodnocení nejprve vybrat tyto konkrétní výrazné spoje a poté najít jejich odrazy na profilu odrazivosti. Odrazy od těchto spojů se na profilu odrazivosti projeví výraznými lokálními maximy. Porovnáním šikmých délek mezi počátkem rad. spád oblastí a totální stanicí zaměřenými podrobnými body na vybraných spojích a délek měřených radarem se pak potvrdí, že vybraná maxima jsou skutečně odrazy od vybraných spojů sloupu věžového vodojemu.

6.3. Analýza a vyhodnocení 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 nuly 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 rozlišovací buňce. Tuto funkci je v případě potřeby nutno aktivovat pro každou vyhodnocovanou rozlišovací buňku zvlášť. U věžových vodojemů ovšem zpravidla nedochází k tomu, že v některé vyhodnocované rad. spád. oblasti je přítomen stabilní odražeč, veškerý odraz je od pohybujícího se vodojemu, a použití této funkce by způsobilo jen malé změny výsledku a není tedy nutné.

Prvním výstupem dynamické analýzy je polární graf, který zobrazuje vztah fáze resp. fázového posunu a amplitudy přijatého signálu. Tento graf slouží zejména k posouzení kvality sledovaných bodů. Pokud se na polárním grafu zobrazí shluk bodů ve tvaru oblouku či kružnice s malým rozptylem v radiálním směru, znamená to, že v dané rozlišovací buňce je přítomen kvalitní odražeč, který se plynule pohybuje. Dalšími výstupy jsou kartézské grafy časové závislosti amplitudy 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 zvoleném rozsahu frekvencí. Je to spíše doplňkový nástroj k vizualizaci výsledků měření.

6.4. Způsob dokumentace výsledků

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

- 1) Tabulka základních parametrů k vyhodnocení vybraných radiálních spádových oblastí obsahující: vzdálenosti ke středům rad. spád 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 sloupu vodojemu ve vybraných radiálních spádových oblastech zachycující celou délku měření a detailní grafy zachycující vybrané časové úseky např. složené pohyby.
- 3) Periodogramy vodorovných pohybů s určením frekvence kmitání vodojemu.

Měřená a vyhodnocená data radaru typu IBIS-S je nutno pro případné budoucí použití uchovávat v nativních formátech programů IBIS Surveyor a IBIS Data Viewer. Exportovaná data pak nejlépe v obyčejném textovém souboru.

7. Závěr

Předkládaná technologie zahrnuje postup měření vodorovných pohybů věžových vodojemů 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 věžového vodojemu. Kvalita odrazů je zpravidla zajištěna přítomností spojů sekcí a příp. i prstenců nosného sloupu vodojemu, které vystupují nad jeho povrch a tvoří přirozené odražeče radarového signálu. Kvalitu odrazů také příznivě ovlivňuje skutečnost, že okolo věžových vodojemů se zpravidla nenachází jiné objekty, které by mohly odrážet radarový signál a způsobovat rušení signálu odraženého od vodojemu. Z geometrických parametrů je nejvýznamnější výška věžového vodojemu a vzdálenost radaru od paty sloupu vodojemu. Tyto parametry ovlivňují hodnoty projekčních faktorů u sledovaných bodů, na nichž závisí přesnost určení vodorovných pohybů věžového vodojemu. Pro sledování vodorovných pohybů věžových vodojemů touto technologií je nezbytné, aby na těleso vodojemu působily vnější síly, které vodojem uvedou do kmitavého pohybu. Nejčastějšími a zároveň i přirozenými silami, které na těleso vodojemu působí, jsou síly vyvolané povětrnostními podmínkami, zejména větrem. Pro zjištění maximálních vodorovných pohybů je tedy nutné, aby osa záměry radaru byla totožná se směrem kývání tělesa vodojemu a tedy i se směrem větru. Tyto podmínky jsou ve většině případů obtížně splnitelné, protože směr větru bývá často proměnlivý. Dalším faktorem, který ovlivňuje směr vodorovného pohybu vodojemu, je voda v nádrži vodojemu. Ta se v nádrži pohybuje v závislosti na v dané chvíli působící síle větru a také podle zákonů hydrodynamiky. U věžových vodojemů je proto nutné vzít v úvahu, že jejich aktuální pohyb je výsledkem skládání několika kmitů a trajektorie jejich pohybu v půdorysné rovině může být např. elipsa, osmička či jiný složitější tvar. Tento složitý pohyb ale nelze pouze jedním radarem zaměřit. Pro komplexní určení vodorovných pohybů věžových vodojemů je proto třeba použít dva radarové přístroje, které budou měřit synchronně a jejich záměrné osy budou na sebe přibližně kolmé. Měření i vyhodnocení dat z každého jednotlivého radaru pak bude stejné, jak je popsáno v tomto dokumentu.

8. 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 Surveyor v. 01.00 - User Manual, Pisa, January 2012.
- (3) Ingegneria Dei Sistemi S.p.A., IBISDV v.03.04.005 – User Manual, Pisa, March 2012.
- (4) Francesco Coppi, Carmelo Gentile and Pier Paolo Ricci, A Software Tool for Processing the Displacement Time Series Extracted from Raw Radar Data, The 9th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques and Short Course, 2010 American Institute of Physics, 190-201.

9. Seznam příloh

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

Zpráva o provedených ověřovacích měřeních

Ověřené technologie určování vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem

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

Obsah

1. Úvod	1
2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí.....	1
3. Použité přístroje a pomůcky	2
4. Postup měření pozemním interferometrickým radarem.....	2
5. Postup doplňkového měření polární metodou	3
6. Výběr a identifikace bodů na sledovaném objektu k vyhodnocení.....	4
7. Vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem.....	6
8. Závěr.....	8

1. Úvod

V rámci ověřování přínosů technologie určování vodorovných pohybů věžových vodojemů pozemním interferometrickým radarem bylo provedeno sledování vodorovných pohybů věžového vodojemu v obci Klecany nedaleko Prahy.

2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí

Věžový vodojem se nachází na vyvýšeném místě vystaveném působení větru na poli ve východní části obce Klecany. Okolo vodojemu je malá obdélníková plocha ohrazená drátěným plotem. Nedaleko vodojemu se nachází dvě nízké budky a elektrický rozvaděč. V průběhu měření probíhaly na místě výkopové práce pro budoucí stavbu a v okolí vodojemu byly výkopy a hromady vykopané zeminy. Vzhledem k příznivému směru větru ovšem tyto překážky nebránily umístění stanoviště radaru ani výhledu na vodojem. Vodojem je přístupný po částečně zpevněné polní cestě z Topolové ulice (obr. 2).



Obr. 1 Vodojem v obci Klecany



Obr. 2 Letecký snímek vodojemu a jeho okolí

Vodojem se skládá z nosného válcového (tubusového) sloupu a nádrže kulového tvaru. Na vrcholu nádrže jsou umístěny antény mobilních sítí. Nosný sloup vodojemu se skládá ze tří sekcí, každá sekce se pak skládá z několika prstenců. Mezi nejvýše položenou sekcí a nádrží se nachází ještě jeden samostatný prsteneček. Spoje sekcí výrazně vystupují nad povrch sloupu a tvoří potenciální odražeče radarového signálu. Spoje prstenců jsou méně výrazné, nad povrch sloupu však vystupují také. Na obr. 3 jsou spoje sekcí označeny čísly 10, 20 a 30. Styk sloupu s nádrží je označen číslem 40. Spoje prstenců v první sekci jsou označeny čísly 1, 2, 3 a 4, v dalších sekcích pak podobným způsobem.



Obr. 3 Spoje sekcí a prstenců sloupu vodojemu

Dle informační cedule umístěné na plotě je vodojem v provozu a nádrž v době měření tedy pravděpodobně obsahovala vodu.

3. Použité přístroje a pomůcky

Pro měření byl použit pozemní interferometrický radar IBIS-S v.č. 121 s anténami typu 5 (IBIS-ANT5-H12V39) postavený na těžkém dřevěném stativu. Pomocné měření bylo provedeno totální stanicí Sokkia NET1AX v.č. 101838.

4. Postup měření pozemním interferometrickým radarem

Radar byl umístěn na těžký dřevěný stativ na nebezpečný povrch porostlý travou cca 11m od sloupu vodojemu po směru větru (obr. 4). Radar byl puškohledem zacílen na spoj prstenců sloupu č. 13.



Obr. 4: Stanovisko radaru

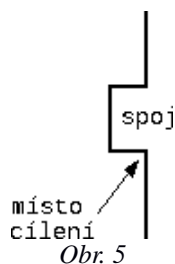
V průběhu měření vál velmi slabý proměnlivý severozápadní vítr.

Parametry měření pozemním interferometrickým radarem IBIS-S shrnuje následující tabulka:

Typ měření:	dynamické
Délková rozlišovací schopnost:	0,75 m
Maximální dosah:	40 m
Vzorkovací frekvence:	99.80 Hz
Datum a čas zahájení měření:	13.8.2013 12:04:49
Doba trvání měření:	00:25:00

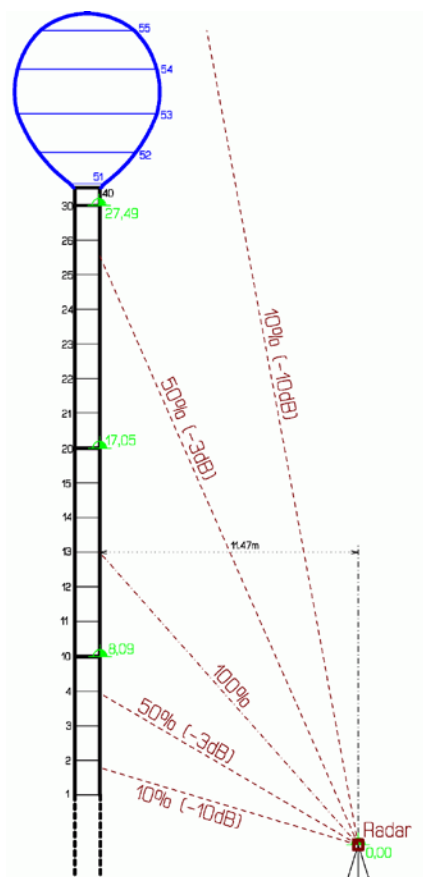
5. Postup doplňkového měření polární metodou

Doplňkové měření bylo provedeno totální stanicí umožňující elektronické měření délek bez hranolu. Totální stanice byla postavena na stativ přibližně na přímku procházející středem radaru a středem sloupu vodojemu v dostatečné vzdálenosti od radaru tak, aby bylo možno pohodlně zacílit i na nejvyšší body vodojemu dalekohledem totální stanice (obr. 1). Totální stanicí byly zaměřeny rohy tělesa radaru pro následné určení počátku radiálních spádových oblastí, dále byly zaměřeny všechny viditelné spoje sekcí a prstenců sloupu vodojemu, napojení sloupu a nádrže a vodorovné kruhové zářezy v tělese nádrže. Místo cílení na spoje na sloupu je znázorněno na obr. 5:

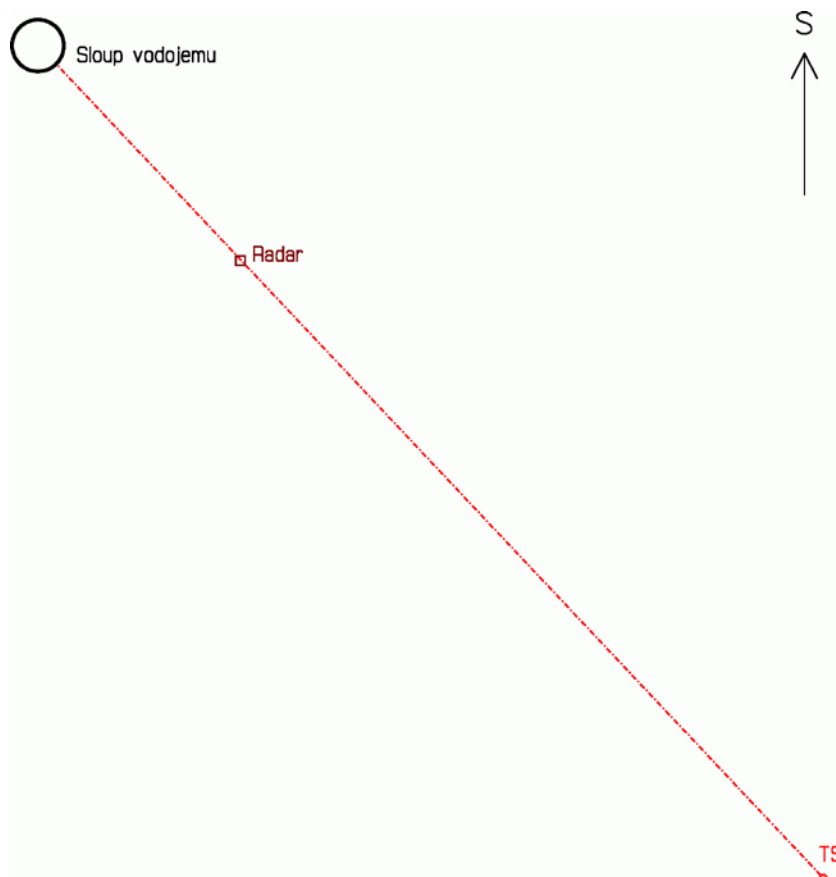


Obr. 5

Výsledkem doplňkového měření jsou měřické náčrty v místním souřadném systému (obr. 6 a 7).



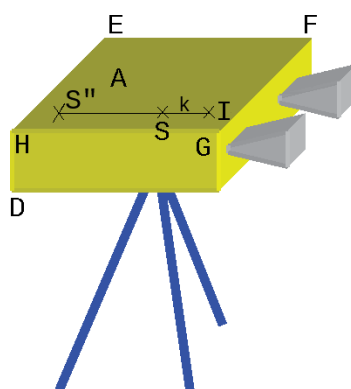
Obr. 6 Měřický náčrt - bokorys



Obr. 7 Měřický náčrt - půdorys

6. Výběr a identifikace bodů na sledovaném objektu k vyhodnocení

Protože na sloupu vodojemu se nacházejí tři výrazné spoje sekcí (podrobné body č. 10, 20 a 30), které dobře odrážejí radarový signál, a jsou na sloupu rovnoměrně rozloženy, je vhodné postupovat při výběru bodů a jejich identifikaci tak, že se tyto konkrétní spoje vyberou k vyhodnocení a na profilu odrazivosti se identifikují maxima, která odpovídají odrazům od vybraných spojů porovnáním totální stanicí nepřímě měřených vzdáleností mezi počátkem radiálních spádových oblastí a zaměřenými body na vybraných spojích se vzdálenostmi měřenými radarem. Počátek radiálních spádových oblastí se vypočte ze zaměřených rohů tělesa radaru – bodů A,D,E,F,G a H (obr. 8):



Obr. 8 Počátek rad. spád. oblastí

Ze souřadnic těchto rohů je možno snadno vypočítat souřadnice středu tělesa radaru – bodu S a středu zadní stěny tělesa radaru – bodu S'':

$$x_S = \frac{x_A + x_D + x_F + x_G}{4}, \dots, a \quad x_{S''} = \frac{x_A + x_D + x_E + x_H}{4}, \dots$$

Dále je možno vypočítat rozdíly souřadnic bodů S a S'' a vzdálenost mezi těmito body:

$$\Delta x_{S,S''} = x_{S''} - x_S, \dots \text{ a } d_{S,S''} = \sqrt{\Delta x_{S,S''}^2 + \Delta y_{S,S''}^2 + \Delta z_{S,S''}^2}$$

Dále je možno při znalosti konstanty $k=6\text{cm}$ (vzdálenost středu tělesa radaru a počátku rad. spád. oblastí), vypočítat rozdíly souřadnic bodů S a I (počátek rad. spád. oblastí):

$$\Delta x_{S,I} = x_I - x_S = -\frac{k}{d_{S,S''}} \cdot \Delta x_{S,S''}, \dots$$

A nakonec vypočítat souřadnice počátku rad. spád. oblastí:

$$x_I = x_S + \Delta x_{S,I}, \dots$$

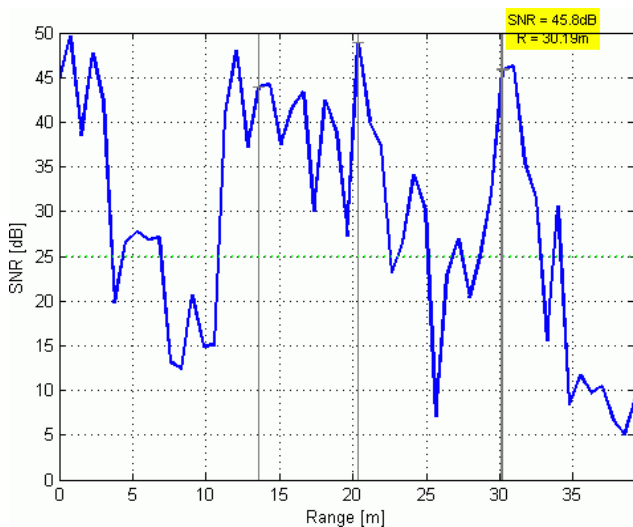
Pro zjednodušení jsou uvedeny pouze vzorce pro souřadnici x, ostatní souřadnice se vypočtou obdobným způsobem.

Porovnání vzdáleností měřených radarem a nepřímou totální stanicí je uvedeno v následující tabulce.

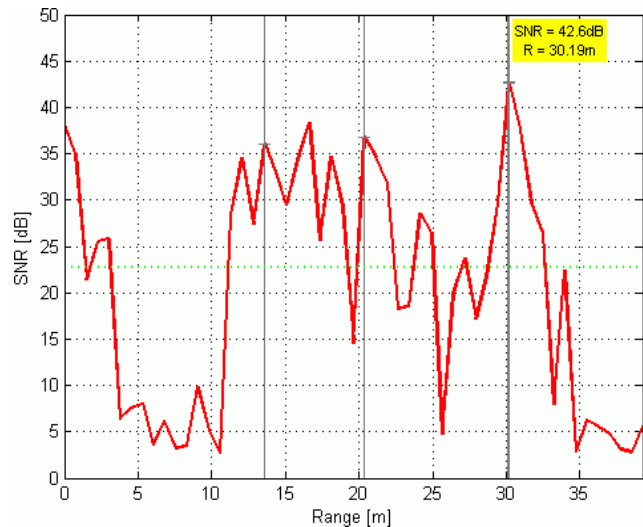
Tabulka 1

j	vd _j (m)	R _i (m)	R _i - vd _j (m)	i
4	13,22	13,58	0,36	19
10	14,02	14,34	0,32	20
20	20,55	20,38	-0,17	28
30	29,80	29,43	-0,37	40
40	30,50	30,19	-0,31	41

Protože se podrobné body č. 10 a 30 nachází téměř na rozhraní radiálních spádových oblastí a dochází u nich tedy k rozdělení odrazu do těchto dvou rad. spád. oblastí, jsou v tabulce uvedeny i tyto sousední rad. spád. oblasti a do nich spadající sousední spoje. K vyhodnocení byla nakonec vybrána rad. spád. oblast č. 19, kde je obsažena část odrazu ze spoje č. 4 a spoje č. 10 a dále rad. spád. oblast č. 41, kde je obsažena část odrazu ze spoje č. 30 a 40 (a také případné odrazy od části pláště nádrže). K vyhodnocení vybrané rad. spád. oblasti tvoří v profilech odrazivosti SNR_t (obr. 9) a SNR_e (obr. 10) výrazná maxima:



Obr. 9 Profil odrazivosti SNR_t



Obr. 10 Profil odrazivosti SNR_e

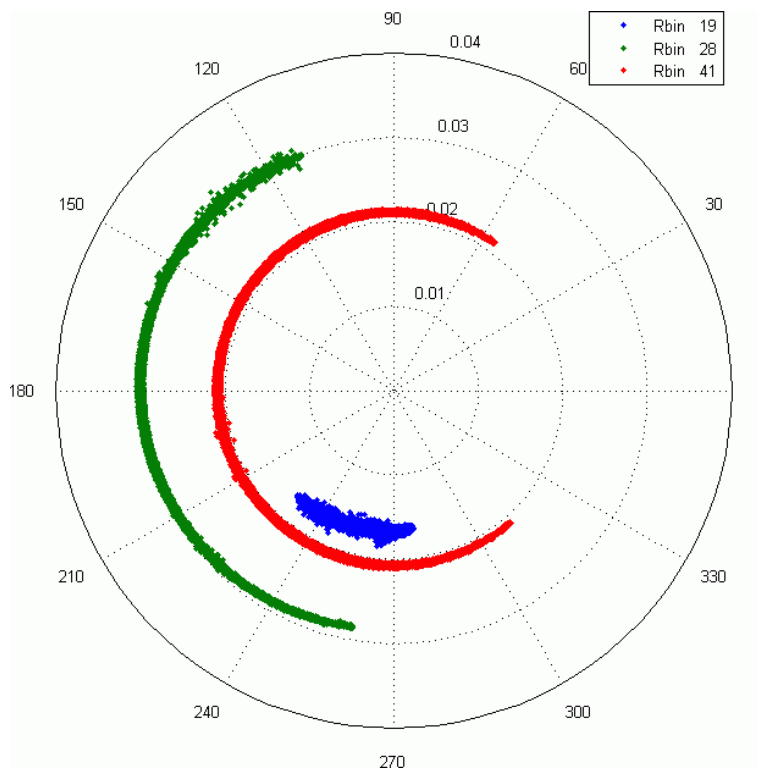
Parametry k vyhodnocení vybraných rad. spád. oblastí jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2

Rbin	R (m)	SNRt (dB)	SNRe (dB)	σ_a (mm)	E (proj. faktor)	$\sigma_{dR} = E \cdot \sigma_a$ (mm)
19	13,6	43,9	36,1	0,0154	1,18	0,0182
28	20,4	48,9	36,8	0,0142	1,78	0,0253
41	30,2	45,8	42,6	0,0073	2,63	0,0192

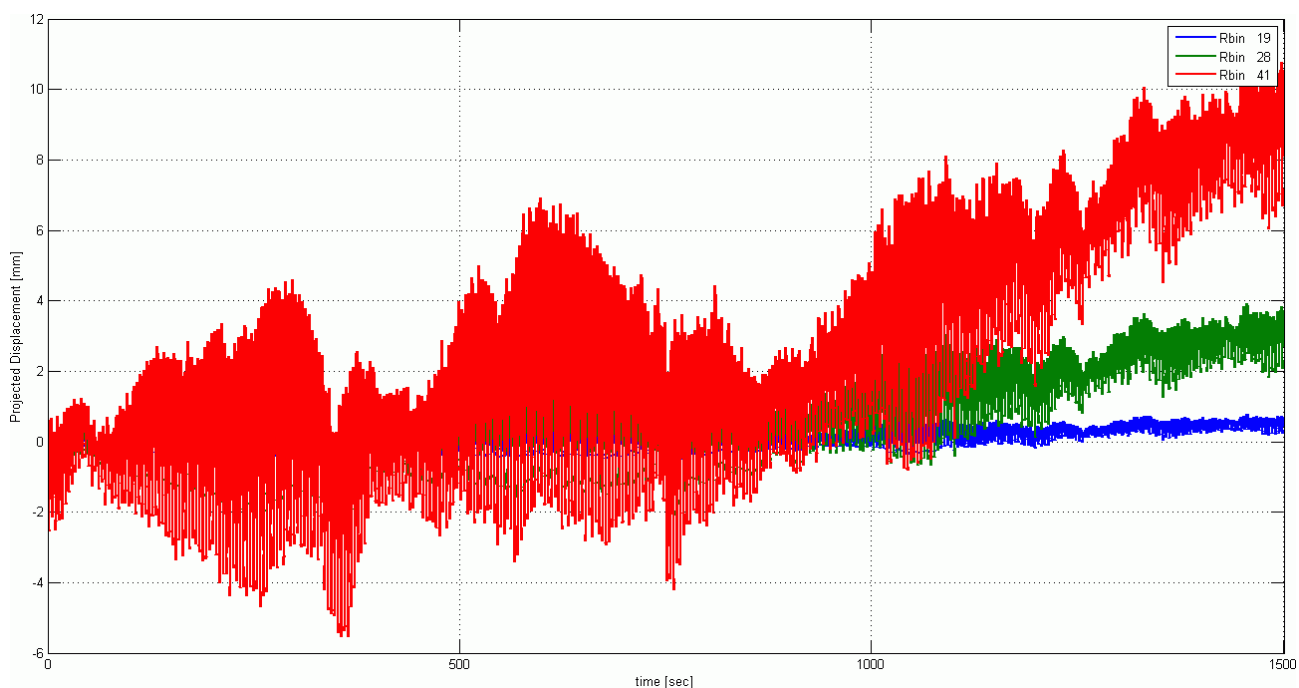
7. Vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem

Prvním vyhodnocením kvality odrazů je kontrola polárních grafů amplitudy a fáze přijatého signálu (obr.11).



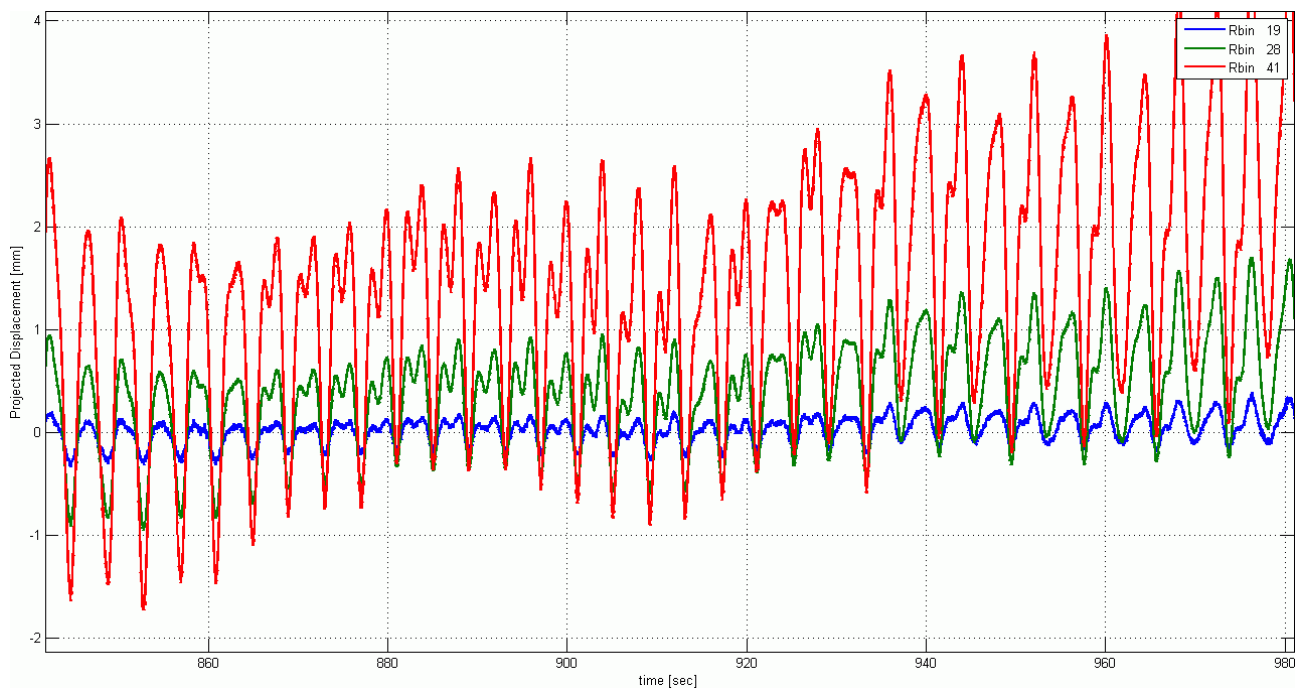
Obr. 11: Polární graf amplitudy a fáze přijatého signálu

Na grafu jsou patrné shluky bodů ve tvaru oblouků, jejichž středy jsou téměř v centru polárního grafu – v bodě s nulovou amplitudou. Graf znázorňuje situaci bez aktivované funkce softwaru IBIS Data Viewer „Remove Clutter“, která slouží k odstranění vlivu stabilního odražeče, což by se na polárním grafu projevilo posunem středů oblouků do středu grafu v případě, že by se tyto středy neshodovaly. V tomto případě bylo ale od aktivace této funkce upuštěno, protože její použití by znamenalo nežádoucí umělý zásah do měření, který by způsobil pouze malé změny výsledků a protože je zřejmé, že v dotčených rad. spád. oblastech se nenachází žádný stabilní odražeč. Z polárního grafu lze usoudit, že vybrané rad. spád. oblasti je pravděpodobně možno úspěšně vyhodnotit a je tedy možno přistoupit k dalšímu kroku – vyhodnocení vodorovných pohybů (obr. 12):



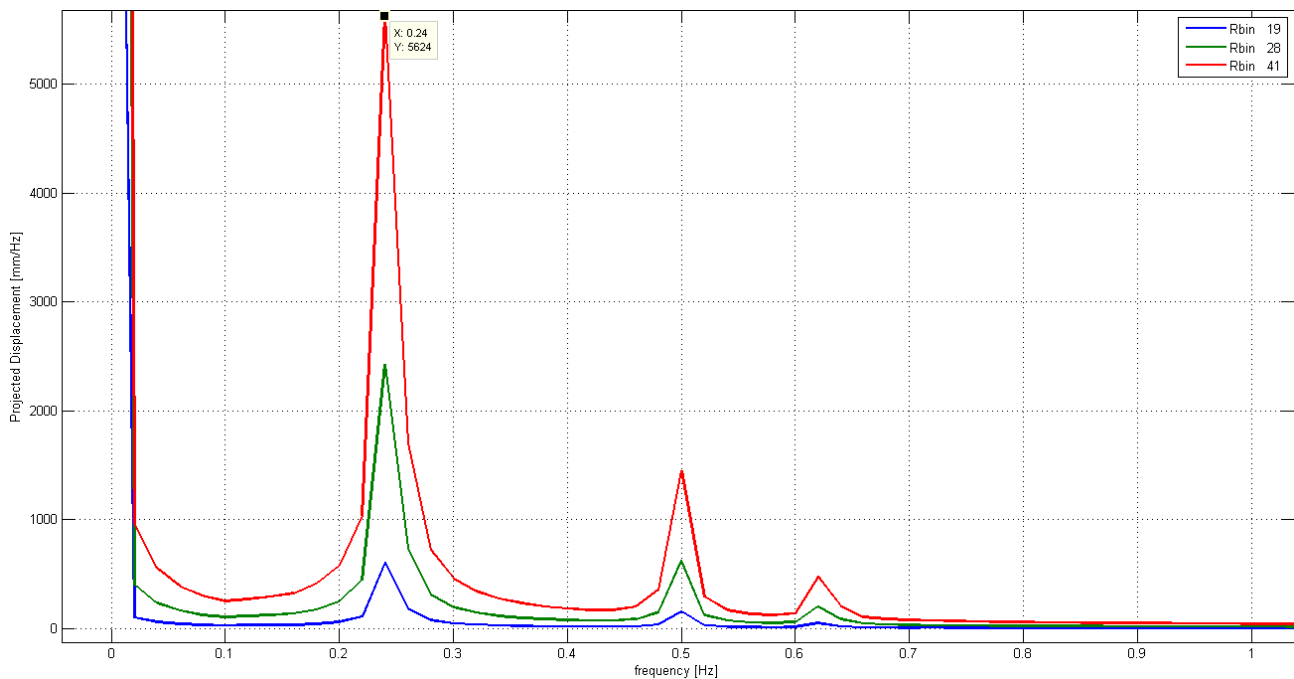
Obr. 12: Vodorovné pohyby vybraných spojů sloupu vodojemu

Na grafu vodorovných pohybů vybraných spojů vodojemu (obr. 12) je patrná vysoká frekvence a proměnlivá amplituda kmitání sloupu. Od času cca 900s od začátku měření je pak zřejmý začátek dlouhodobějšího pohybu, který při vyloučení možnosti pohybu radaru či stativu může způsobovat silící vítr. Při podrobnějším zkoumání kmitání sloupu (obr. 13) je v časových úsecích, kdy je amplituda kmitání nižší, rozeznatelné složené kmitání, které může být způsobeno pohybem vody v nádrži vodojemu nezávislém na kmitání sloupu. Kmitání sloupu může být tedy součtem dvou složek a velikost amplitudy kmitání sloupu pak závisí na tom, zda se tyto složky v danou chvíli sčítají nebo vzájemně ruší.



Obr. 13 Složené kmitání

Na periodogramu vodorovných pohybů (obr. 14) jsou patrné tři frekvence. Nejvýraznější z nich je 0,24Hz, což je přibližně 1 krát za 4s. Této frekvenci odpovídá i nejvýraznější frekvence na grafu složeného kmitání (obr. 13).



Obr. 14: Periodogram vodorovných pohybů

8. Závěr

Výše popsaným měřením bylo ověřeno, že nacházejí-li se na věžovém vodojemu přirozené odražeče radarového signálu, je možno pozemním interferometrickým radarem úspěšně určit jeho kmitání a to s vysokou frekvencí a přesností, která umožňuje i vyhodnocení složeného kmitání. Navíc je možné určovat kmitání současně na více bodech stožáru vodojemu a odhalovat tak dynamické chování stožáru jako celku, tj. například jeho dynamické průhyby. Naproti tomu nelze nahradit určování kmitání vodojemů měřením geodetickou totální stanicí, protože žádná totální stanice nedokáže určovat změny délek s potřebnou vysokou frekvencí pro zachycení složeného kmitání, které je vodojemům obsahující vodu vlastní a ani nedokáže současně sledovat více jak jediný bod na stožáru.