

# Ověřená technologie určování vodorovných pohybů výškových budov pozemním interferometrickým radarem

Milan Talich, 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 .....	7
5.1. Přípravné práce a rekognoskace .....	7
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 .....	8
5.6. Provedení měření radarem .....	9
5.7. Doplnková geodetická měření .....	9
5.8. Další doplnková měření .....	10
5.9. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu .....	10
6. Zpracování a vyhodnocení měření .....	10
6.1. Zpracování měřených dat .....	10
6.2. Identifikace a výběr bodů k vyhodnocení .....	10
6.3. Analýza a vyhodnocení výsledků .....	11
6.4. Způsob dokumentace výsledků .....	11
7. Závěr .....	12
8. Seznam použité literatury .....	12
9. Seznam příloh .....	12

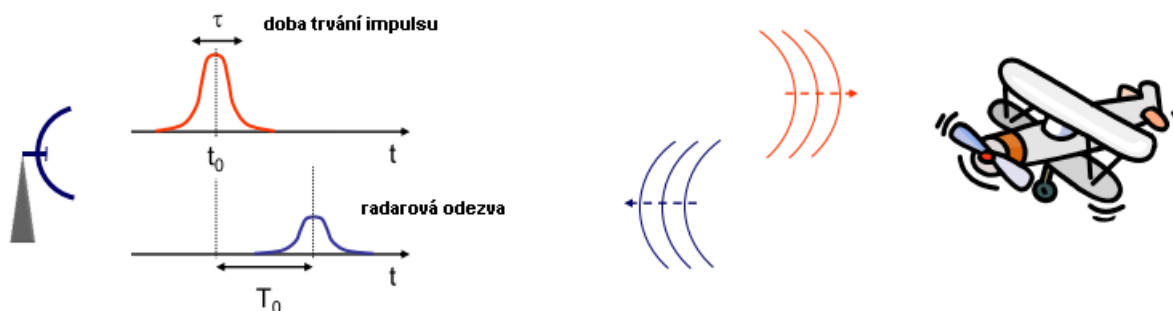
## 1. Úvod

Tento dokument popisuje ověřenou technologii pro měření a určování vodorovných pohybů výškových budov pozemním interferometrickým radarem. Tato inovativní metoda umožňuje měřit pohyby v několika sledovaných bodech budovy současně. Měření probíhá kontinuálně s vysokou vzorkovací frekvencí (až 200 Hz) a vysokou přesností (až 0,01 mm). S využitím přirozených odrazečů radarového signálu na fasádě budovy je možno měřit pohyby na dálku bezkontaktně, bez nutnosti přístupu do budovy a bez nutnosti osazení měřící aparatury nebo odrazečů.

## 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** (Rbin) s konstantním rozpětím nezávislým na vzdálenosti, který nazýváme **radiální rozlišení  $\Delta R$** .

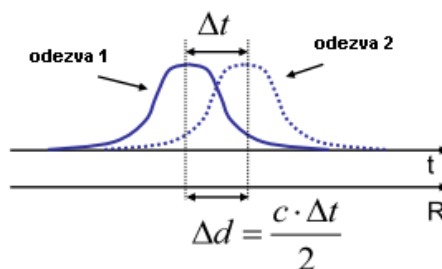
Vzdálenost je určena pomocí rychlosti světla  $c$  podle vztahu

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

kde  $T_0$  představuje opoždění odezvy. Koncepti radiálního rozlišení vyjadřuje vzorec

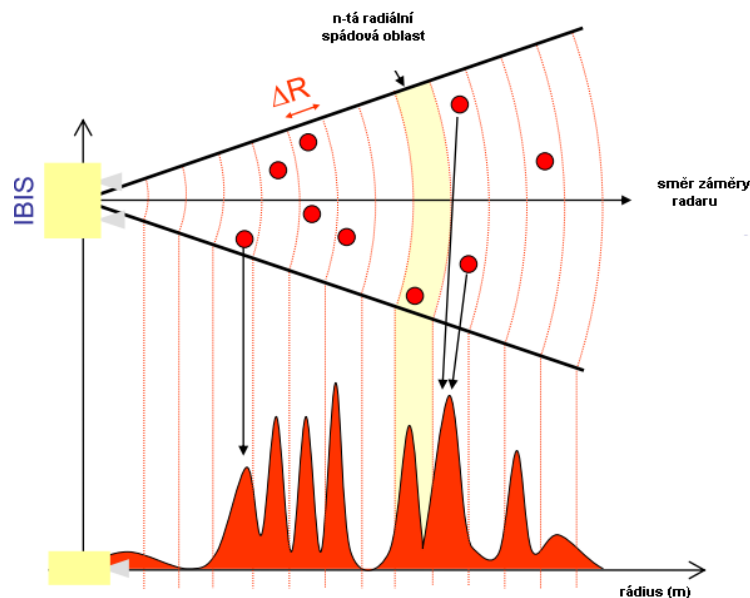
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2},$$

kde  $\tau$  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 ( $\Delta d$ )

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 jednom rozměru, a to ve směru záměry. Nachází-li se více detekovaných objektů v jedné radiální spádové oblasti, nelze je od sebe odlišit a posuny měřené na jednotlivých objektech se ve výsledku průměrují (viz obr. 3).



Obr. 3: Skládání odrazů od více objektů

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

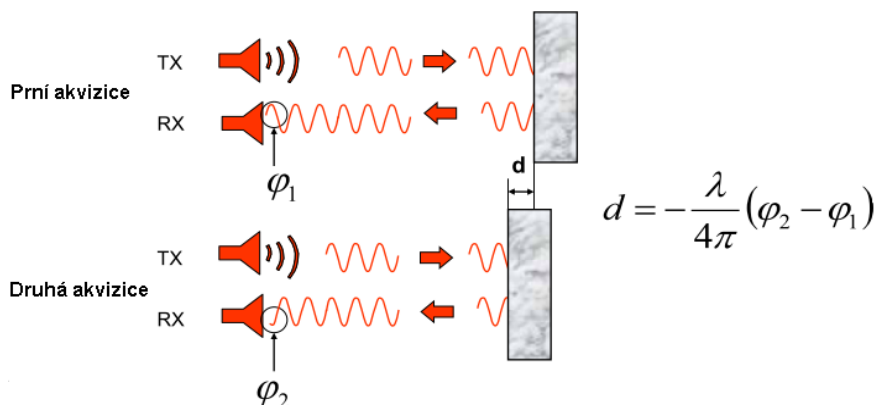
$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} = \left( \frac{A_{signal}}{A_{\text{šum}}} \right)^2,$$

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:

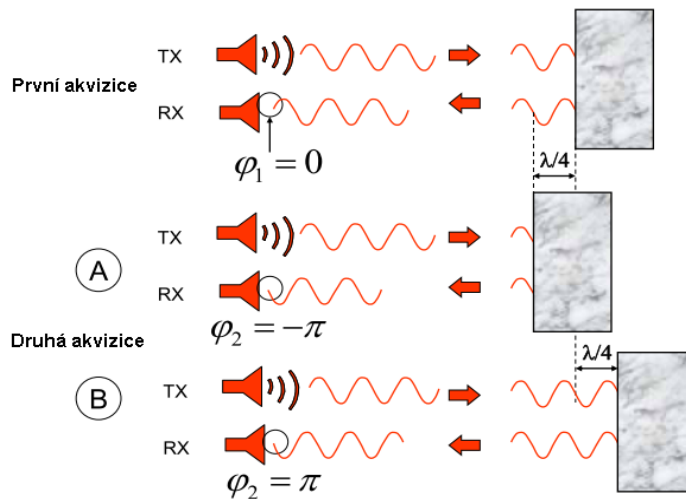
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{signal}}{A_{\text{šum}}} \right)$$

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  $\varphi_n$ . Přístroj IBIS je schopen vyhodnotit posunutí pro každou radiální spádovou oblast. Kvalita vyhodnoceného posunu je úměrná množství odraženého signálu.



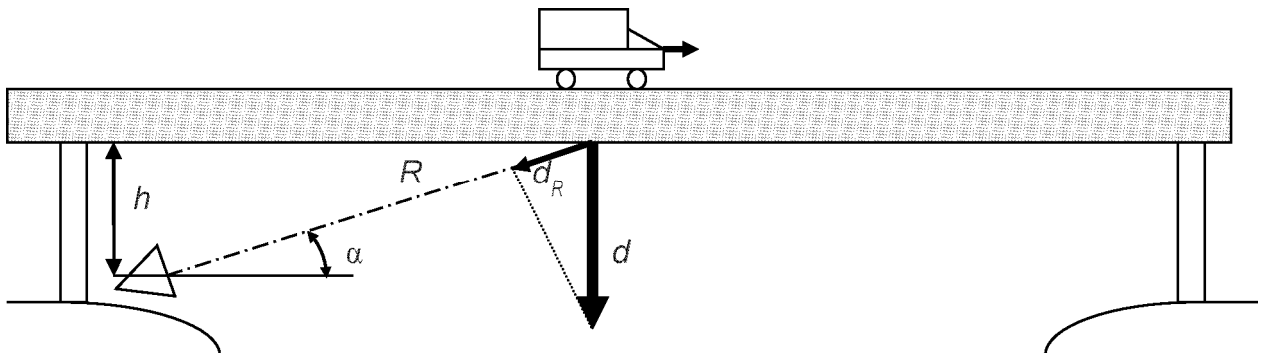
Obr. 4: Princip diferenční interferometrie

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 směru očekávaného posunu je znázorněna na obrázku 6.



Obr. 6: Promítání přímo měřeného pohybu  $d_R$  do směru očekávaného posunu

## 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 ovšem možno dosadit střední hodnotu  $f = 17$  Ghz. Směrodatnou odchylku fázového posunu lze vypočítat pomocí vzorce:

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

kde SNR je prostý (nelogaritmický) poměr signálu k šumu. SNR se vyjadříje dvěma základními způsoby a to tepelným SNR<sub>t</sub> a odhadnutým SNR<sub>e</sub>. Odhadnutý poměr signálu k šumu SNR<sub>e</sub> je určen na základě variance amplitudy měření a je vhodný pro odhad přesnosti měření. Směrodatnou odchylku pohybu ve směru záměry lze tedy vyjádřit vztahem:

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

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<sub>r</sub> 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 vztahu:

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

### 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 mikrovlnném pásmu o frekvenci 17,1 – 17,3 GHz. 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 200 Hz. Vzorkovací frekvenci je možno zvolit dle požadovaných nároků na podrobnost výsledků měření, její maximální možná hodnota ovšem klesá s dosahem měření (max. 200 Hz při dosahu do 150 m, max. 40 Hz při dosahu do 0,5 km, max. 16 Hz při dosahu do 1 km). Dosah měření radarem je možno dle potřeby zvolit až do maximální hodnoty 1 km. Směrodatná odchylka radarem zaměřených pohybů je dle údajů výrobce v ideálních podmínkách až 0,01 mm. Rozlišovací schopnost jednotlivých sledovaných cílů v radiálním směru, tj. ve směru záměry, je 0,75 m (šířka radiální spádové oblasti). K radaru IBIS-S je dodávána anténa číslo 5 (IBIS-ANT5-H12 V39). Horizontální vyzařovací úhel této antény je 12° při ztrátě 3 dBi (50 %) a 25° při ztrátě 10 dBi (90 %). Vertikální vyzařovací úhel je 39° při ztrátě 3 dBi (50 %) a 69° při ztrátě 10 dBi (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 Panasonic CF19 s programem IBIS Surveyor. Ke zpracování měření je výrobcem dodáván program IBIS Data Viewer. Radar je upevněn na 3D hlavě, 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 (taktéž dodávaného výrobcem). Ke geodetickému stativu ji lze upevnit pomocí redukce z menšího šroubu 3D hlavy na větší šroub geodetického stativu případně pomocí adaptéru do geodetické trojnožky. K signalizaci sledovaných bodů se používají koutové odražeče různých velikostí (od 10 cm do 1 m), tvarů a z různých materiálů (nejčastěji hliníkové či nerezové).

Pro doplňková geodetická měření se použije totální stanice s možností měření délek bez hranolu, pásmo, příp. ruční dálkoměr apod. Vhodnou doplňkovou metodou je i laserové skenování mračen bodů.

#### 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 mezní hodnotou (add. d). Z toho vyplývají 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).



Obr. 7: pohyb v kolmém směru je naznačen šipkami

- b) V rámci společného souřadnicového 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 dle předpokládaného směru skutečného pohybu. Je-li skutečný směr pohybu sledovaného objektu resp. bodu jiný, než uživatelem předpokládaný směr, dochází k chybnému vyhodnocení, které nelze odhalit. Například

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.  $\Delta\varphi = \pm \pi$  (tj.  $\pm\lambda/4 = \pm 4,38$  mm). Při překročení této hodnoty velikosti pohybu dojde k chybnému výpočtu počtu celých cyklů a fázového rozdílu, tedy i velikosti pohybu. Tuto chybu nelze odhalit.

## **5. Postup měření**

### **5.1. Přípravné práce a rekognoskace**

Před začátkem vlastního měření je nutná prohlídka neboli rekognoskace stavby a jejího okolí. Při ní se zjistí zejména přístupové cesty, dostupnost, překážky ve výhledu a přítomnost a rozstup přirozených odrazečů na fasádě např. spojů mezi patry nebo skleněnými panely. Fasády výškových budov jsou většinou prosklené. Dále se např. od majitele nebo developera zjistí technické parametry stavby, zejména výška a informace o tom, jaká je v budově pracovní doba, pro měření nebo naopak vyloučení vlivu pohybu osob uvnitř budovy.

### **5.2. Sledovaná místa a jejich signalizace**

Výškové stavby a budovy jsou v České republice převážně tvořeny betonovou nebo montovanou kostrou se skleněným pláštěm a dosahují maximální výšky 110 m. Moderní světové mrakodrapy jsou tvořeny většinou kovovou nosnou konstrukcí se skleněným pláštěm a přesahují výšku 150 m. Vertikální členění budov je samozřejmě po patrech o standardní výšce cca 3 m. Spoje pater vystupují nad povrch pláště a tvoří potenciální přirozené odražeče radarového signálu. Pokud těleso výškové stavby, 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 výškových budov je vhodné provádět v době, kdy se budova pohybuje, tj. za působení větru nebo pohybem osob uvnitř. Měření je výhodné provádět za větru dostatečně silného a s neproměnlivým směrem. Délku měření je pak nutno zvolit dostatečně dlouhou, aby se zachytilo tlumení či zesilování kývání budovy a případné složené kmitání při proměnlivé síle větru. Při delších měřeních je třeba vzít v úvahu možnost změn atmosférických podmínek, deformací stativu nebo změn podloží, na němž je stativ umístěn. Dynamická měření radarem se obvykle provádějí po dobu desítek minut maximálně 24 hodin. Vhodné je stanovisko ve stínu a v závětrí.

### **5.4. Umístění radaru**

Radar se umístí zpravidla na těžký dřevěný stativ na vhodné místo s volným výhledem na budovu.

Je-li možnost volby mezi zpevněným a nezpevněným povrchem, volí se spíše zpevněný povrch. Vždy je vhodné nechat stativ a přístroj 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 vůči budově. Vzdálenost radaru od paty budovy je určena třemi požadavky:

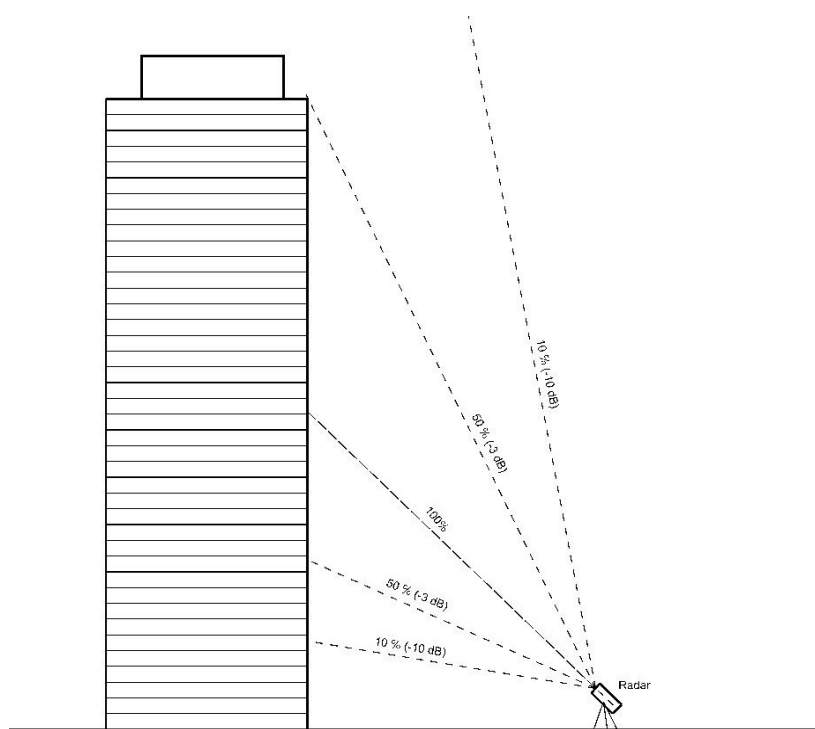
- 1) Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od budovy, aby byla dodržena vhodná geometrie při měření i na nejvyšší měřené body, tj. aby projekční faktor (poměr šikmé a vodorovné vzdálenosti od počátku radiálních spádových oblastí k nejvyššímu sledovanému bodu) byl co nejmenší.
- 2) Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od budovy, aby spoje na plášti budovy až na výjimky nespádaly do stejných radiálních spádových oblastí, tj. aby rozdíly šikmých délek mezi radarem a sousedními spoji nebyly menší než rozlišovací schopnost radaru 0,75 m.
- 3) Radar se umístí do takové vzdálenosti od budovy, aby odrazy od spojů na plášti byly dostatečně silné, tj. aby vzdálenosti mezi radarem a spoji byly co nejmenší.

Požadavek 1) prodlužuje vzdálenost mezi radarem a budovou, požadavky č. 2) a 3) pak vzdálenost mezi radarem a budovou zkracují. Výsledná, při měření používaná hodnota vodorovné vzdálenosti mezi radarem a výškovou budovou je pak obvykle v rozmezí půl až jednoho násobku výšky nejvyššího sledovaného bodu na fasádě budovy.

## 5.5. Volba antén a zacílení radaru

Pro měření výškových budov se volí antény s širokým vertikálním rozsahem a úzkým horizontálním rozsahem. Vhodné jsou např.

antény typu 5 (IBIS-ANT5-H12 V39). Radar se kolimátorem zacílí na vybraný bod např. rozhraní pater, který se následně zaměří totální stanicí. Bod či spoj vybraný pro zacílení radaru je vhodné zvolit v horní polovině budovy. Rozhraní v horní polovině budovy jsou od radaru vzdáleny více než spoje v dolní polovině budovy a odrazy od nich jsou proto slabší. Je tedy lépe, když je střed záměrné přímky (osa antén) blíže vzdálenějším rozhraním, 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. Již během cílení lze



Obr. 8: Umístění a orientace radaru při sledování pohybů výškové budovy

v programu Surveyor sledovat na obrazovce ovladače měnicí se profil odrazivosti při různých úhlech náklonu radaru a zvolit ten nejvhodnější.



## 5.6. Provedení měření radarem

Zaměření vodorovných pohybů výškové budovy se provede v dynamickém pracovním režimu se střední vzorkovací frekvencí (cca. 100 Hz), tak aby se podrobně zachytil pohyb stavby 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 geodetického 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 budovy (výška), odhadnout nebo orientačně změřit pásmem, ručním dálkoměrem příp. krokováním (vodorovná vzdálenost radaru a budovy) nebo odečíst ze stupnice hlavy stativu (sklon radaru). Nejdůležitějším parametrem pro vyhodnocení měření (určení projekčních faktorů) je vodorovná vzdálenost středu radiálních spádových oblastí a sledovaných bodů budovy. Pro délkovou rozlišovací schopnost musí být vždy zvolena hodnota 0,75 m z důvodu dodržení potřebného pásma radarového signálu dle předpisů EU (i ČR).

## 5.7. Doplňková geodetická měření

Doplňková geodetická 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 budově pro porovnání těchto délek s délkami měřenými radarem a tudíž pro identifikaci bodů sledovaných radarem.

Doplňkové geodetické měření výškové budovy je možno provést polární metodou totální stanicí vybavenou dálkoměrem umožňujícím měření délek bez hranolu. Protože při měření výškové budovy je nutno naklonit dalekohled totální stanice do strmých úhlů, kdy je již obtížné prohlédnout okulárem dalekohledu, je vhodné vybavit totální stanicí zalomeným okulárem či použít totální stanicí vybavenou vestavěnou digitální kamerou s možností cílení na displeji. Totální stanice se umístí za radar přibližně na přímkou procházející radarem a středem budovy, brání-li tomu překážky, zvolí se jiné místo. Totální stanicí se zaměří viditelné rohy tělesa radaru potřebné pro výpočet počátku radiálních spádových oblastí a všechny spoje a významné prvky fasády a pláště výškové budovy.

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 náčrty mohou být vyhotoveny v místním souřadnicovém systému. Připojení do S-JTSK je ale vhodné při opakovaném měření téže lokality pro snadnější lokalizaci stanoviska radaru v modelu. Odpadá tak nutnost opakovaného zaměřování lokality totální stanicí. V tomto případě lze výhodně použít technologii GNSS.

Další možností je laserové skenování, s jehož pomocí lze vytvořit kompletní 3D model lokality a předmětu měření v krátkém čase. Výhodou 3D modelu vytvořeného z mračna bodů je podrobnost s jakou se nám dostává informace o tom, co vše se nachází v jednotlivých Rbinech a od kterých ploch se signál radaru odráží. U laserového skenování odpadá problém se strmými záměry a při opakovaném měření téže lokality lze ve 3D modelu snadno odměřovat Rbiny a vzdálenosti k budově.

## 5.8. Další doplňková měření

Mezi další doplňková měření patří především měření meteorologických podmínek. Jsou to jednak měření směru a síly větru pro stanovení závislosti velikosti posunů na okamžitých povětrnostních podmínkách. Dále pak měření teploty, vlhkosti a tlaku ovzduší pro případnou detekci vlivu oslunění na pozvolné pohyby výškových budov. Za tímto účelem se doporučuje rovněž průběžné periodické fotografování budovy po dobu měření pro dokumentaci jejich osluněných a zastíněných částí.

## 5.9. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu

V terénu je možno provést předběžné zpracování a vyhodnocení naměřených dat programem pro jejich zpracování (IBIS Data Viewer), který lze nainstalovat přímo 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 rohů tělesa radaru je dále nutno vypočítat souřadnice počátku radiálních spádových oblastí. Který se nachází v podélné ose radaru 8 cm za přední stěnou. Kontrolou měření rohů tělesa radaru je porovnání měřených rozměrů se skutečnými rozměry. Ze souřadnic počátku radiálních spádových oblastí (Rbin) a zaměřených podrobných bodů na budově je pak nutno vypočítat šikmé a vodorovné délky mezi těmito body, příp. i další údaje pro tvorbu náčrtů a detailů. V případě vyhodnocení laserově naskenovaného mračna bodů, lze přímo na modelu měřit vzdálenosti od pravděpodobných míst odrazu.

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 délku mezi počátkem Rbin 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“.

*Poznámka: 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 všechny objekty zpracovávat jako most a volit tak 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. 2015)*

### 6.2. Identifikace a výběr bodů k vyhodnocení

Protože na budově se zpravidla nacházejí výrazná rozhraní pater, která tvoří dobré odražeče radarového signálu a jsou na plášti budovy rovnoměrně rozložena, je vhodné k vyhodnocení nejprve

vybrat tyto konkrétní výrazné body a poté najít jejich odrazy na profilu odrazivosti. Odrazy od těchto prvků se na profilu odrazivosti projeví výraznými lokálními maximy. Porovnáním šikmých délek od počátku Rbin (od radaru) k bodům na vybraných spojích zaměřených totální stanicí s délkami měřenými radarem, se pak potvrdí, zda vybraná maxima jsou skutečně odrazy od odpovídajících vybraných rozhraní pater na plášti výškové budovy.

### **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 radiálních spádových oblastí (Rbin) 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 100 Hz při snímací frekvenci 200 Hz). Dynamická analýza obsahuje důležitou funkci „Remove Clutter“, která měření opraví tak, že odstraní statickou složku způsobenou přítomností silného stabilního odražeče v dané Rbin. Tuto funkci je v případě potřeby nutno aktivovat pro každou vyhodnocovanou Rbin zvlášť. U výškových budov ovšem zpravidla nedochází k tomu, že v některé vyhodnocované Rbin je přítomen stabilní odražeč, veškerý odraz je od pohybující se budovy, 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 určených posunů 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 Rbin je přítomen odražeč s kvalitním stabilním signálem, 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. Umožňuje vytvořit pro každou vybranou frekvenci model pohybu a jeho lokální průběh.

### **6.4. Způsob dokumentace výsledků**

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

- 1) Tabulka základních parametrů k vyhodnocení vybraných radiálních spádových oblastí obsahující: vzdálenosti ke středům radiálních spádových oblastí měřené radarem, poměry signálu k tepelnému šumu, poměry signálu k odhadnutému šumu, projekční faktory a směrodatné odchylky vodorovných pohybů.
- 2) Graf vodorovných pohybů bodů nebo rozhraní na fasádě výškové budovy ve vybraných

radiálních spádových oblastech zachycující celou délku měření a detailní grafy zachycující vybrané časové úseky např. detailní složené pohyby.

- 3) Periodogramy vodorovných pohybů s určením frekvence kmitání budovy. Zejména určení frekvence vlastních kmitů konstrukce.

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 výškových budov 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 výškové budovy, jejíž pohyby jsou určovány. Kvalita odrazů je zpravidla zajištěna přítomností výrazných rozhraní a dalšího členění fasády nebo pláště budovy, které vystupují nad jeho povrch a tvoří přirozené odražeče radarového signálu. Kvalitu odrazů také příznivě ovlivňuje skutečnost, že okolo výškových budov se zpravidla nenachází jiné objekty než opět výškové budovy, které ale obvykle nejsou ve vzdálenosti, ve které by ovlivňovaly odraz od sledované budovy. Z geometrických parametrů je nejvýznamnější výška výškové budovy a vzdálenost budovy od radaru. Tyto parametry ovlivňují hodnoty projekčních faktorů u sledovaných bodů, na nichž závisí přesnost určení vodorovných pohybů výškové budovy. Měření je také ovlivněno povětrnostními podmínkami, zejména silou a směrem větru. Změna síly a směru větru v průběhu měření značně ovlivňuje výsledky. Pokud směr záměry radaru neodpovídá směru kývání stavby, jsou naměřené výkyvy systematicky menší než skutečné pohyby. Měření výškových budov je tedy obzvláště citlivé na povětrnostní situaci. Výškové budovy se navíc od jiných výškových objektů odlišují tím, že jejich kývání je většinou silně tlumeno jejich konstrukcí a rozměry. V některých případech z důvodů ochrany před zemětřesením je pak kmitání přímo tlumeno tlumiči kmitů. U výškových budov je proto pravděpodobné, že jejich pohyb je ve skutečnosti složitější a trajektorie jejich pohybu v půdorysné rovině může být např. elipsa, osmička či jiný složitější tvar. Tento složitý pohyb ale nelze určit pouze jedním radarem resp. měřením v pouze jediném směru.

## 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 9<sup>th</sup> 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 výškových budov pozemním interferometrickým radarem.
2. Zpráva o polní komparaci pozemního interferometrického radaru IBIS-S.

# Zpráva o provedených ověřovacích měřeních Ověřené technologie určování vodorovných pohybů výškových budov pozemním interferometrickým radarem

Michal Glöckner, Milan Talich

## 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 geodetického měření polární metodou.....	3
6. Výběr a identifikace bodů na sledovaném objektu.....	4
7. Vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem.....	6
8. Závěr.....	8

## 1. Úvod

V rámci ověřování přínosů technologie pozemního interferometrického radaru pro určování deformací rizikových objektů a lokalit bylo provedeno sledování vodorovných pohybů výškové budovy City tower v Praze na Pankrácké pláni.

## 2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí

Budova City Tower stojí na Pankráci v Praze 4 na prostoru vymezeném ulicemi Hvězdovou, Na Pankráci, Na Strži, Milevskou a Pujmanové. Objekt má 27 nadzemních a 3 podzemní podlaží, a se svými 109 metry je druhou nejvyšší budovou v České republice. Ze západní strany je před budovou park a odpočinková zóna. Na východní straně budova sousedí s dalšími administrativními a obchodními výškovými stavbami.



Obr. 1: City tower Praha



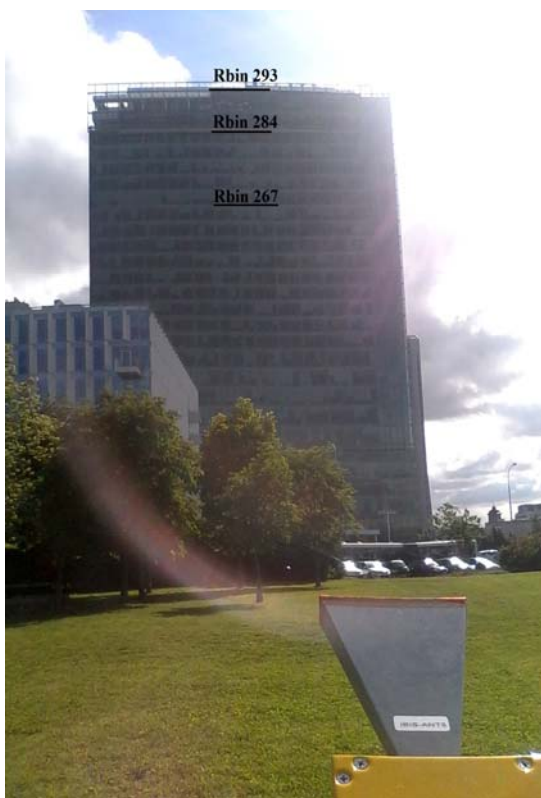
Obr. 2: Ortofoto lokality

### 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 návětrné straně budovy proti západní fasádě budovy. Rychlost větru při měření byla přibližně 5-7 m/s. Směr větru byl stálí západní. Pomocí kolimátoru byl radar zacílen horizontálně přibližně na střed budovy a vertikálně do její horní poloviny (Obr. 4). Díky tomu byla měřena celá výška budovy, tedy od paty až ke střešní nástavbě. Stanovisko je kompromisem požadavků na vzdálenost mezi radarem a objektem, kde se vzrůstající vzdáleností klesá odrazivost a maximální měřitelná vzorkovací frekvence.



Obr. 3 Výhodnocené úrovně budovy (Rbin)



Obr. 4 Pohled od radaru

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

Typ měření:	<b>dynamické</b>
Délková rozlišovací schopnost:	<b>0,75 m</b>
Maximální dosah:	<b>230 m</b>
Vzorkovací frekvence:	<b>79,94 Hz</b>
Datum měření, čas zahájení:	<b>5.6.2014, 09:09:32</b>
Délka měření:	<b>45 min</b>

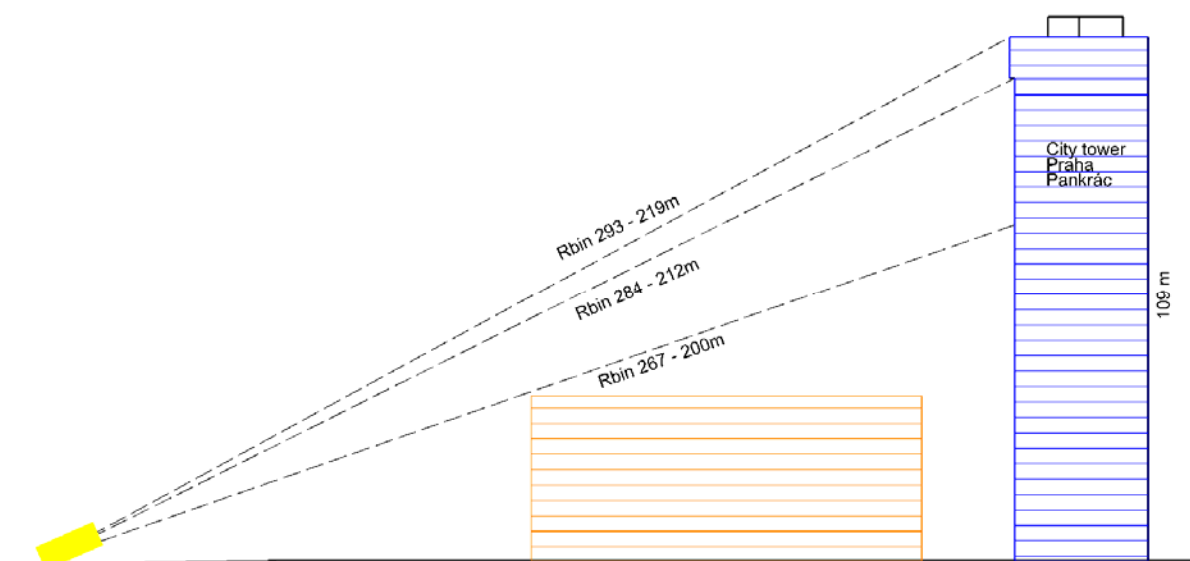
Tabulka 1: Parametry nastavení IBIS-S



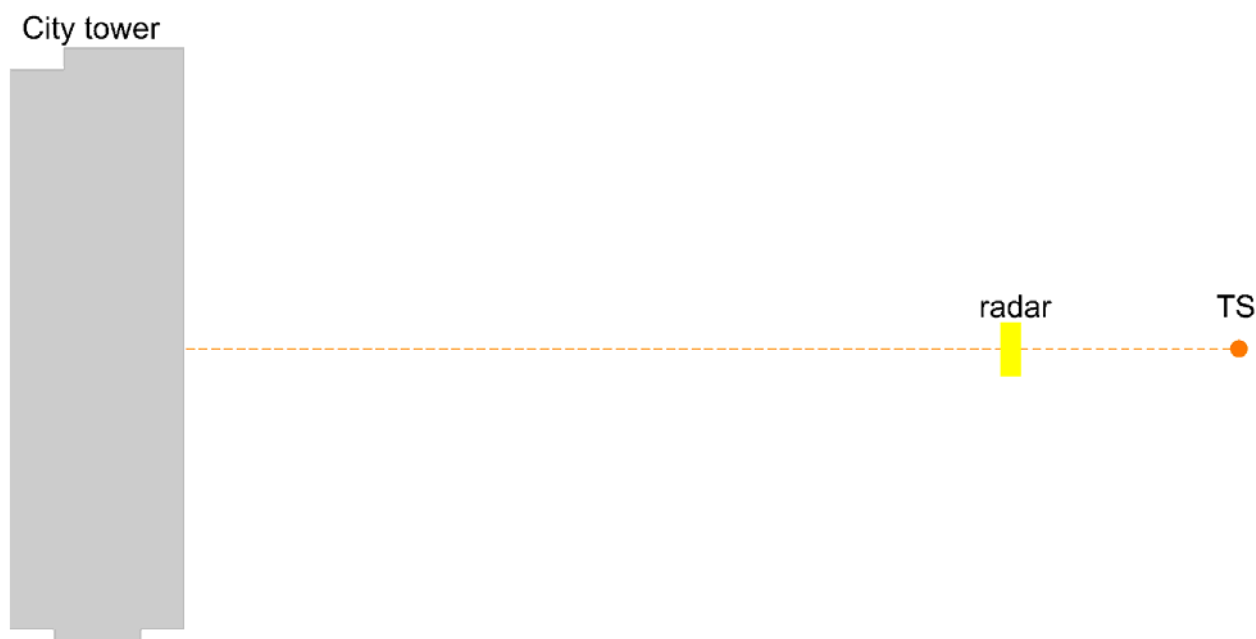
## 5. Postup doplňkového geodetického měření polární metodou

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 stožáru výškové budovy. Vzdálenost stanovisek totální stanice a radaru byla 2m z toho důvodu, aby byla zajištěna viditelnost rohů tělesa radaru z totální stanice. Totální stanicí byly zaměřeny rohy tělesa radaru pro následné určení počátku radiálních spádových oblastí a dále byly zaměřeny všechny rohy budovy, jednotlivá patra, okolní stavby a další možné překážky výhledu radaru.

Prvním výsledkem doplňkového měření jsou měřické náčrty (obr. 5 a 6). Náčrty se používají pro vyhodnocení měření při určování reflektorových ploch a lokalizaci Rbin se silným odrazem (Tabulka 2).



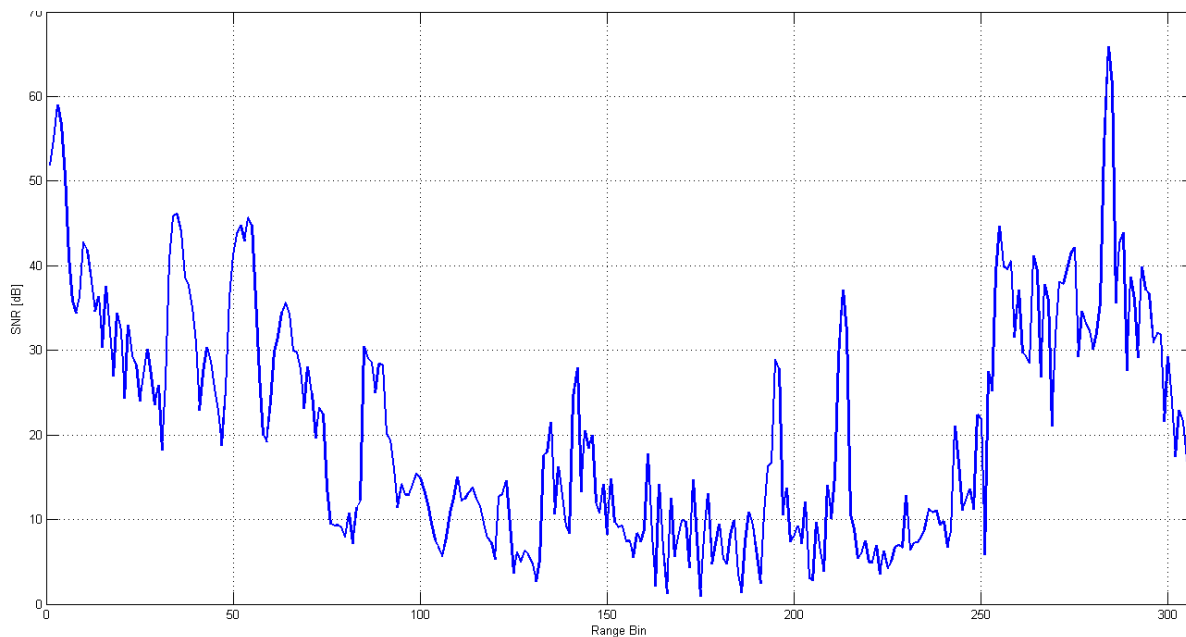
Obr. 5: Nárys měřených úrovní, Rbin a vzdálenost.



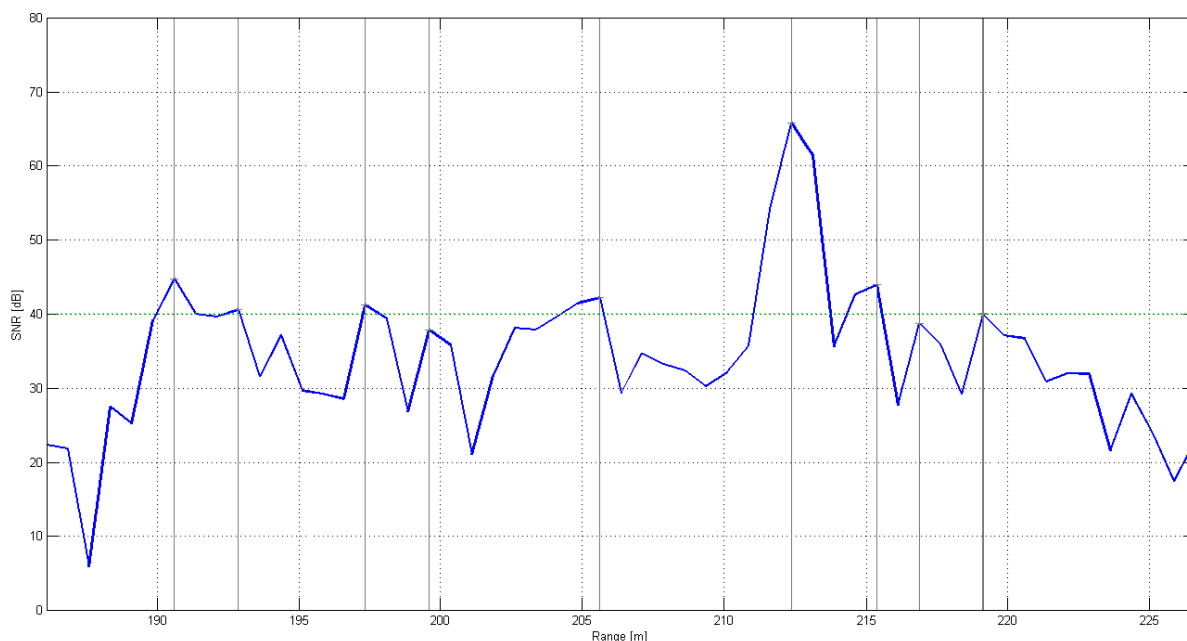
Obr. 6: Náčrt stanoviška radaru a totální stanice

## 6. Výběr a identifikace bodů na sledovaném objektu

Prvním výstupem měření pozemním interferometrickým radarem je tzv. profil odrazivosti, což je graf závislosti poměr signálu k šumu na vzdálenosti od radaru resp. počátku radiálních spádových oblastí. Tento graf slouží k výběru bodů, resp. radiálních spádových oblastí k vyhodnocení. K vyhodnocení se volí zejména ty oblasti s vysokou hodnotou poměru signálu k šumu, která tvoří na grafu lokální maxima, dalším kritériem volby oblastí k vyhodnocení je pokud možno rovnoměrné rozložení těchto oblastí po celé výšce sledovaného objektu, v tomto případě fasáde výškové budovy. Následující graf znázorňuje termální profil odrazivosti. Na dalším grafu je pak detail radiálních spádových oblastí (Rbin) které se nacházejí na budově.



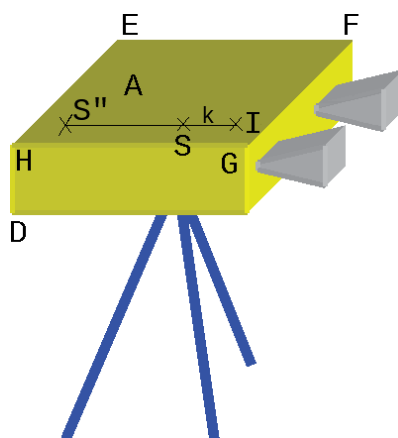
Obr. 7: Profil odrazivosti SNRt - celý



Obr. 8: Profil odrazivosti SNRt - detail



Dále je nutno zjistit jakým patřům budovy vybrané Rbin odpovídají. Popřípadě jakým okolním budovám stromům apod. Porovnáním vzdáleností k vybraným Rbin měřených radarem (R) a odpovídajících vzdáleností měřených totální stanicí (vd). Pro výpočet vzdáleností vd je nejprve nutno vypočítat počátek Rbin. K tomuto účelu byly na tělese radaru zaměřeny rohy A,D,E,F,G a H (viz. obr. 9) a vypočteny jejich souřadnice.



Obr. 7 Počátek radiálních spádových 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:

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

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):

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

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.

Následuje odečtení vzdáleností R z grafu profilu odrazivosti a nalezení nejbližší vzdálenosti vd.

Rbin	vd (m)	R (m)	R - vd (m)	test
267	199,78	199,6	-0,18	OK
284	212,27	212,4	0,13	OK
293	219,45	219,1	-0,35	OK

Tabulka 2: Identifikace cílů porovnáním délek měřených radarem a totální stanicí

Pro vyhodnocení byly vybrány tři nejsilnější odrazy. Rozmístěné rovnoměrně na fasádě budovy (Obr. 3). Rbin 267 přibližně uprostřed fasády, Rbin 284 převis posledních dvou pater a Rbin 293 hrana střechy. Oblasti mezi středem budovy a patou mají již velmi malý pohyb (0,5 mm) na hraně přesnosti měření (0,25 mm). A proto nebyly v tomto případě vyhodnocovány.

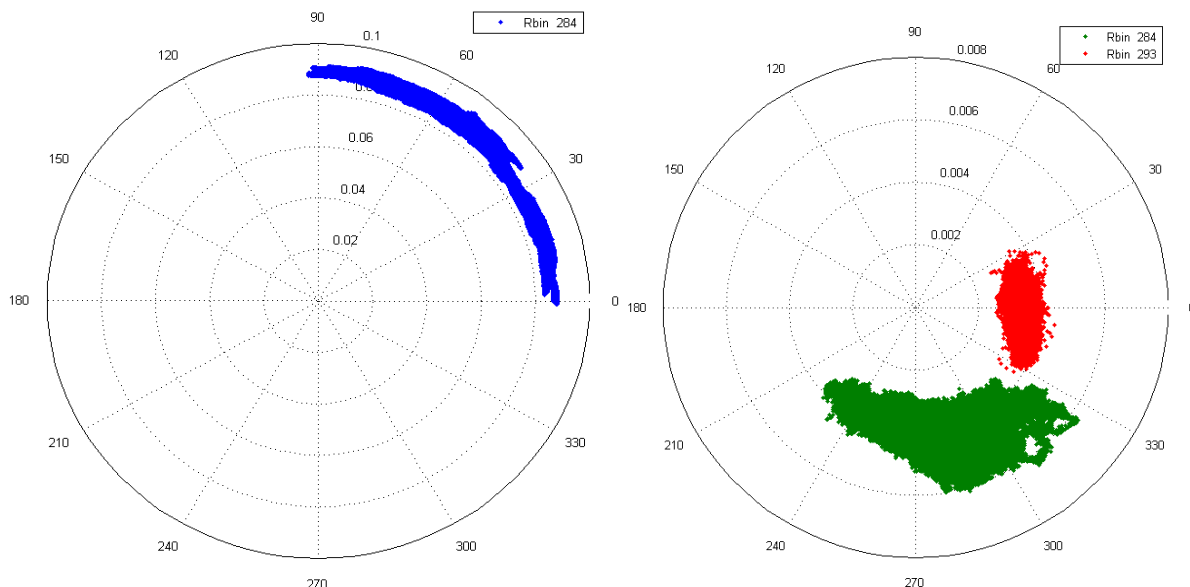
## 7. Vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem

Byla vyhodnocena trojice Rbin, jejichž parametry jsou uvedeny v následující tabulce.

Rbin	R (m)	SNRt (dB)	SNRe (dB)	$\sigma_d$ (mm)	E	$\sigma_{dR}$ (mm)
267	199,6	37,8	25,9	0,0499	1,06	0,053
284	212,4	65,9	37,7	0,0129	1,12	0,014
293	219,1	39,9	20,2	0,0966	1,16	0,112

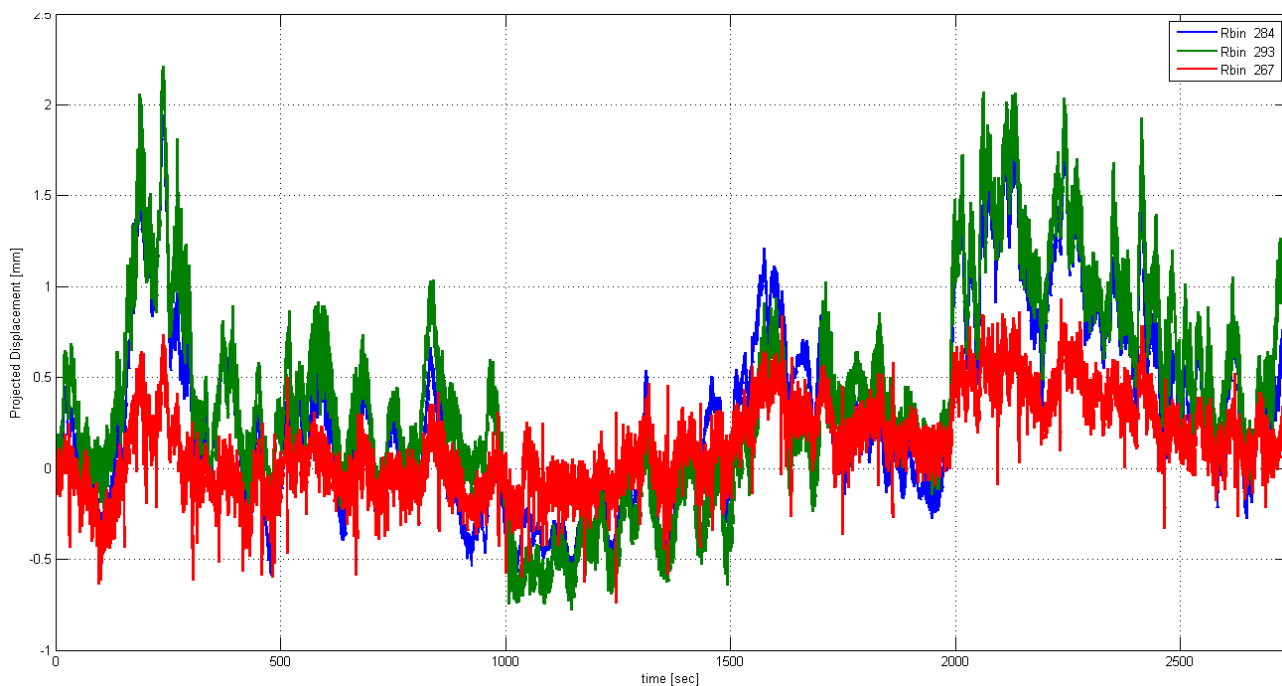
Tabulka 3: Hodnoty SNRt a SNRe pro vybrané Rbin

Prvním vyhodnocením kvality odrazů je kontrola polárních grafů amplitudy a fáze přijatého signálu (obr.10).



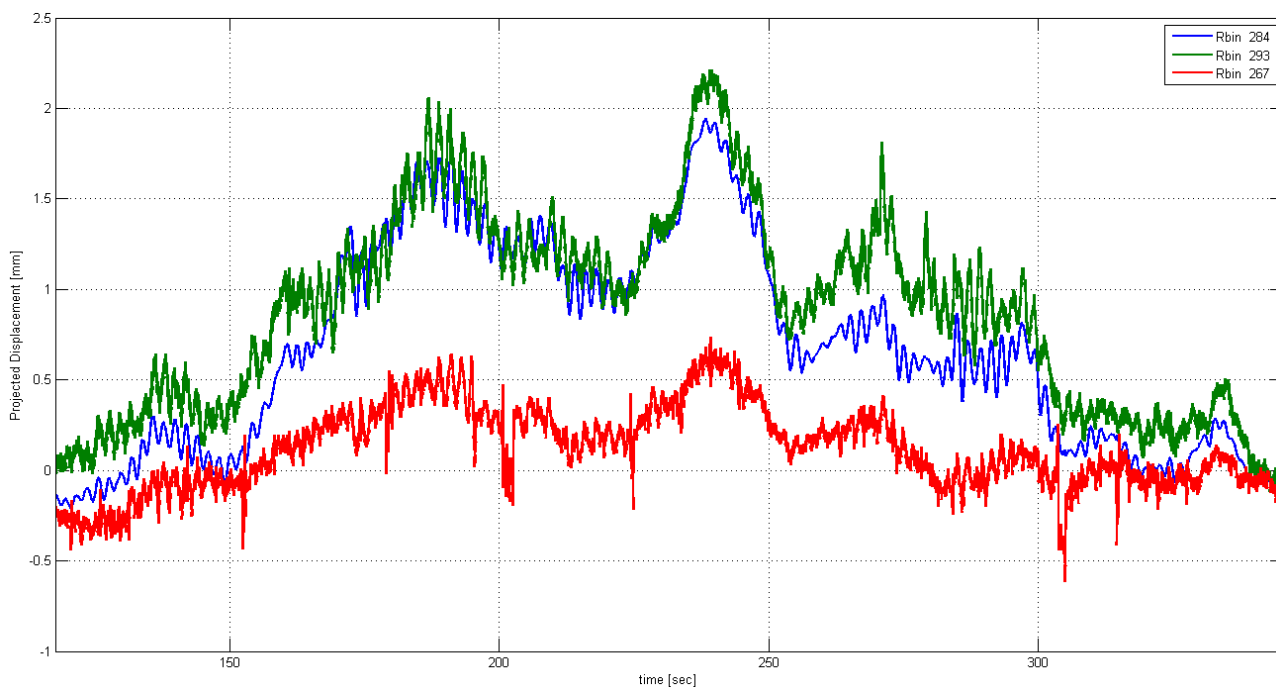
Obr. 8 Polární graf amplitudy a fáze přijatého signálu

Na grafu jsou patrné shluky bodů ve tvaru částí kružnic se středem v bodě s nulovou amplitudou a malým rozptylem v radiálním směru amplitudy. Uzavřené kružnice signalizují pohyby odpovídající celému rozsahu rozdílů fází odeslaného a přijatého signálu (tj. v rozsahu min. -4,38mm až +4,38mm). Střed kružnic v bodě s nulovou amplitudou znamenají, že v daných Rbin se nenachází jiný odrazeč. K tomu je nutno poznamenat, že nebyla použita funkce softwaru IBIS Data Viewer „Remove Clutter“, která slouží k odstranění stabilního odrazeče v dané Rbin a způsobuje posun středu kružnice či části kružnice (oblouku) na polárním grafu. U daného typu objektu to není potřeba, protože ve vyhodnocovaných oblastech se žádné jiné stabilní odrazeče nenacházejí. Použití této funkce v tomto případě by nezpůsobilo žádný nebo pouze malý posun středu kružnice na polární grafu, a tento umělý zásah do měřených dat by v tomto případě měření spíše znehodnotil. Z polárního grafu lze usoudit, že vybrané radiální spádové oblasti je pravděpodobně možno úspěšně vyhodnotit a je tedy možno přistoupit k dalšímu kroku – vyhodnocení vodorovných pohybů.



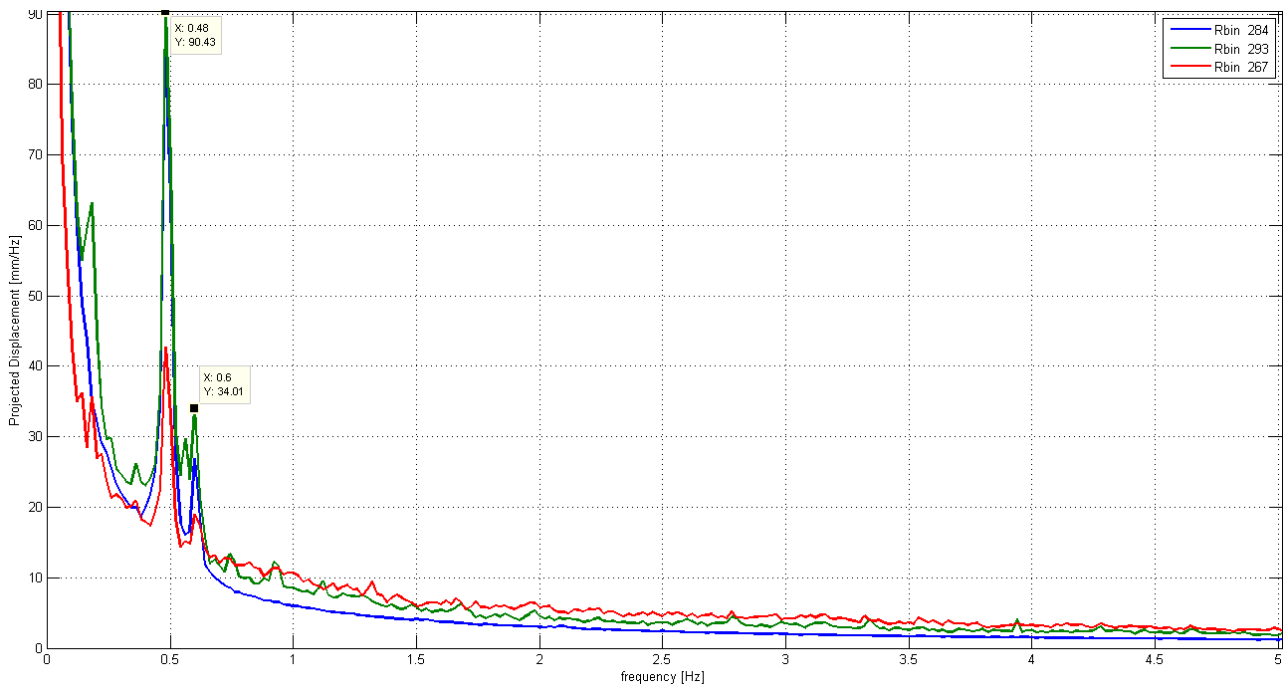
Obr. 9: Vodorovné pohyby vybraných Rbin – za celé měření

Na grafu vodorovných pohybů vybraných Rbin budovy City tower (Obr. 11) je patrná vysoká frekvence a proměnlivá amplituda kmitání. Lze pozorovat pohyb vrcholu budovy od +2 mm do -0,6 mm. Měření nezachycuje žádné rušení kmitání, lze usuzovat, že budova není vybavena tlumičem vlastních kmitů nebo nebyl při takto malých úchylnkách a nízké frekvenci spuštěn jeho chod. Další možností je, že je konstrukce budovy tuhá a nevyžaduje tlumení. Z grafů pohybu lze usoudit, že tomu tak je. Při nízkofrekvenčním kmitání se budova chová jako kyvadlo.



Obr. 10 Vodorovné pohyby vybraných Rbin – detail kmitání

Frekvence kmitání budovy je možno zjistit frekvenční analýzou resp. z periodogramu vodorovných pohybů (Obr.13). Nejsilnější frekvencí je 0,48 Hz. Další významné frekvence jsou 0,2 a 0,6 Hz.



Obr. 11: Periodogram frekvenční analýzy vybraných Rbin

## 8. Závěr

Výše popsaným měřením bylo ověřeno, že pozemním interferometrickým radarem je možno úspěšně sledovat a určovat vodorovné pohyby výškových budov, které poskytují dostatečně silné odrazy vhodné k vyhodnocení. Fasády výškových budov jsou často tvořeny skleněnými panely a ty jsou spojeny kovovými prvky, které dobře odrážejí radarový signál. Jak vyplývá z obr. 7-8 lze na fasádě ukázkového objektu nalézt v jeho horní polovině množství kvalitních odrazů a není tedy nutno osazovat koutové odražeče. Druhý nejvyšší český mrakodrap vykazuje velikosti vodorovných pohybů v řádech milimetrů při síle větru kolem 8 m/s a frekvenci kmitání s amplitudou dvou sekund.