

Ověřená technologie určování vodorovných pohybů stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem

Milan Talich, Daniel Hankus, Michal Glöckner, Filip Antoš, Lubomír Soukup,
Jan Havrlant, Ondřej Böhm, Miroslava Závrská, 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	8
5.6. Provedení měření radarem	8
5.7. Doplnková měření	9
5.8. Výpočty, kontroly a předběžné zhodnocení výsledků v terénu	9
5.9. Nebezpečí při měření větrných elektráren	9
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

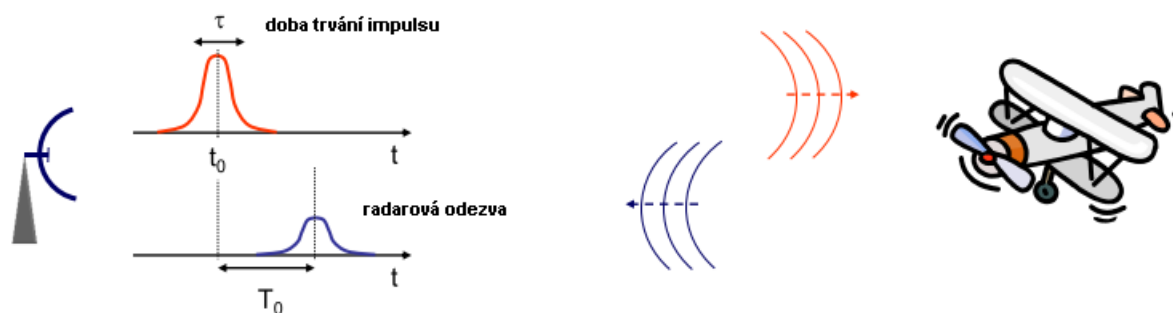
1. Úvod

Tato dokument popisuje ověřenou technologii určování vodorovných pohybů stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem. Tato inovativní technologie umožňuje měřit pohyby v několika sledovaných bodech na stožáru současně. Měření probíhá kontinuálně s vysokou snímací frekvencí (až 200 Hz) a vysokou přesností (až 0,01mm). S využitím přirozených odrazečů radarového signálu na stožáru je možno pohyby měřit na dálku bez nutnosti přístupu ke stožáru.

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** .

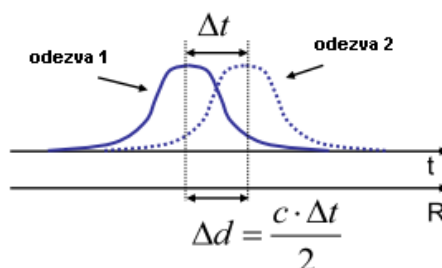
Vzdálenost je určena pomocí rychlosti světla c podle vztahu

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

kde T_0 představuje opoždění odezvy. Koncepti radiálního rozlišení vyjadřuje vzorec

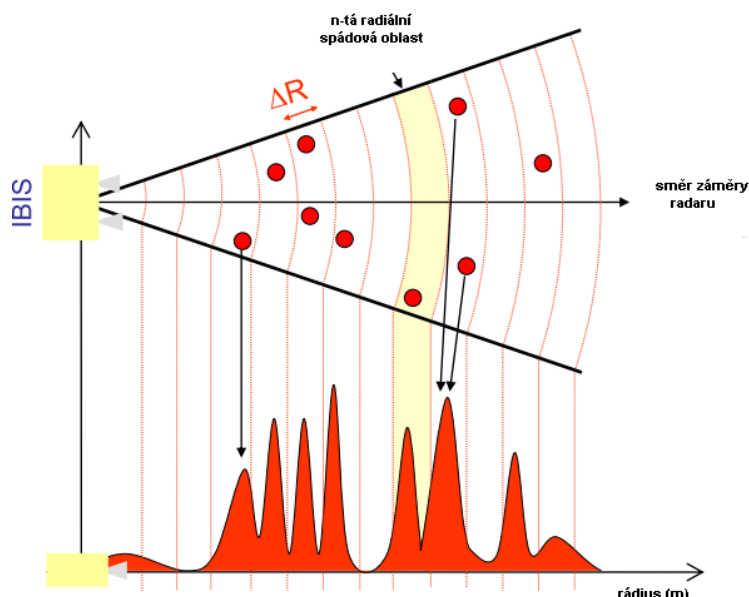
$$\Delta R = \frac{c\tau}{2},$$

kde τ je doba trvání vysílaného 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):

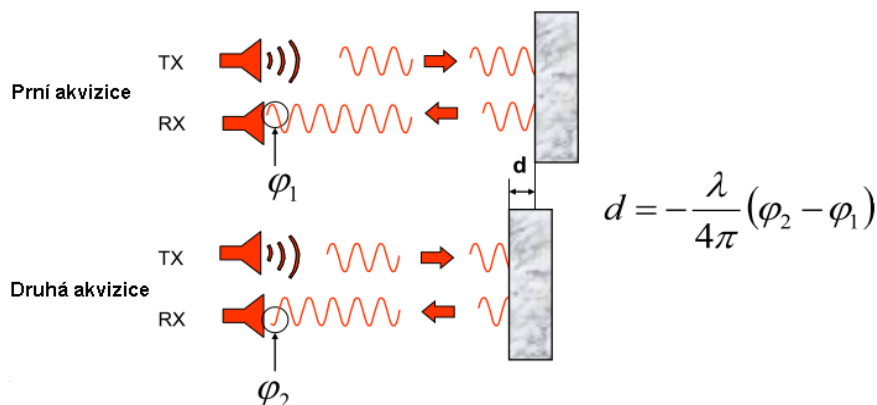
$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} = \left(\frac{A_{signal}}{A_{\text{šum}}} \right)^2,$$

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:

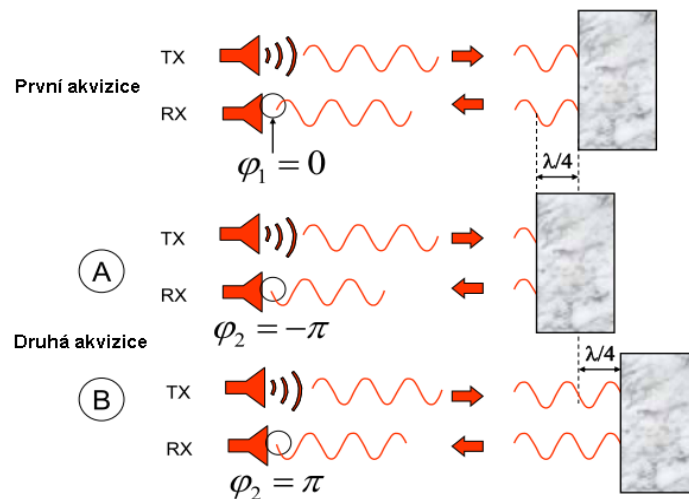
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{\text{šum}}} \right)$$

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.



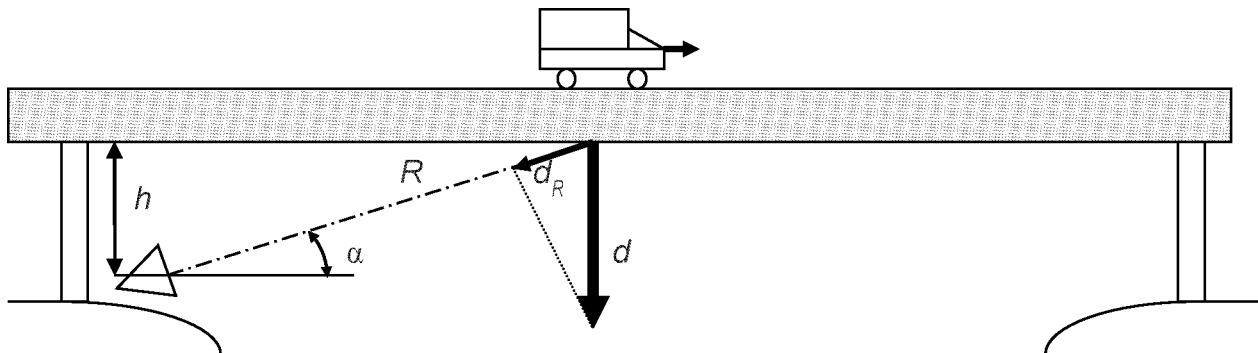
Obr. 4: Princip diferenční interferometrie

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. Nemí-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 ovšem možno dosadit střední hodnotu $f = 17$ GHz. Směrodatnou odchylku fázového posunu lze vypočítat pomocí vzorce:

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

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:

$$\sigma_{d_r} = \frac{c}{4\pi f \sqrt{2 \text{SNR}_e}}$$

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 mikrovlnném 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 snímací 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 je 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 geodetického stativu případně pomocí podobného adaptéru do geodetické trojnožky.

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 přímku (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 větrné elektrárny a jejího okolí. Při ní se zjistí zejména přístupové cesty, přístupnost, překážky ve výhledu a přítomnost a rozestup spojů na stožáru elektrárny, které tvoří potenciální odražeče radarového signálu. Dále se např. z informační cedule nebo na internetu zjistí technické parametry, zejména výška stožáru,

průměr rotoru vrtule, minimální rychlost větru potřebná pro zapnutí elektrárny a maximální rychlost větru, kdy dojde k bezpečnostnímu vypnutí větrné elektrárny.

5.2. Sledovaná místa a jejich signalizace

Stožáry větrných elektráren 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 prstenců a příp. i sekcí vystupují nad povrch stožáru a tvoří potenciální přirozené odražeče radarového signálu.

5.3. Doba měření a povětrnostní podmínky

Sledování vodorovných pohybů stožáru větrné elektrárny je vhodné provádět v době, kdy se stožár pohybuje. Stožár se pohybuje při provozu větrné elektrárny, kdy se její rotor otáčí. K výraznému kmitání pak dochází v době, kdy se elektrárna zapíná a vypíná (kdy dochází k připojování generátoru k rotoru elektrárny či jeho odpojování). Měření je tedy nutno provádět za větru dostatečně silného a s neproměnlivým směrem. Pro měření pohybů při zapínání a vypínání elektrárny pak při rostoucí, klesající, či proměnlivé rychlosti větru procházející hodnotou nutnou k zapnutí větrné elektrárny, příp. hodnotou, kdy dojde k bezpečnostnímu vypnutí větrné elektrárny. Délka doby měření se zvolí tak, aby se v dané době zachytil požadovaný pohyb stožáru. Může se pohybovat od několika desítek minut po několik hodin. K zachycení okamžiku vypnutí či zapnutí větrné elektrárny je zpravidla nutno provést dlouhodobější měření trvající i několik hodin a k vyhodnocení pak vybrat jen časový úsek zachycující vypnutí elektrárny, její zapnutí či obojí. V tomto případě je ale možno vyhodnotit pouze kratší časový úsek, v němž měření není příliš ovlivněno změnami atmosférických podmínek, deformacemi stativu, podloží, na němž je stativ umístěn apod.

5.4. Umístění radaru

Radar se umístí zpravidla na těžký dřevěný stativ na vhodné místo pod větrnou elektrárnu. 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 směru větru od stožáru větrné elektrárny (směrem, kde ukazuje konec gondoly elektrárny), brání-li tomu překážky či jiné důvody, může být umístěno i proti směru větru (směrem, kam ukazuje vrchol krytu středu rotoru elektrárny). Vzdálenost radaru od paty stožáru větrné elektrárny je určena třemi požadavky:

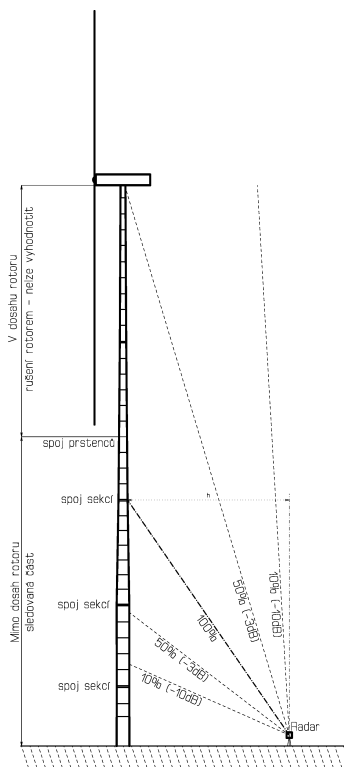
- 1) Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od paty stožáru, aby byla dodržena vhodná geometrie při měření i na nejvyšší měřené body, tj. aby projekční faktor (poměr šikmé ku vodorovné vzdálenosti mezi středem rad. spád. oblastí a nejvyšším sledovaným bodem stožáru) byl co nejmenší.
- 2) Radar musí být umístěn do takové vzdálenosti od paty stožáru, aby spoje stožáru nespádaly 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 stožáru, aby odrazy od spojů stožáru elektrárny byly dostatečně silné, tj. aby vzdálenosti mezi radarem a spoji byly co nejmenší.

Požadavek 1) ovlivňuje vzdálenost mezi radarem a patou stožáru směrem nahoru (k vyšším hodnotám), požadavky č. 2) a 3) pak směrem dolů (k nižším hodnotám), výsledná při měření

používaná hodnota vodorovné vzdálenosti mezi radarem a stožárem je pak mezi $\frac{1}{2}$ až $\frac{1}{4}$ výšky nejvyššího sledovaného místa na stožáru měřené od paty stožáru. Nejvyšší sledovaný bod stožáru větrné elektrárny je nejvýše položený spoj mimo dosah listů vrtule rotoru a nachází se zpravidla přibližně uprostřed stožáru.

5.5. Volba antén a zacílení radaru

Pro měření stožáru větrné elektrárny 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 spoj stožáru, který se následně zaměří totální stanicí. Spoj vybraný pro zacílení radaru je vhodné zvolit v horní polovině sledované části stožáru. Spoje v horní polovině sledované části stožáru jsou od radaru vzdáleny více než spoje v dolní polovině sledované části stožáru 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 stožáru větrné elektrárny

5.6. Provedení měření radarem

Zaměření vodorovných pohybů stožáru větrné elektrárny se provede v dynamickém pracovním režimu s vysokou snímací frekvencí, tak aby se podrobně zachytil pohyb stožáru v čase měření. Při delším měření trvajícím řádově hodiny, je možno frekvenci přiměřeně snížit, aby množství zaznamenaných dat nebylo příliš velké. Při měření je potřeba zadat do programu IBIS Surveyor alespoň přibližné hodnoty geometrických parametrů a při vyhodnocení je upřesnit dle výsledků doplňkového měření. Velkou pozornost je ale třeba věnovat hodnotě dosahu radaru, protože ta určuje maximální vzdálenost zaznamenávaných dat. Dosah radaru je vhodné zvolit podle výsledků

doplňkového měření, které je tak třeba provést ještě před samotným měřením radarem. Hodnoty geometrických parametrů vkládané do programu IBIS Surveyor je možno zadat dle dříve zjištěných parametrů větrné elektrárny (výška stožáru), odhadnout nebo orientačně změřit pásmem, ručním dálkoměrem příp. krokováním (vodorovná vzdálenost radaru a stožáru) 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 spojů stožáru. Malý sklon pláště stožáru je možno zanedbat. 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). Především jde o dosah radaru, který je přibližně určen šikmou vzdáleností k nejvýše položenému spoji mimo dosah listů vrtule rotoru.
- 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 měřenými radarem a identifikaci těchto bodů sledovaných radarem.

Doplňkové měření větrné elektrárny je možno provést polární metodou totální stanicí vybavenou dálkoměrem umožňujícím měření délek bez hranolu. Protože při měření vysokého stožáru větrné elektrárny 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 stanice se zaměří viditelné rohy tělesa radaru potřebné pro výpočet počátku radiálních spádových oblastí a 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 lze nainstalovat např. do ovladače radaru (notebooku). Zpracování a vyhodnocení se provede podobným způsobem, jako závěrečné vyhodnocení v kanceláři.

5.9. Nebezpečí při měření větrných elektráren

V zimním období není možno se k větrným elektrárnám přibližovat a provádět zde měření z důvodu nebezpečí odpadávání kusů ledu z listů rotoru. Na tuto skutečnost zpravidla upozorňují také výstražné cedule umístěné v okolí elektrárny.

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 rad. spád. oblastí (viz. příloha č. 1). Kontrolu zaměření rohů tělesa radaru je možno provést porovnáním délek mezi zaměřenými rohy vypočtených ze souřadnic a skutečnými rozměry tělesa radaru. Ze souřadnic počátků rad. spád. oblastí 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 délku mezi počátkem rad. spád. oblastí a sledovaným objektem. K tomu poslouží vodorovné délky měřené nepřímou totální stanicí. Protože plášť stožáru větrné elektrárny je zpravidla mírně šikmý, vodorovné délky se s výškou postupně zvětšují, malé rozdíly délek ale způsobí pouze velice malé a bezvýznamné odlišnosti výsledků a je možno je zanedbat. Nejvhodnější je zadat hodnotu vodorovné délky na spoji na střední záměrné přímce radaru, kde byl radar zacílen. Protože tento spoj je blízko středu vyhodnocované části stožáru, je tato délka také blízko průměru délek spojů ve vyhodnocované oblasti. 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 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

Výběru konkrétních radiálních spádových oblastí k vyhodnocení se provede na profilu odrazivosti, což je graf závislosti poměru signálu k šumu na vzdálenosti měřené radarem. Odrazy radarového signálu od spojů na stožáru větrné elektrárny se na tomto grafu zobrazí jako lokální maxima, která se následně vyberou k vyhodnocení. Vybrána by měla být maxima rovnoměrně rozložená po celé délce sledované části stožáru mimo dosah listů rotoru. Odrazy v části stožáru v dosahu listů rotoru jsou jimi rušeny a nelze je vyhodnotit.

Identifikace neboli nalezení spojů na stožáru spadajících do rad. spád. oblastí vybraných k vyhodnocení, se provede nalezením šikmých délek zaměřených totální stanicí mezi počátkem rad. spád. oblastí a podrobnými body na spojích stožáru, které se nejméně odlišují od vzdáleností ke středům k vyhodnocení vybraných rad. spád. oblastí měřených radarem. Nacházejí-li se na stožáru výrazné spoje, je možno postupovat opačným způsobem: k vyhodnocení nejprve vybrat tyto konkrétní výrazné spoje a poté najít jejich odrazy na profilu odrazivosti.

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 rad. spád. oblastí 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 stožárů větrných elektráren ovšem zpravidla nedochází k tomu, že v některé vyhodnocované rad. spád. oblasti je přítomen stabilní odražeč, veškerý odraz je od pohybujícího se stožáru, 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 náčrtky, grafy, tabulkami v tištěné či elektronické podobě a vizualizacemi a animacemi v digitální podobě. Nejdůležitějšími výsledky měření stožáru větrné elektrárny 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 spojů stožáru ve vybraných radiálních spádových oblastech zachycující celou délku měření a detailní grafy zachycující vybrané časové úseky např. při zastavení elektrárny. (Tyto grafy je vhodné upravit posunutím nuly pohybů všech rad. spád. oblastí do klidové fáze kdy je elektrárna vypnutá.)
- 3) Periodogramy vodorovných pohybů s určením frekvence kmitání stožáru ve vybraných časových úsecích např. při odpojení elektrárny apod.

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 stožárů větrných elektráren 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 stožáru. Kvalita odrazů je zajištěna přítomností spojů prstenců a sekcí stožáru, které vystupují nad jeho povrch a tvoří přirozené odražeče radarového signálu. Kvalitu odrazů také příznivě ovlivňuje skutečnost, že okolo větrných elektráren se nenacházejí jiné objekty, které by mohly odrážet radarový signál a způsobovat rušení signálu odraženého od stožáru větrné elektrárny. Rušení však způsobuje jedna z částí vlastní větrné elektrárny a to listy rotoru, proto je možno vyhodnotit pouze pohyby spodní části stožáru mimo dosah listů rotoru větrné elektrárny. Z geometrických parametrů je nejvýznamnější výška stožáru, resp. jeho části mimo dosah listů rotoru komína, a vzdálenost radaru od paty stožáru. Tyto parametry ovlivňují hodnoty projekčních faktorů u sledovaných bodů, na nichž závisí přesnost určení vodorovných pohybů stožáru. Podmínkou úspěšného měření pohybů větrných elektráren je stabilní směr větru, protože stožár se kývá nejvíce právě ve směru tlaku větru. Pokud by směr záměry radaru neodpovídal směru kývání stožáru, byly by naměřené výkyvy systematicky menší než skutečné pohyby stožáru. Směr větru je u větrných elektráren snadno rozeznatelný podle natočení gondoly s rotorem. Pro ucelené vyhodnocení pohybů stožárů větrných elektráren je nutno měřením zachytit chování stožáru při různých silách větru a také okamžiky zapínání a vypínání elektrárny resp. generátoru elektrárny, kdy dochází k výraznému rozkmitání stožáru.

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 stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem.
2. Zpráva o polní komparaci pozemního interferometrického radaru IBIS-S.

Zpráva o provedených ověřovacích měřeních

Ověřené technologie určování vodorovných pohybů stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem

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

Obsah

1. Úvod	1
2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí.....	1
3. Použité přístroje a pomůcky	3
4. Postup měření pozemním interferometrickým radarem.....	3
5. Postup doplňkového měření polární metodou	4
6. Výběr a identifikace bodů na sledovaném objektu k vyhodnocení	5
7. Vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem.....	7
8. Porovnání vodorovných pohybů měřených radarem a totální stanicí.....	12
9. Závěr.....	12

1. Úvod

V rámci ověřování technologie určování pohybů stožárů větrných elektráren pozemním interferometrickým radarem bylo provedeno sledování vodorovných pohybů stožáru větrné elektrárny u obce Kámen nedaleko Havlíčkova Brodu.

2. Popis sledovaného objektu a jeho okolí

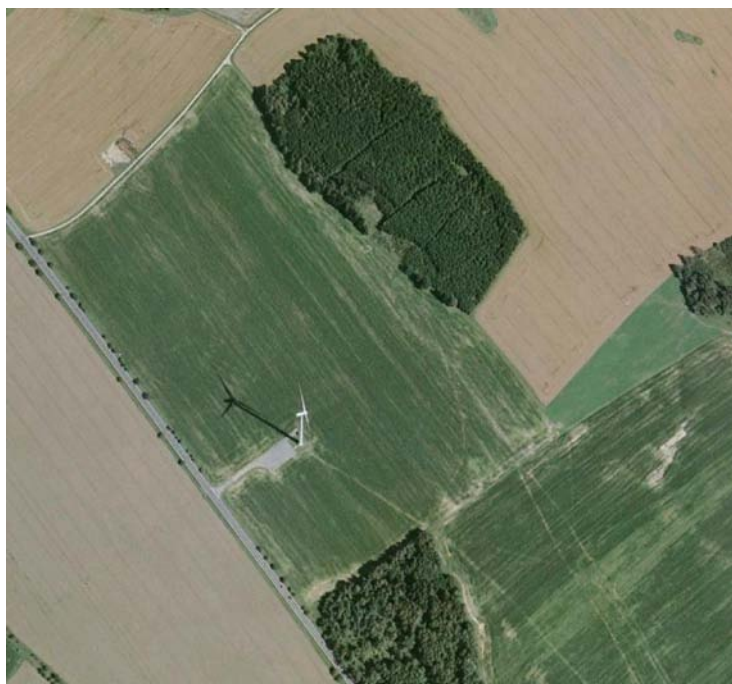
Větrná elektrárna (obr. 1) se nachází na vyvýšeném místě u silnice I/38 Havlíčkův Brod – Habry. Od této silnice vede krátká nepevněná komunikace k parkovišti pod elektrárnou. V okolí elektrárny se nachází pole, které bylo v době měření (srpen 2013) porostlé vysokou kukuřicí. Výhled na elektrárnu je ze všech stran dobrý a nebrání mu žádné překážky kromě jedné nízké budky (obr. 2), která by ale případně zakrývala pouze pro sledování nezajímavou spodní část stožáru.



Obr. 1: Větrná elektrárna u obce Kámen



Obr. 2: Situace okolo paty stožáru



Obr. 3: Letecký snímek větrné elektrárny a jejího okolí

Větrná elektrárna se skládá ze stožáru, gondoly a rotoru (vrtule). Výška stožáru je 105m. Rotor je trojlistý o průměru 90m. Stožár je kovový válcový (tubusový) a skládá se z pěti sekcí, každá sekce se skládá z několika prstenců. Spoje prstenců vystupují nad povrch stožáru a tvoří potenciální přirozené odražeče radarového signálu. Na fotografiích (obr. 4 až 7) jsou čísla označena spoje sekcí a prstenců větrné elektrárny v části stožáru mimo dosah listů vrtule. Spoje sekcí jsou označeny čísla 100, 200, 300, 400 a 500. Číslem 600 je označen styk stožáru a gondoly. Spoje prstenců v první sekci jsou pak označeny čísla 101 až 105, v dalších sekcích pak obdobným způsobem.



Obr. 4 Spoje sekcí a prstenců -část 1



Obr. 5 část 2



Obr. 6 část 3



Obr. 7 část 4

Elektrárna se zapíná při rychlosti větru 3,5m/s a vypíná při rychlosti větru 25m/s. Plného výkonu dosáhne při rychlosti větru 13m/s.

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. K přibližné orientaci totální stanice byl použit nasazovací kompas Sokkia CP9.

4. Postup měření pozemním interferometrickým radarem

Radar byl umístěn na těžký dřevěný stativ v kukuřičném poli cca 30m od stožáru po směru větru tak, aby radar byl na opačné straně stožáru než vrtule (obr. 8 a 9). Radar byl puškohleden zacílen na spoj sekcí 3 a 4 (bod č. 400 na obr. 6).



Obr. 8 Stanoviště radaru



Obr. 9 Zacílení radaru

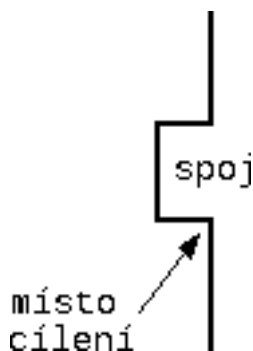
Jak je vidět na obr. 9, umístění radaru po směru větru nebylo zcela přesné, protože směr větru byl proměnlivý. V průběhu měření převládal slabý severozápadní vítr, jehož směr se měnil od severního po západní. Rychlost větru byla také proměnlivá, dle častého vypínání a zapínání větrné elektrárny ji lze odhadnout na 3 až 4 m/s. Tyto povětrnostní podmínky byly pro měření zvoleny záměrně, aby se v průběhu měření zachytilo zastavení rotoru, resp. jeho odpojení od generátoru elektrárny, a jeho opětovné roztočení.

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

Typ měření:	dynamické
Délková rozlišovací schopnost:	0,75 m
Maximální dosah:	115 m
Snímací frekvence:	29,95 Hz
Datum a čas zahájení měření:	16.8.2013 12:58:58
Doba trvání měření:	02:11:08

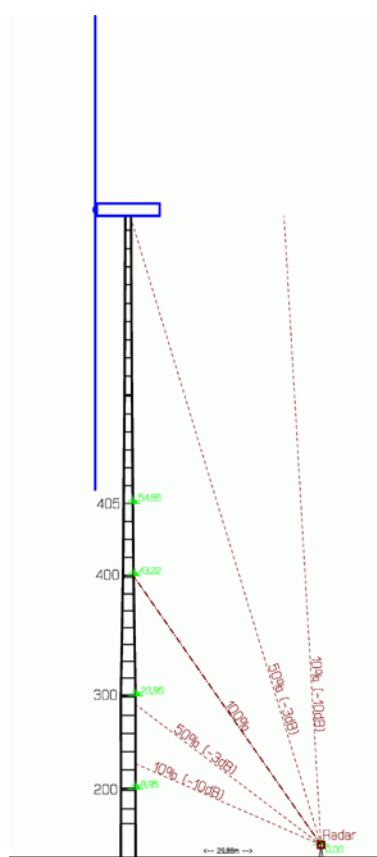
5. Postup doplňkového měření polární metodou

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 stožáru větrné elektrárny. Vzdálenost stanovisek totální stanice a radaru byla jen 2m, protože pouze tak byla zajištěna viditelnost rohů tělesa radaru z totální stanice v hustém kukuřičném porostu. Měřené směry byly přibližně orientovány k jihu nasazovacím kompasem tak, aby byl místní souřadný systém a tedy i měřický náčrt orientován zhruba stejně jako souř. systém S-JTSK. Totální stanicí byly zaměřeny rohy tělesa radaru pro následné určení počátku radiálních spádových oblastí a dále byly zaměřeny všechny viditelné spoje sekcí a prstenců stožáru větrné elektrárny až do výšky, která ještě umožňovala zacílení dalekohledem totální stanice. Místo cílení na spoje je znázorněno na obr. 10:

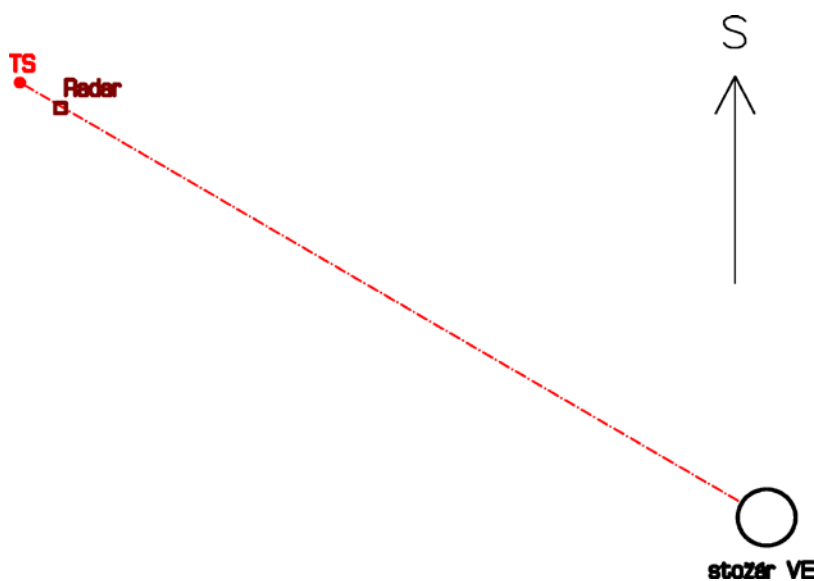


Obr. 10: Místo cílení na spoje prstenců

Spoje sekcí a prstenců ve větší výšce byly zaměřeny již dříve totální stanicí umístěnou ve větší vzdálenosti od stožáru větrné elektrárny a poté transformovány na identické body zaměřené ze stanoviska za radarem. Výsledkem doplňkového měření jsou měřické náčrty (obr. 11 a 12):



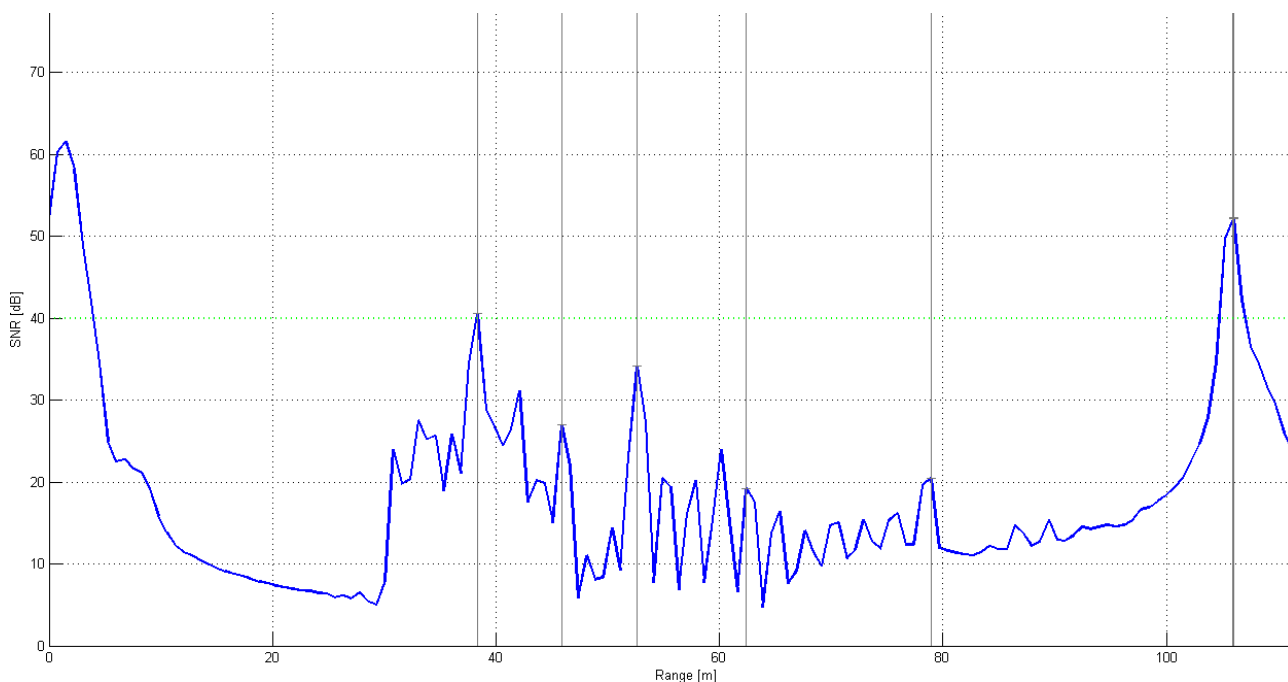
Obr. 11 Měřický náčrt - bokorys



Obr. 12: Měřický náčrt - půdorys

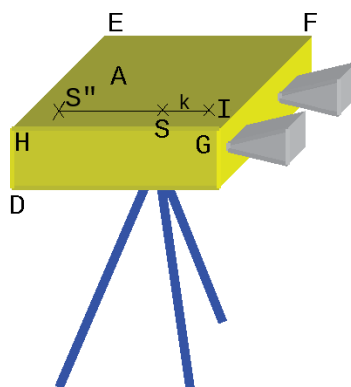
6. Výběr a identifikace bodů na sledovaném objektu k vyhodnocení

Prvním výstupem měření pozemním interferometrickým radarem je tzv. profil odrazivosti, což je graf závislosti poměru 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 radiální spádové oblasti s vysokou hodnotou poměru signálu k šumu, která tvoří na grafu lokální maxima, dalším kritériem volby rad. spád. oblastí k vyhodnocení je pokud možno rovnoměrné rozložení těchto oblastí po celé délce sledovaného objektu, v tomto případě stožáru větrné elektrárny. Následující obrázek (obr. 13) znázorňuje profil odrazivosti a k vyhodnocení vybrané rad. spád. oblasti:



Obr. 13: Profil odrazivosti SNRt

Dále je nutno zjistit jakým bodům či prvkům stožáru větrné elektrárny k vyhodnocení vybrané rad. spád. oblasti odpovídají. Jediná místa na stožáru, která mohou odrážet radarový signál, jsou spoje prstenců tubusu stožáru, které byly zaměřeny totální stanicí. Stačí tedy zjistit, které spoje se ve vybraných radiálních spádových oblastech nacházejí porovnáním vzdáleností k vybraným rad. spád. oblastem měřeným radarem (R) a vzdáleností mezi počátkem rad. spád. oblastí a spoji prstenců stožáru měřených nepřímou totální stanicí (vd). Pro výpočet vzdáleností vd je nejprve nutno vypočítat počátek radiálních spádových oblastí. K tomuto účelu byly na tělese radaru zaměřeny rohy A, D, E, F, G a H (viz. obr. 14) a vypočteny jejich souřadnice.



Obr. 14 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:

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

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):

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

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.

Dalším krokem je odečtení vzdáleností R z grafu profilu odrazivosti a nalezení nejbližší vzdálenosti vd :

Tabulka 1: Identifikace cílů porovnáním délek měřených radarem a totální stanicí.

i	R_i (m)	Nejbližší vd_j (m)	$R_i - vd_j$ (m)	j
52	38,33	38,12	0,21	206
		38,23	0,10	300
		38,31	0,02	301
62	45,85	46,02	-0,17	305
71	52,61	52,55	0,06	308
		52,68	-0,07	400
		52,77	-0,16	401
84	62,39	62,63	-0,24	405
106	78,92	78,25	0,67	411
		78,39	0,53	500
		78,48	0,44	501
142	105,98	105,59	0,39	600 (styk s gondolou)

Indexem i jsou označeny pořadová čísla rad. spád. oblastí, indexem j pak číslo podrobných bodů stožáru. Kurzívou jsou označeny údaje bodů, jejichž souřadnice byly získány transformací dřívějšího měření totální stanicí. K rad. spád. oblastem č. 52, 71 a 106 jsou přiřazeny tři zaměřené podrobné body, protože všechny tyto tři body spadají do těchto rad. spád. oblastí. Jedná se o body na spojích sekcí stožáru, které jsou vždy tvořeny spojem prstenců, spojem sekcí a dalším spojem prstenců ve vzdálenosti cca 15cm (viz. obr. 15).



Obr. 15 Spoj sekcí stožáru

Tyto ztrojené nebo předpokládáme-li, že na odrazu se podílí zejména vystouplé spoje prstenců, zdvojené odrazy pak vytvářejí na profilu odrazivosti (obr. 13) největší maxima. Na spojích prstenců nacházejících se vysoko na stožáru (podrobné body č. 501 a 600) jsou rozdíly vzdáleností větší než polovina rozlišovací schopnosti radaru (větší než 0,375m). To může být způsobeno tím, že k odrazu dochází na větší části těchto spojů, tj. i na bočních stranách stožáru, kde jsou spoje od radaru vzdáleny více, než místa zaměření podrobných bodů, která se nacházejí na bodech spojů, které jsou radaru nejbližší. O tom, že se tyto odrazy nacházejí blízko rozhraní s nižší radiální spádovou oblast a skutečné vzdálenosti k těmto bodům odrazu jsou nižší než vzdálenosti měřené radarem ovšem svědčí rozdvojená maxima na profilu odrazivosti (obr. 13). Další příkladem rozdvojeného maxima je rad. spád. oblast č. 84, kde je však situace opačná – délka měřená nepřímo totální stanicí je větší, než délka měřená radarem.

7. Vyhodnocení měření pozemním interferometrickým radarem

Protože celé měření pozemním interferometrickým radarem trvalo více než 2 hodiny, což je pro dynamické měření dlouhá doba, byl k vyhodnocení vybrán pouze časový úsek 0 až 1800s tj. 30 minut, který zachycuje zastavení rotoru větrné elektrárny, resp. odpojení od generátoru elektrárny, a jeho opětovné rotočení.

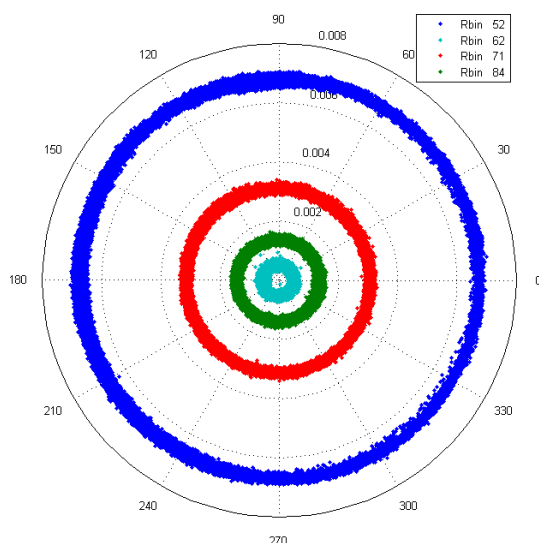
Pro vyhodnocení byly vybrané rad. spád. oblasti rozděleny do dvou skupin. První skupinu tvoří rad. spád. oblasti v dolní části stožáru mimo dosah listů rotoru vrtule (oblasti č. 52, 62, 71 a 84). Druhou skupinu pak body v horní části stožáru v dosahu rotorů listů vrtule.

Nejprve byla vyhodnocena první skupina rad. spád. oblastí, jejichž parametry jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 2

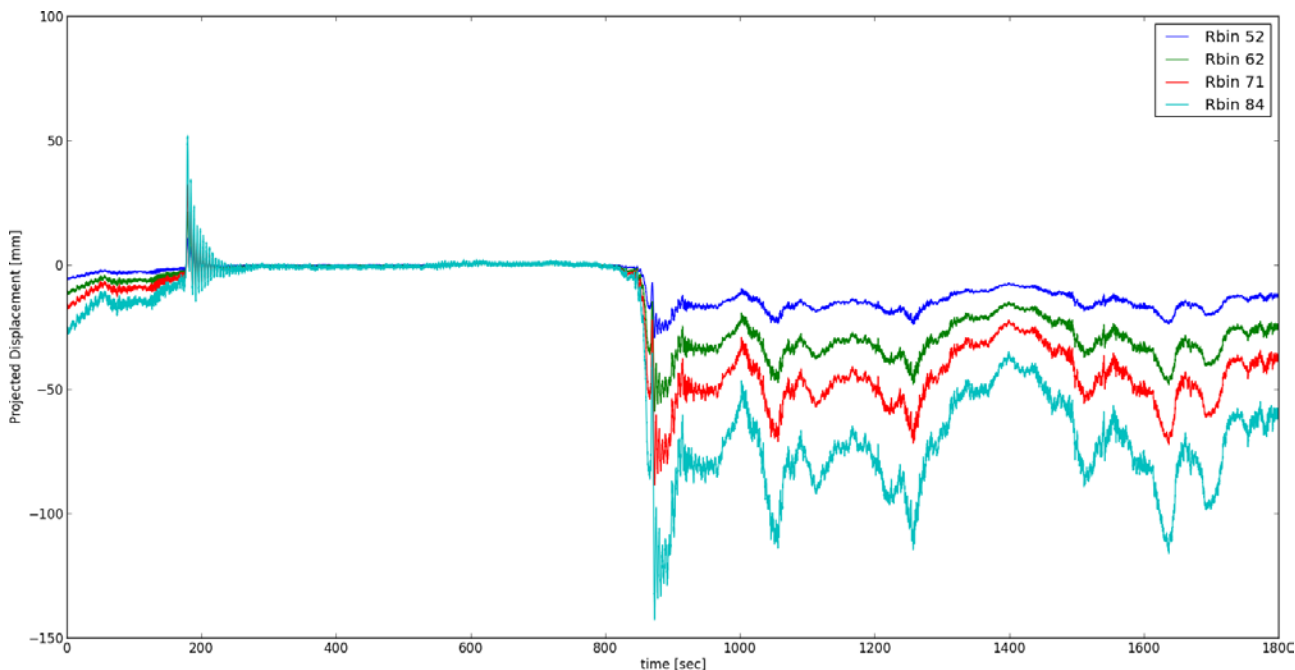
Rbin	R (m)	SNRt (dB)	SNRe (dB)	σ_d (mm)	E (proj. faktor)	$\sigma_{dR} = E \sigma_d$ (mm)
52	38,3	40,6	36,3	0,0151	1,28	0,0193
62	45,8	27,0	23,5	0,0660	1,53	0,1010
71	52,6	34,2	30,4	0,0297	1,76	0,0523
84	62,4	19,2	15,7	0,1624	2,09	0,3394

Prvním vyhodnocením kvality odrazů je kontrola polárních grafů amplitudy a fáze přijatého signálu (obr.16).



Obr. 16 Polární graf amplitudy a fáze přijatého signálu vybraných spojů mimo dosah listů rotoru

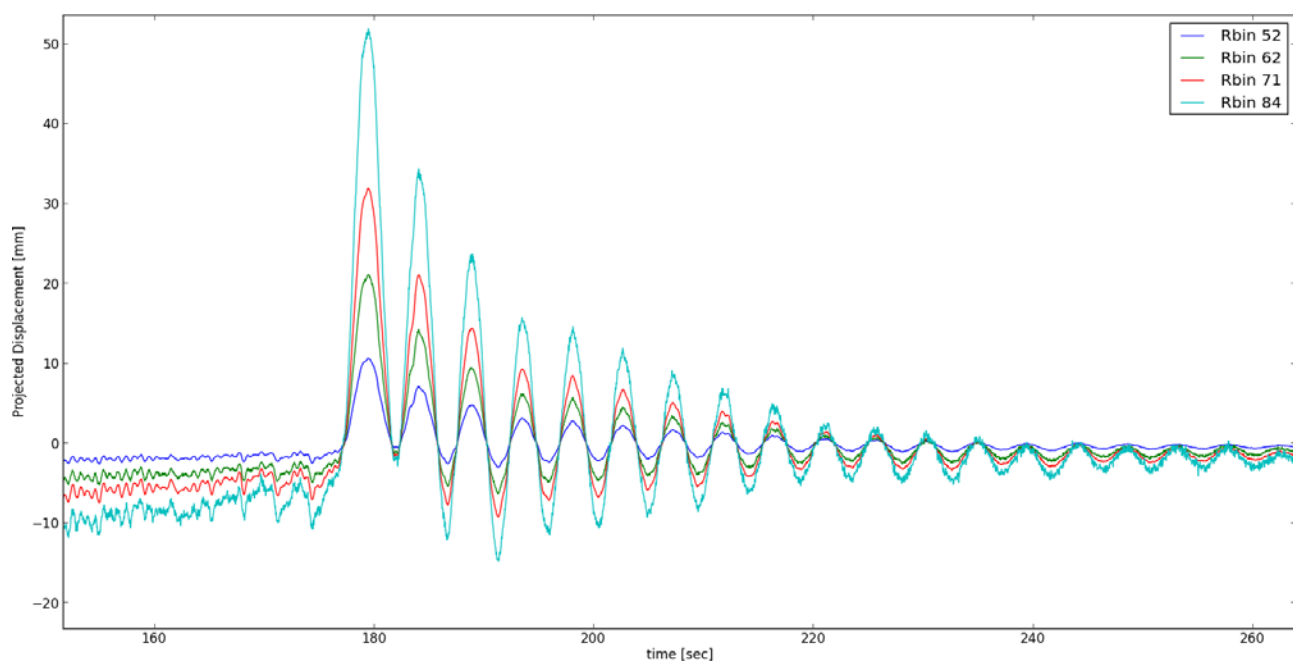
Na grafu jsou patrné shluky bodů ve tvaru uzavřených kružnic se středem v bodě s nulovou amplitudou a malým rozptylem v radiálním směru amplitudy. Uzavřené kružnice signalizují pohyby odpovídající celému rozsahu rozdílů fází odeslaného a přijatého signálu (tj. v rozsahu min. $-4,38\text{mm}$ až $+4,38\text{mm}$). Střed kružnic v bodu s nulovou amplitudou znamenají, že v daných rad. spád. oblastech se nenachází jiný odražeč. K tomu je nutno poznamenat, že nebyla použita funkce softwaru IBIS Data Viewer „Remove Clutter“, která slouží k odstranění stabilního odražeče v dané rad. spád. oblasti a způsobuje posun středu kružnice či části kružnice (oblouku) na polárním grafu. U daného typu objektu – stožáru to není potřeba, protože ve vyhodnocovaných rad. spád. oblastech se žádné jiné stabilní odražeče nenacházejí. Z polárního grafu lze usoudit, že vybrané rad. spád. oblasti je možno úspěšně vyhodnotit a je tedy možno přistoupit k dalšímu kroku – vyhodnocení vodorovných pohybů (obr. 17):



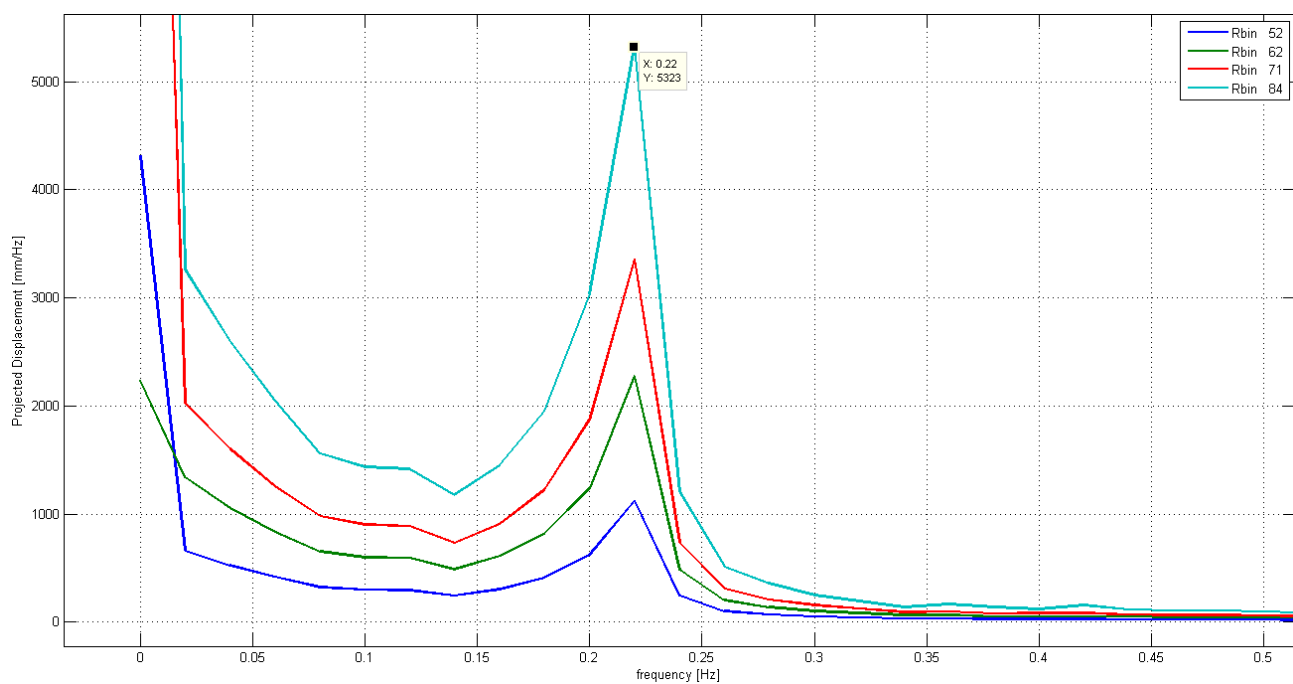
Obr. 17: Vodorovné pohyby vybraných spojů stožáru mimo dosah listů rotoru

Na grafu vodorovných pohybů spojů stožáru je jasně patrný okamžik odpojení rotoru od generátoru v čase cca 175s, po němž následují výrazné tlumené vibrace následované klidovou fází, kdy se rotor neotáčí. Poté v čase 810 až 870s dochází k opětovnému roztáčení větrné elektrárny. Graf byl upraven tak, že nula vodorovných pohybů u všech tří rad. spád. oblastí byla položena do času 700s v klidové fázi.

Frekvenci kmitání stožáru po zastavení rotoru vrtule je možno zjistit frekvenční analýzou resp. z periodogramu vodorovných pohybů v časovém úseku 175 až 260s (obr. 18 a 19).



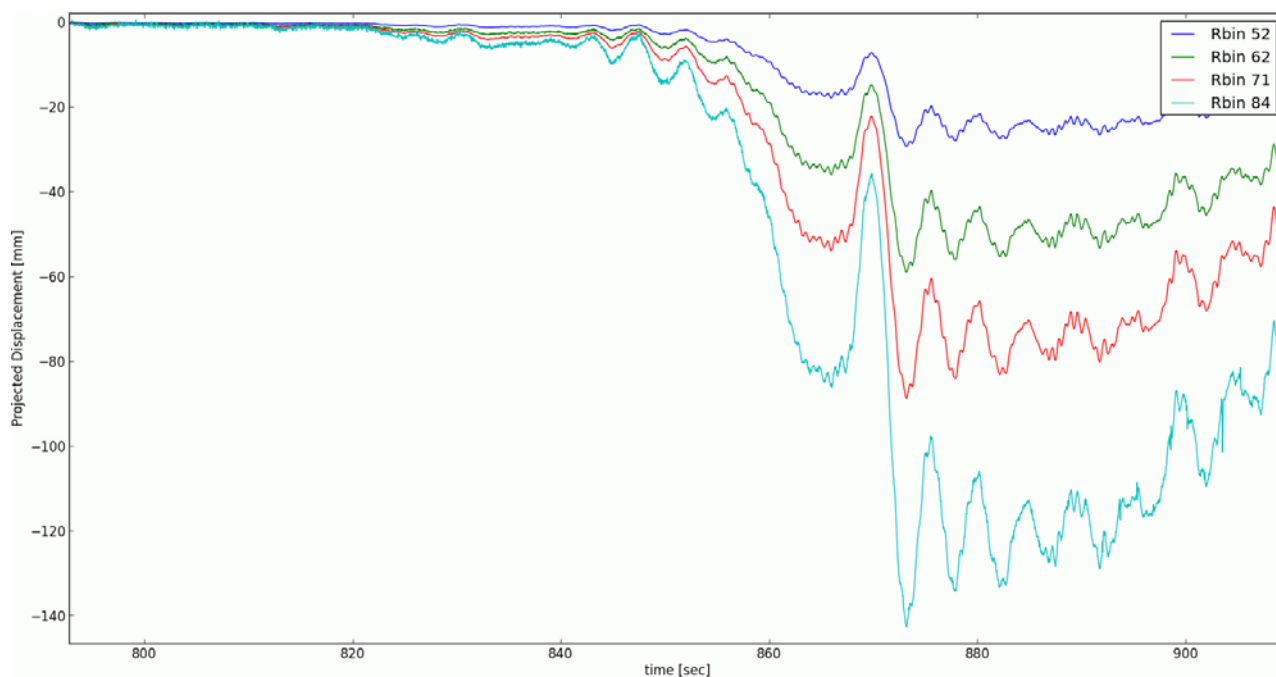
Obr. 18 Vodorovné pohyby vybraných spojů stožáru při vypnutí větrné elektrárny



Obr. 19: Periodogram pohybů vybraných spojů stožáru při vypnutí větrné elektrárny v čas. úseku 175 až 260s

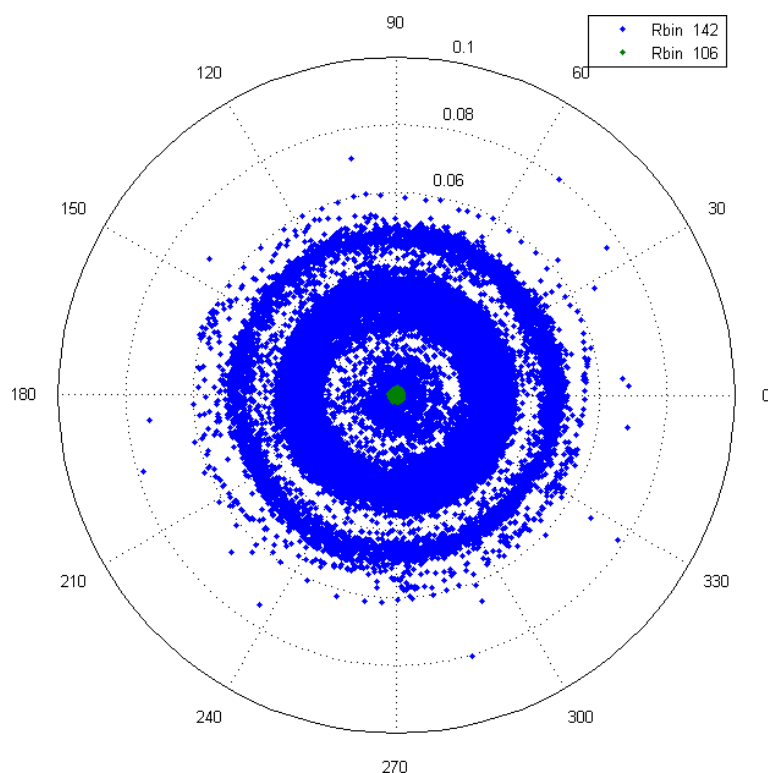
Z periodogramu (obr. 19) je možno odečíst výraznou frekvenci 0,22Hz tj. cca 2 kmity za 10s, což odpovídá vlnám znázorněným na výše uvedeném grafu (obr. 18).

Při opětovném zapnutí větrné elektrárny je na zvětšeném grafu vodorovných pohybů (obr. 20) patrný okamžik kdy patrně došlo k připojení generátoru v čase 870s od začátku měření:

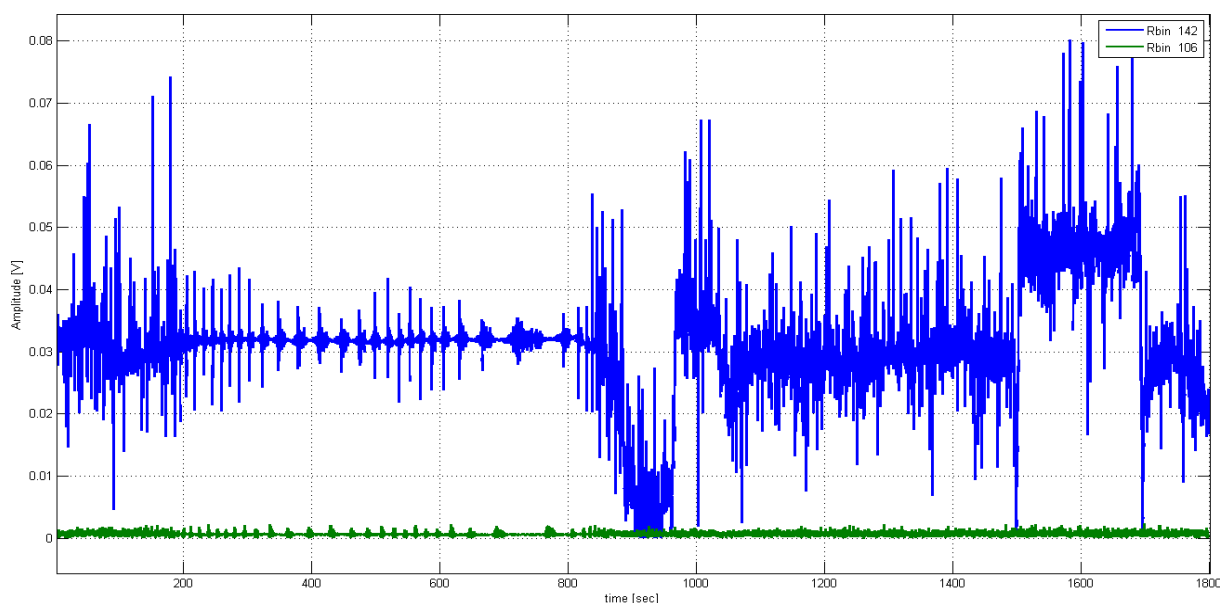


Obr. 20 Vodorovné pohyby vybraných spojů stožáru při opětovném zapnutí větrné elektrárny

Měření na spoje resp. spoj a styk stožáru s gondolou ve druhé skupině je rušeno pohybem listů rotoru větrné elektrárny. Toto rušení znemožňuje jejich vyhodnocení. Skoky způsobené rušením jsou patrné na polárním grafu amplitudy a fáze přijatého signálu i na grafu průběhu amplitudy v čase.

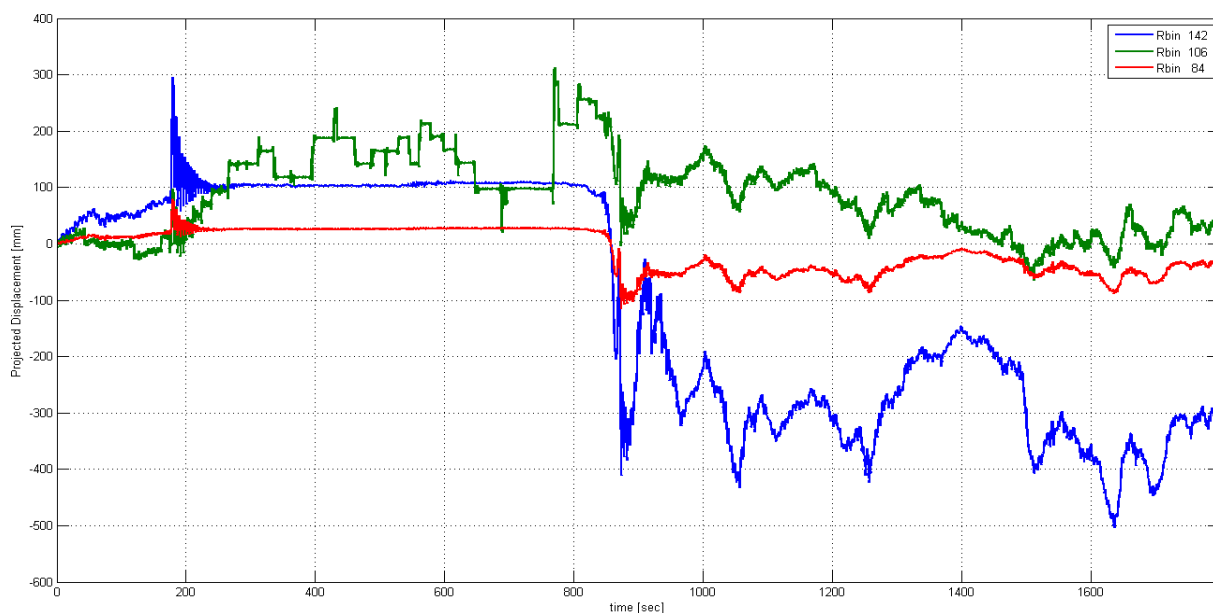


Obr. 21 Polární graf amplitudy a fáze přijatého signálu vybraných spojů v dosahu listů rotoru



Obr. 22 Graf průběhu amplitudy v čase vybraných spojů v dosahu listů rotoru

Podobné znaky rušení je možno nalézt také na grafu vodorovných pohybů (obr. 23). Pro srovnání je v grafu uveden také graf pohybu spoje v rad. spád. oblasti č. 84:

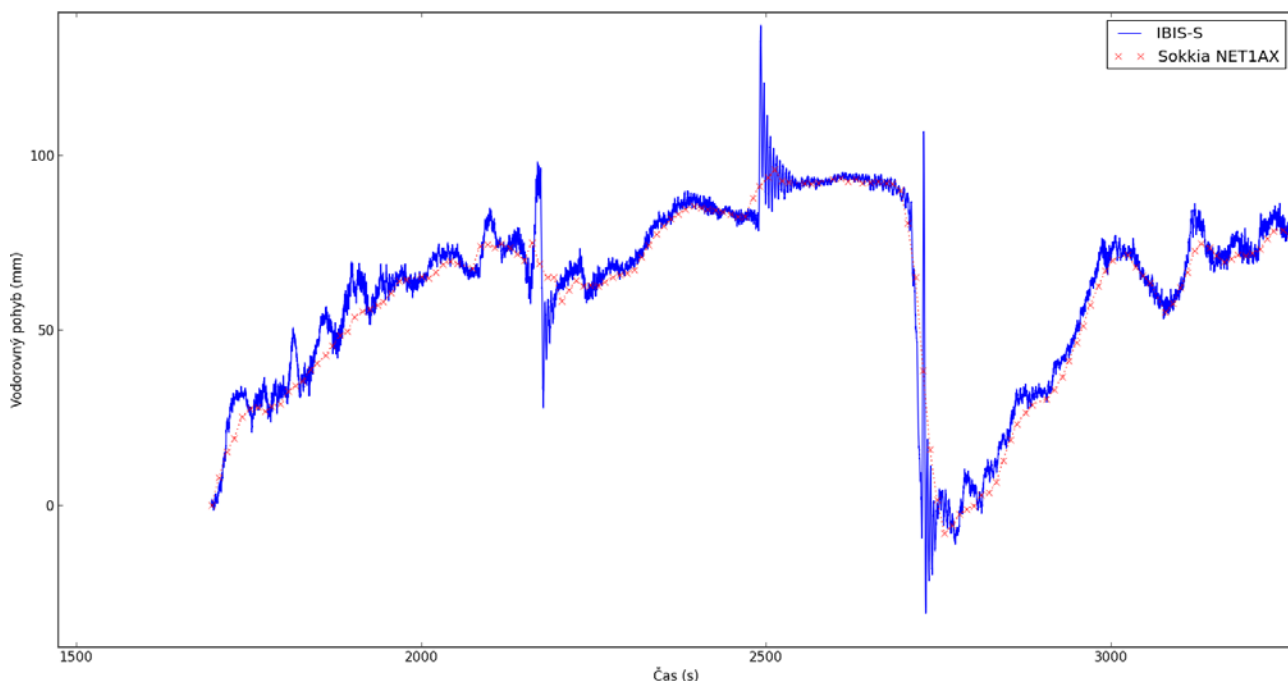


Obr. 23: Vodorovné pohyby vybraných spojů stožárů v dosahu listů rotoru

Skoky jsou způsobeny překročením rozlišovací schopnosti radaru pro pohyb mezi dvěma sousedními záznamy, která je dána fázovým rozdílem vyslaného a přijatého signálu $\Delta\varphi=\pm\pi$, což odpovídá pohybu ve směru záměry $d_R=\pm 4,38\text{mm}$. Při větším pohybu dojde vždy k chybnému výpočtu velikosti pohybu z důvodu chybného určení celého počtu cyklů při fázovém měření a na grafu pohybů se může nebo nemusí objevit skok. Ovšem i když se skok neobjeví, neznamená, to že výsledek měření je v pořádku, protože průchodem listu rotoru rad. spád. oblastí dojde vždy k rušení a znehodnocení měření. Skoky jsou patrné zejména na grafu pohybů spoje v rad. spád. oblasti č. 106, ale na styku stožáru s gondolou jsou přítomny také např. v časovém úseku 900 až 1000s, což je lépe vidět při porovnání s pohyby spoje v rad. spád. oblasti č. 84. Přítomnost skoků spoje v rad. spád. oblasti č. 106 v klidové fázi (v cca 200 až 800s) dokazuje, že i v tomto čase se rotor pomalu volně pootáčí.

8. Porovnání vodorovných pohybů měřených radarem a totální stanicí

Společně s měřením pohybů stožáru větrné elektrárny pozemním interferometrickým radarem byl pro srovnání totální stanicí sledován také nejvýše položený prstenec mimo dosah listů rotoru větrné elektrárny, jehož pohyby měřené radarem lze vyhodnotit. Tento prstenec (bod č. 405 na obr. 6) spadá do rad. spád. oblasti č. 84. Sledování bylo provedeno monitorovací totální stanicí Sokkia NET1AX s využitím měření délek bez hranolu. Totální stanice byla z důvodu neprostupného kukuřičného porostu umístěna až do vzdálenosti cca 400m od stožáru větrné elektrárny přibližně ve stejném směru jako radar. Zacíleno bylo na místo nacházející se několik centimetrů pod spojem č. 405 tak, aby nedocházelo k rušení měření délkou odrazem od vlastního vystouplého spoje. Směrodatná odchylka bezhranolové délky měřené na tuto vzdálenost je 2,4mm. Výsledky tohoto srovnávacího měření znázorňuje následující graf (obr. 24):



Obr. 24: Srovnání vodorovných pohybů spoje v rad. spád. oblasti č. 84 měřených radarem a totální stanicí

Graf zachycuje pouze určitý časový úsek o délce přibližně 30 minut, kdy probíhalo současné měření radarem i totální stanicí. Tento úsek zachycuje také odpojení rotoru od generátoru přibližně v čase 2500s od začátku měření a jeho opětovné spuštění. Jedná se ale o jiný časový úsek než ten, který byl vyhodnocován v předchozí kapitole. Na grafu je patrná shoda výsledku měření radarem a totální stanicí v mezích přesnosti měření délek totální stanicí, která je navíc ovlivněna nedokonalou časovou synchronizací těchto dvou měření. Dále je zřejmé, že totální stanicí, která na danou vzdálenost měří bezhranolové vzdálenosti v intervalu cca 10 sekund, není možno zachytit kmitání stožáru, jehož frekvence je přibližně 2 kmity za 10s.

9. Závěr

Výše popsaným měřením bylo ověřeno, že pozemním interferometrickým radarem je možno úspěšně sledovat vodorovné pohyby stožárů větrných elektráren, které poskytují dostatečně silné odrazy vhodné k vyhodnocení. K úspěšnému vyhodnocení přispívá také to, že u tohoto typu objektu nehrozí přítomnost jiných odrazečů ve sledovaných rad. spád. oblastech, protože v dosahu antén radaru se nachází pouze sledovaný objekt. Další výhodou je snadné rozpoznání aktuálního směru větru podle natočení gondoly větrné elektrárny. Nevýhodou je naopak rušení měření na výše položené spoje stožáru průchodem listů rotoru větrné elektrárny. Tyto spoje ani styk stožáru s gondolou není možno vyhodnotit. Nejvhodnější povětrnostní podmínky pro měření jsou při nízkých rychlostech větru okolo hodnoty, kdy dochází k zapínání elektrárny nebo naopak vysokých rychlostech, kdy dochází k bezpečnostnímu odpojení. V těchto okamžicích je chování stožáru nejzajímavější. V zimním období není vhodné měření provádět z důvodu možnosti odlamování kusů ledu od listů větrné elektrárny.