

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Jakub KRCHNÁK

Autoreferát dizertačnej práce

---

# Diagnostika anténneho systému

---

Na získanie titulu doktor („*Philosophiae doctor*“ - PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe: Meracia technika**

*Pracovisko:*

Ústav elektrotechniky



Bratislava 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave elektrotechniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

**Predkladateľ: Ing. Jakub Krchnák**

Ústav elektrotechniky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Školiteľ: prof. Ing. René Harťanský, PhD.**

Ústav elektrotechniky

Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

**Oponenti: doc. RNDr. Viktor Witkovský, CSc.**

Ústav merania SAV, v.v.i.

Slovenská akadémia vied

Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

**prof. Ing. Milan Smetana, PhD.**

Oddelenie biomedicínskeho inžinierstva

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií, UNIZA

Univerzitná 1, 010 26 Žilina

**Autoreferát bol rozoslaný dňa:.....**

**Obhajoba dizertačnej práce sa konala dňa:.....o.....h.**

na Fakulte elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity, adresa: Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

Dekan FEI STU v Bratislave

**Abstrakt:** Anténny systém je komplexná štruktúra pozostávajúca z mnohých antén, využívaná v širokom rozmedzí použitia prenosu signálu. Jedným z takých použití môže byť aj terestriálne vysielanie FM a DVB-T signálu. Z dôvodu komplexnosti je diagnostika, podmienená poruchou na jednej z antén, takejto štruktúry komplikovaná a predovšetkým si vyžaduje dlhý časový úsek, kedy anténny systém nevyžaruje. Avšak pokroky v odvetví autonómnych dronov ponúkajú nové možnosti a umožňujú realizovať také typy meraní, ktoré doteraz neboli možné, alebo boli značne obmedzené. Cieľom práce je navrhnúť, predstaviť a zjednotiť súhrn úkonov a meraní za účelom zlepšenia procesu identifikácie poruchovej antény v anténnom systéme. Práca pojednáva o diagnostike anténneho systému pomocou meraní intenzity elektromagnetického poľa v okolí anténneho systému. Súčasťou práce je analýza diagnostických metód anténnych sústav používaných v praxi, alebo výskume a popis postupu a následného výpočtu vyžarovacích charakteristík pomocou výpočtového softvéru na báze numerických metód. Práca taktiež prezentuje návrh metodológie pre merania potrebné k identifikácii poškodenej antény, v rámci čoho sú prezentované aj údaje z merania intenzity elektromagnetického poľa pomocou kvadrokoptéry a špecializovaného meracieho zariadenia. Práca vyúsťuje do analýzy a spracovania nameraných dát, čoho výsledkom je identifikácia nevyžarujúcej antény.

**Kľúčové slová:** Smerová charakteristika, anténny systém, numerická analýza, vzdialené pole, matematická analýza, analýza a meranie antén

**Abstract:** An antenna system is a complex structure consisting of multiple antennas, utilized in a wide range of signal broadcast applications. One such application is terrestrial FM (or DVB-T) signal broadcasting. Due to the complexity of the antenna system itself, the process of diagnostics and identification of the faulty antenna is complicated and, more importantly, requires a substantial time period during which the antenna system cannot radiate. However, advances in the field of autonomous drones offer new possibilities and allow to perform previously impossible or limited types of measurements. The main goal of the thesis is to propose, present and unify a set of procedures and measurements in order to streamline the process of antenna identification in large antenna systems. The thesis discusses the antenna system diagnostics based on electromagnetic field intensity measurements in its surroundings. The work also presents the analysis of the current antenna array diagnostic method utilized in the field, or research, and describes the procedure of radiation pattern calculation in the computational software based on numerical methods. Within this work is also a proposal of a measurement methodology designed for the identification of a faulty antenna, part of which is also a showcase of the data obtained from the measurement of the electromagnetic field intensity by a quadcopter and a specialized measurement device. The thesis concludes with the processing and analysis of the measured data, based on which the faulty antenna is identified.

**Keywords:** Radiation pattern, antenna system, numerical analysis, far field, mathematical analysis, antenna measurement and analysis

# Obsah

Úvod	7
<b>1 Smerová charakteristika anténnej sústavy</b>	<b>9</b>
1.1 Matematické vyjadrenie smerovej charakteristiky anténnej sústavy . . . . .	10
1.1.1 Výpočet smerovej charakteristiky anténneho systému vo FEKO . . . . .	11
1.1.2 Simulácia zmeny smerovej charakteristiky spôsobenej poškodenou anténou . . . . .	13
1.1.3 Identifikácia poškodenej antény pre stredne veľké a veľké anténne systémy	15
<b>2 Meranie vyžarovacej charakteristiky anténneho systému pomocou UAV (kvadrokoptéry)</b>	<b>17</b>
2.1 Analýza amplitúdových chýb vyžarovacích charakteristík spôsobených meraním v konečnej vzdialenosti vo FEKO . . . . .	18
2.2 Merania vyžarovacích charakteristík pomocou kvadrokoptéry DJI Matrice 300 a meracieho zariadenia Pixla 1 . . . . .	20
<b>3 Minimalizácia rozptylu údajov použitím vhodných metód spracovania</b>	<b>23</b>
3.1 Minimalizácia rozptylu údajov pomocou Rýchlej Fourierovej Transformácie (FFT) . . . . .	23
3.2 Minimalizácia rozptylu údajov pomocou Rýchlej Vlnkovej Transformácie (FWT) . . . . .	25
<b>4 Vyhodnotenie zmeny smerovej charakteristiky spôsobenej poškodenou anténou</b>	<b>28</b>
4.1 Analýza rozdielov vyžarovacích charakteristík v horizontálnej rovine . . . . .	28
4.2 Vyhodnotenie podobnosti nameraných a vypočítaných vyžarovacích charakteristík . . . . .	30
4.3 Vytvorenie predpokladu pre tvar nameranej smerovej charakteristiky pomocou rozdielov vypočítaných smerových charakteristík . . . . .	31
<b>Záver a zhrnutie</b>	<b>33</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>37</b>
<b>Publikácie a citácie autora</b>	<b>39</b>

# Zoznam skratiek

AS	Antény System
AF	Faktor anténnej sústavy ( <i>Array Factor</i> )
EM	Elektromagnetický
NF	Blízke pole ( <i>Near-Field</i> )
FF	Vzdialené pole ( <i>Far-Field</i> )
PSV	Pomer Stojatých Vln
FM	Frequency Modulation
DVB-T	Digital Video Broadcast - Terrestrial
VKV	Veľmi Krátke Vlny
UKV	Ultra Krátke Vlny
MoM	Momentová metóda ( <i>Method of Moments</i> )
UAV	Bezpilotný dron ( <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> )
HDS	Štruktúra Hertzových dipólov ( <i>Hertzian Dipole Structure</i> )
ERP	Efektívny vyžiarený výkon ( <i>Effective Radiated Power</i> )
PPK	Post Processed Kinematic Positioning
RTK	Real-Time Kinematic Positioning
FT	Fourierova Transformácia
IFT	Inverzná Fourierova Transformácia
DFT	Diskrétna Fourierova Transformácia
IDFT	Inverzná Diskrétna Fourierova Transformácia
FFT	Rýchla ( <i>Fast</i> ) Fourierova Transformácia
IFFT	Inverzná Rýchla ( <i>Fast</i> ) Fourierova Transformácia
STFT	Krátka Fourierova Transformácia ( <i>Short Time Fourier Transform</i> )
WT	Vlnková ( <i>Wavelet</i> ) Transformácia
IWT	Inverzná Vlnková ( <i>Wavelet</i> ) Transformácia
DWT	Diskrétna Vlnková ( <i>Wavelet</i> ) Transformácia
IDWT	Inverzná Diskrétna Vlnková ( <i>Wavelet</i> ) Transformácia

- Rovina E v celom rozsahu práce tento pojem označuje pricipiálnu rovinu, ktorú svojim pohybom vytvára vektor elektrickej zložky elektromagnetického poľa
- Rovina H v celom rozsahu práce tento pojem označuje pricipiálnu rovinu, ktorú svojim pohybom vytvára vektor magnetickej zložky elektromagnetického poľa
- AS1** FM Antény systém pozostávajúci zo **6** antén usporiadaných do dvoch poschodí a **3** azimutov, vysoký **5,69 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **96,0 MHz**
- AS2** FM Antény systém pozostávajúci zo **6** antén usporiadaných do dvoch poschodí a **3** azimutov, vysoký **5,69 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **97,5 MHz**
- AS3** FM Antény systém pozostávajúci z **12** antén usporiadaných do štyroch poschodí a **3** azimutov, vysoký **12,1 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **97,5 MHz**
- AS4** FM Antény systém pozostávajúci z **8** antén usporiadaných do štyroch poschodí a **2** azimutov, vysoký **12,1 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **97,5 MHz**
- AS5** FM Antény systém pozostávajúci zo **16** antén usporiadaných do štyroch poschodí a **4** azimutov, vysoký **12,1 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **100,0 MHz**
- AS6** FM Antény systém pozostávajúci z **24** antén usporiadaných do 8 poschodí a **3** azimutov, vysoký **24,89 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **97,6 MHz**
- AS7** FM Antény systém pozostávajúci z **32** antén usporiadaných do 8 poschodí a **4** azimutov, vysoký **24,89 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **92,5 MHz**
- AS8** DVB-T Antény systém pozostávajúci z **12** antén usporiadaných do 3 poschodí a **4** azimutov, vysoký **3,3 m** dizajnovaný na základnú pracovnú frekvenciu **650,0 MHz**

# Zoznam symbolov

$D$	Najväčší rozmer antény / anténneho systému	[m]
$E_n(\theta, \phi)$	Normovaná hodnota intenzity elektrickej zložkynelektromagnetického poľa v priestore	[-]
$E$	Komplexná amplitúda intenzity elektrického poľa	[V · m <sup>-1</sup> ]
$f$	Frekvencia	[Hz]
$H$	Komplexná amplitúda intenzity magnetického poľa	[A · m <sup>-1</sup> ]
$k$	Vlnové číslo	[rad · m <sup>-1</sup> ]
$k_F$	Fourierov koeficient	[-]
$k_r$	Korelačný koeficient	[-]
$N$	Celkový počet vzoriek	[-]
$r_{1/2/3}$	Vzdialenosť bodu pozorovania	[m]
$s$	Dilatačný parameter	[-]
$S$	Nestranná smerodajná odchýlka	[-]
$t$	Čas	[s]
$W_\chi$	Aproximačný koeficient	[-]
$W_\xi$	Detajlný koeficient	[-]
$X[k_F]$	Fourierov obraz funkcie $x[n]$	[-]
$\delta_{-0,5dB}$	Uhol zvieraný bodmi, ktoré sú potlačené o 0,5 dB voči maximu hlavného laloka	[°]
$\theta$	Elevačný uhol	[°]
$\lambda$	Vlnová dĺžka	[m]
$\xi$	Materská vlnka	[-]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\tau$	Posun vlnky v definovanom intervale	[-]
$\phi$	Azimutálny uhol	[°]
$\chi$	Otcovská vlnka	[-]
$\psi$	Fázová chyba	[°]
$\Psi$	Fázový posun v bode pozorovania	[°]
$\omega$	Uhlová frekvencia	[rad · s <sup>-1</sup> ]

# Úvod

Vysielať rozhlasového a televízneho signálu je na Slovensku realizované pomocou veľkých anténnych systémov (AS) pozostávajúcich z viacerých rovnakých antén. Za účelom dosiahnutia požadovaného pokrytia a kvality signálu sú anténne systémy umiestňované na stožiare, alebo veže vysoké v niektorých prípadoch aj stovky metrov. Samotné stožiare sú umiestnené na vyvýšených miestach ako napríklad na vrcholoch kopcov. Kvôli takto exponovanému umiestneniu sú jednotlivé antény vystavované náročným meteorologickým podmienkam ako silný vietor, dážď, pokrytie súvislou vrstvou ľadu či celkový rozptyl pracovných teplôt. Z toho dôvodu, aj napriek tomu, že samotné antény majú robustnú konštrukciu a sú navrhované do nepriaznivých meteorologických podmienok, môže dôjsť k ich poškodeniu, čo spôsobí zmenu vo vnútorných parametroch a vyžarovacích vlastnostiach antény. V extrémnych prípadoch môže dôjsť k takému poškodeniu, že anténa nevyžaruje vôbec. Jednou z veličín, ktorá definuje zmenu vo vlastnostiach antény je jej vstupná impedancia. V dôsledku poruchy sa môže vstupná impedancia zmeniť, čo spôsobí impedančné neprispôsobenie medzi vedením, ktoré privádza výkon na anténu a samotnou anténou. Kvôli neprispôsobeniu dôjde k vzniku stojatej vlny na vedení - zmení sa pomer stojatých vln (PSV) na svorkách vysielača. *PSV* je kontinuálne zaznamenávaný pomocou monitorovacieho systému vo vysielači a akonáhle *PSV* prekročí istú hranicu, tak vysielač obmedzí výkon dodávaný na AS a v krajných prípadoch môže AS odpojiť, aby sa predišlo poškodeniu. Z toho vyplýva, že v dôsledku poruchy môže dôjsť k zníženiu kvality, alebo výpadku signálu u koncového užívateľa.

Javí sa preto nevyhnutné navrhnuť metódu diagnostiky AS, ktorá môže byť realizovaná počas vysielať. Jednou z možností môže byť vyhodnotenie stavu AS na základe jeho vyžarovacích parametrov, nakoľko ďalším z poznávacích faktorov poškodenej antény je zmena vyžarovacej charakteristiky. Meranie vyžarovacej charakteristiky je jedným z hlavných meraní po inštalácii nového AS a v minulosti bolo toto meranie realizované pomocou helikoptéry. Avšak nové pokroky v technológii bezpilotných dronov inak známych aj ako „Unmanned Aerial Vehicles” (UAV) umožňujú nové možnosti v rámci merania intenzity elektromagnetického (EM) poľa v okolí veľkých AS.

Práca sa zaoberá problematikou identifikácie poškodenej antény pomocou analýzy smerovej (vyžarovacej) charakteristiky celého AS, pričom porovnáva smerové charakteristiky merané pomocou UAV s numerickým výpočtom. Dosiahnutie riešenia dizertačnej práce je podmienené vyriešením čiastkových cieľov, ktoré vyplývajú zo súčasného stavu riešenej problematiky.



**Ciele (témy) dizertačnej práce:**

1. Návrh metódy diagnostiky AS
2. Vyhodnotenie a identifikácia vplyvu fázovej chyby na merané hodnoty intenzity EM poľa
3. Zdokonalenie a spresnenie metód vyhodnocovania vyžarovacej charakteristiky anténneho systému za účelom identifikácie poškodenej antény

Prvým čiastkovým cieľom dizertačnej práce je **Návrh metódy diagnostiky AS**. Riešenie tohto cieľa sa venuje analýze teoretického predpokladu formovania vyžarovacej charakteristiky na základe príspevkov od jednotlivých elementov. Táto časť práce sa zameriava na využitie výpočtového a simulačného softvéru FEKO ako nástroja numerickej analýzy. Využívajúc numerické modely jednotlivých antén sú vypočítané vyžarovacie/smerové charakteristiky jednotlivých anténnych systémov. Následne je ozrejmnený proces náhrady parametrického (3D) modelu antény pomocou substitúcie bodovými zdrojmi a štruktúrou Herzových dipólov. Za účelom zefektívnenia výpočtu je taktiež ukázaný proces vyskladania AS pomocou takýchto numerických elementov. Prezentované sú porovnania vypočítaných vyžarovacích charakteristík pre rôzne AS, ktoré obsahujú nevyžarujúcu (pošadenú) anténu.

Druhým čiastkovým cieľom je **Vyhodnotenie a identifikácia vplyvu fázovej chyby na merané hodnoty intenzity EM poľa**. Riešenie sa zaoberá metodikou a procesom merania vyžarovacích charakteristík v reálnych podmienkach - priamo na mieste osadenia. Sú odprezentované súčasné metódy merania vyžarovacích charakteristík a na základe ich analýzy sú vyzdvihnuté výhody využitia UAV pre riešenu problematiku. Následne sa kladie dôraz na vyhodnotenie vhodnej vzdialenosti pre vykonanie merania vyžarovacích charakteristík, pomocou výpočtov a simulácií vo výpočtovom softvéry FEKO.

Tretím čiastkovým cieľom je **Zdokonalenie a spresnenie metód vyhodnocovania vyžarovacej charakteristiky anténneho systému za účelom identifikácie poškodenej antény**. Riešenie tohto cieľa spočíva v analýze nameraných dát - ich úprava a spracovanie. Sú testované predovšetkým metódy minimalizácie rozptylu údajov ako Kľzavý priemer, Diskrétna Fourierova transformácia a Diskrétna vlnková transformácia, pričom zreteľ je kladený na zachovanie charakteristického tvaru krivky opísanej nameranými údajmi.

Vyriešenie čiastkových cieľov vyúsťuje do záverečnej časti dizertačnej práce, ktorá predstavuje možné metódy vyhodnotenia rozdielov vyžarovacích charakteristík AS bez a s poškodenou anténou. Sú zvýraznené rozdiely vypočítaných vyžarovacích charakteristík ich vzájomným odčítaním, ktoré sú nasledne porovnané s rozdielmi nameraných vyžarovacích/smerových charakteristík. Taktiež je pomocou korelačného koeficienta analyzovaná podobnosť vypočítaných a nameraných vyžarovacích charakteristík. Následne sú obidve metódy skombinované, kedy je pomocou výpočtov a meraní stanovený predpoklad pre tvar smerovej charakteristiky pri poškodenej anténe a tento predpoklad je priamo porovnaný s meraniami. Nakoniec sú na základe tohto porovnania identifikované antény, ktoré počas merania nevyžarovali.

# 1 Smerová charakteristika anténnej sústavy

Jedným zo základných parametrov, ktorý definuje schopnosť antény vyžarovať do priestoru je smerová/vyžarovacia charakteristika. Je to grafické vyobrazenie (3D útvar), definované matematickou funkciou. Na tvar vyžarovacej charakteristiky antény, alebo anténnej sústavy vplýva viacero faktorov a jedným z nich je vzdialenosť od antény, konkrétne to, v ktorej oblasti žiarenia je vyžarovacia charakteristika skúmaná. Na základe správania sa EM poľa v okolí antény je možné zadefinovať tri oblasti žiarenia: *Blízka reaktívna oblasť*, *Blízka vyžarujúca oblasť* a *Vzdialená oblasť* [1]. Fundamentálne sú tieto oblasti a ich hranice popísané na základe analýzy EM pole v okolí prútovej antény. Princípy, ktoré platia v takomto prípade bývajú vo väčšine prípadov vzťahované aj na ostatné typy antén, prípadne sú isté kritéria doplnené z dôvodu všeobecnejšieho popísania problematiky.

## *Blízka vyžarujúca (Fresnelova) oblasť*

Je to prechodová oblasť medzi blízkou reaktívnou oblasťou a vzdialenou oblasťou. V tejto oblasti už nedochádza k oscilácii EM poľa medzi anténou a voľným priestorom a pole sa šíri už iba v smere od antény. V tejto oblasti nemožno zanedbať žiadny z členov  $1/r^3$ ,  $1/r^2$  a  $1/r$  a teda k výslednej hodnote EM poľa budú prispievať všetky jeho zložky. Pre elementárny dipól sa táto oblasť nachádza v blízkom okolí vzdialenosti  $r = \frac{\lambda}{2\pi}$  a pre elektricky malé antény môže dokonca až úplne zaniknúť [2]. Pre antény s nezanedbateľnými rozmermi je všeobecne táto oblasť definovaná vo vzdialenosti:

$$0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < r < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.1)$$

Tento vzťah je odvodený z analýzy okolia prútovej antény a jeho detajlný rozbor je možné nájsť v [1] v Sekcii 4.4. Nakoľko do celkovej vyžiarenej intenzity EM vstupujú rovnakým dielom všetky jeho zložky, čelo guľoplochy je výrazne zakryvené, čo spôsobí nezanedbateľnú chybu pri pozorovaní intenzity EM poľa [3]. Meranie vyžarovacej charakteristiky v tejto vzdialenosti je možné využitím zaužívaných meracích metód, ale nebude sa jednať o výslednú smerovú charakteristiku antény. Je však možné sa pomocou vhodných matematických aparátov ako napríklad *Fourierova transformácia* dopracovať aj k výslednej smerovej charakteristike, ktorú pole nadobudne vo vzdialenej oblasti [4]. Výhoda takéhoto merania je taká, že meranie je zväčša realizované v anechoických komorách a teda vo veľmi dobre kontrolovaných podmienkach.

## *Vzdialená (Fraunhoferova) oblasť*

Najznámejšou a najviac využívanou oblasťou je *Vzdialená (Fraunhoferova) oblasť*, alebo *oblasť žiarenia*. Prevládajú tu už iba členy  $1/kr$ , kedy podľa [5] sú ostatné členy už vo vzdialenosti  $2\lambda$  o rád menšie. Vo vzdialenej oblasti je možné hovoriť o plne sformovanom vlnení, jednotlivé zložky  $EM$  pol'a sú navzájom kolmé. Zložka  $E_\theta$  existuje v rovine, ktorá prechádza osou dipólu a zložka  $H_\phi$  je kolmá na os dipólu, pričom obidve zložky sú zároveň kolmé na smer šírenia. Jednotlivé zložky sú previazané cez charakteristickú impedanciu voľného priestoru, ktorá je rovná ich pomeru a tento sa so vzdialenosťou ani polohou bodu pozorovania nemení [6]. Tvar smerovej charakteristiky sa môže mierne meniť len v dôsledku fázovej chyby spôsobenej zakrivením vlnoplochy guľoveho vlnenia. Všeobecne je dolná hranica vzdialenej oblasti zadaná pomocou *Reyleigho* vzťahu [7]:

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.2)$$

## 1.1 Matematické vyjadrenie smerovej charakteristiky anténnej sústavy

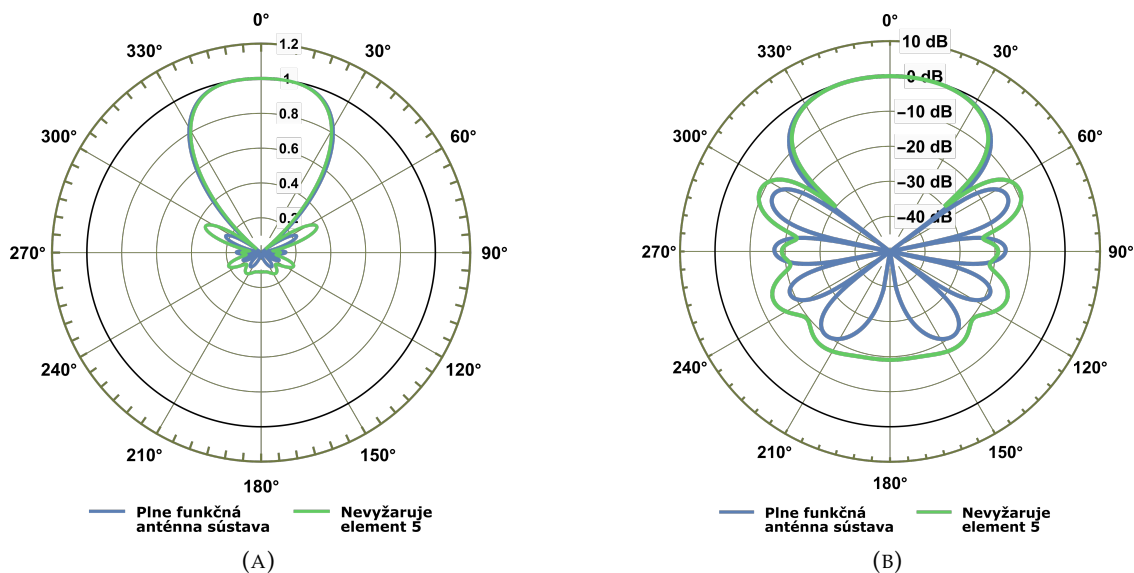
Nasleduje vyjadrenie smerovej charakteristiky anténnej sústavy pozostávajúcej z väčšieho množstva rovnakých žiaričov. Pre názornosť a jednoduchosť budeme uvažovať iba analýzu pre vzdialené pole, nakoľko analýza pre *Fresnelovu oblasť* by si vyžadovala komplikované matematické úvahy, ktoré nie sú cieľom tejto práce. Taktiež je pre demonštráciu najjednoduchšie použiť izotropné zdroje, pre ilustráciu získavania smerovej charakteristiky anténnej sústavy.

Smerovej charakteristika anténnej sústavy je definovaná jej referenčnými elementmi (anténami) a faktorom anténnej sústavy ( $AF$ ).  $AF$  je závislý od počtu a rozmiestnenia elementov a zároveň od fázového posunu signálov privádzaných na jednotlivé elementy. Na základe tejto myšlienky sa dá predpokladať, že zmena konfigurácie, napríklad výpadkom niektorého z elementov, zmení výsledný tvar matematickej formulácie  $AF$  a tým následne aj tvar grafického vyobrazenia výsledného výžarovania. Tento predpoklad môžeme overiť pre lineárnu sústavu desiatich izotropných zdrojov, rovnomerne rozmiestnených pozdĺž osi  $z$ , s rovnomerným rozložením amplitúdy.  $AF$  pre takto definovanú anténnu sústavu je možné na základe definovať ako:

$$AF = \sum_{i=1}^N e^{j(i-1)\Psi}. \quad (1.3)$$

Vyobrazenia rovnice (1.3) sú realizované vo výpočtovom softvéri Wolfram Mathematica a sú zobrazené na Obr. 1.1. Obr. 1.1a zobrazuje smerovú charakteristiku (vo vzdialenom poli) sústavy desiatich (elementov) izotropných zdrojov, ktoré sú navzájom vzdialené o  $\lambda/4$ , sú rovnomerne napájané signálom s amplitúdou  $E_0$  a progresívne rastúcim fázovým posunom o  $90^\circ$ . Jedná sa o normovanú smerovú charakteristiku v lineárnej mierke. Pre zvýraznenie postranných lalokov je k nej prislúchajúca normovaná smerová charakteristika v logaritmicknej mierke zobrazená na Obr. 1.1b. Na týchto obrázkoch sú taktiež zobrazené smerové charakteristiky tej istej anténnej sústavy, avšak pri topológii, kedy jeden z elementov nevyžaruje, konkrétne piaty

element z desiatich. Po vyradení piateho elementu je vidieť zmenu smerovej charakteristiky a to najmä v oblasti kde sa nachádzajú postranné laloky. Najvýraznejšiu zmenu je vidieť v oblasti 150° až 200°, kde pôvodne jednoznačne definované postranné laloky, oddelené minimom na 180° zaniknú a sú zjednotené do jedného zadného laloka.



OBR. 1.1: Porovnanie smerových charakteristík anténnej sústavy desiatich izotropných zdrojov so vzájomnými posunmi  $\lambda/4$  pomocou analytického výpočtu: V lineárnej mierke pri  $\beta = 90^\circ$  a vyradení elementu 5 (A), v logaritmickej mierke pri  $\beta = 90^\circ$  a vyradení elementu 5 (B)

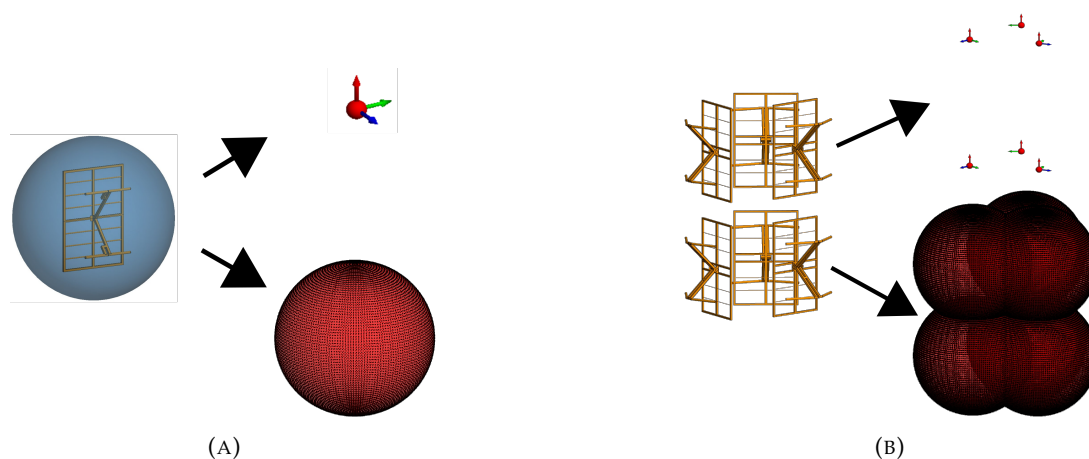
Podarilo sa nám ukázať, že je analyticky možné analyzovať ako smerovú charakteristiku anténnej sústavy pri plnej funkčnosti všetkých elementov, tak aj pri možnosti, kedy jeden z elementov nevyžaruje. Nakoľko však veľké anténne systémy v pásmach *Veľmi krátkych vln* (VKV) a *Ultra krátkych vln* (UKV) pozostávajú s komplexných anténnych štruktúr, ktoré sú rozmiestnené v 3D priestore, tak aplikácia takýchto analytických riešení by mala za následok výrazné skomplikovanie analytického výpočtu, čo by mohlo viesť k ich nízkej efektivite, pričom samotné výpočty by mohli mať vysoké požiadavky na hardvérové vybavenie a samotný výpočet by zabral dlhý časový úsek. Navyše by takáto metóda nemusela viesť k úspechu. Preto sa ako vhodná alternatíva javí numerický výpočet, ktorý je implementovaný vo výpočtových softvéroch ako je napríklad FEKO od firmy Altair. Pomocou numerického výpočtu je možné vypočítať ako vstupné, tak aj vyžarovacie parametre analyzovanej antény.

### 1.1.1 Výpočet smerovej charakteristiky anténneho systému vo FEKO

Pre výpočet vyžarovacích parametrov zvolenej antény vo výpočtovom systéme FEKO, je potrebné vo FEKO vytvoriť jej parametrický model. Pre tento účel existuje grafický editor CADFEKO, ktorý umožňuje vytváranie parametrických modelov, zadefinovanie typu napájania a taktiež zadefinovanie metódy a cieľa výpočtu. V tomto prostredí sú na základe technickej dokumentácie a mechanických meraní fyzických rozmerov antén vytvorené ich modely a sú vypočítané ich vstupné a vyžarovacie parametre. Pomocou takýchto parametrických modelov

by bolo už možné vyskladať celý AS a vypočítať jeho vyžarovaciu charakteristiku. Avšak jedná sa o mechanicky zložité konštrukcie, ktoré obsahujú mnoho nespojitostí a malých elementov. V týchto oblastiach musí byť rozlíšenie diskretizačnej siete trojuholníkov väčšie. Z toho teda vyplýva, že vyskladanie celého AS by viedlo k veľmi veľkým požiadavkám na výpočtový hardvér a jeden výpočet by trval veľmi dlho.

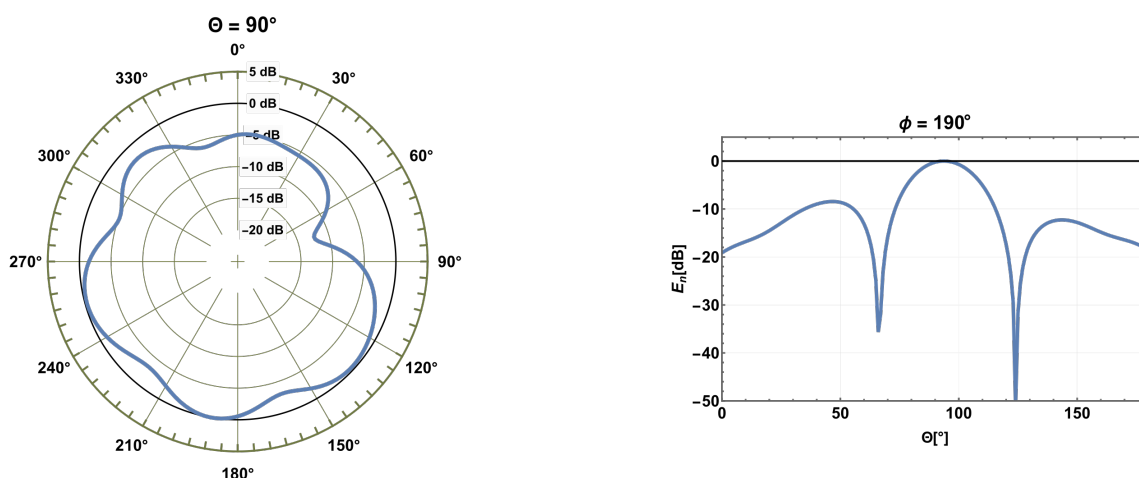
Môže sa teda zdať, že aj v rámci FEKO je takáto analýza problematická a pre komerčnú sféru nerealizovateľná, čo nás vracia na priamu analýzu vyžarovacej charakteristiky antény. FEKO však umožňuje vypočítané vyžarovacie parametre priradiť numerickej náhrade vo forme bodového zdroja, alebo štruktúry Hertzovských dipólov (HDS), vid' Obr. 1.2a. Ak je zvolená metóda substitúcie pomocou infinitezimálneho bodového zdroja, tak v tom prípade je možné replikovať len vyžarovanie antény vo vzdialenom poli, nakoľko vo vzdialenom poli sa anténa javí ako jeden bod. To znamená, že v prostredí CADFEKO sa zadefinuje ako cieľový výpočet vzdialené pole (v nekonečnej vzdialenosti) a výsledky tohto výpočtu je následne možné priradiť tomuto bodovému zdroju. Pri definícii samotného bodového zdroja, je taktiež možné špecifikovať jeho umiestnenie v priestore a zadefinovať amplitúdu a fázu jeho „vstupného signálu“. Vďaka tomu je možné vyskladať celý AS pomocou týchto bodových zdrojov a na základe technickej dokumentácie vyšpecifikovať ich presné rozmiestnenie (vid' 1.2b). Antény v AS sú označované písmenom z Latinskej abecedy a číslom. Písmená označujú azimut natočenia antény a čísla označujú poschodia vzostupne, čím vznikajú označenia ako „A1“; „B3“; „C5“ a pod. Týmto označovaním sa budeme riadiť aj ďalej v práci pri odvolávaní sa na jednotlivé antény. Okrem situovania antén v rôznych výškach a natáčania do rôznych azimutov, sa v rámci jedného AS môžu líšiť aj odsadenia antén od pomyselného geometrického stredu a taktiež aj ich vychýlenia od osi definovanej ich azimutálnym natočením (bočný offset).



OBR. 1.2: Substitúcia jednej antény na bodový zdroj vzdialeného poľa, alebo HDS (A), vyskladanie AS pomocou numerickej substitúcie (B)

Ak je však potrebné realizovať výpočty v konečnej vzdialenosti, za predpokladu, že sa nejedná o dostatočnú vzdialenosť pre existenciu vzdialeného poľa, môže použitie bodových zdrojov viesť ku chybám vo výpočte. Pre tento prípad je vhodnejšie použitie náhrady pomocou HDS. Tie sú založené na princípe, že sa vypočíta vyžarovanie parametrického modelu

antény v sférických súradniciach s veľkosťou polomeru minimálne takou, aby výsledná guľa obklopila celú anténu (viď Obr. 1.2a). Vypočítané hodnoty pre guľu takýchto parametrov sú následne exportované a budú importované pri definícii *HDS*. *HDS* pozostáva z Hertzových dipólov, rozmiestnených po povrchu gule s rovnakým polomerom akým bol polomer výpočtu, a umiestnené do bodov, ktoré boli definované pre výpočet. Následne sú im priradené excitácie, ktoré zodpovedajú rozloženiu *EM* poľa, ktoré bolo pre takto definovaný priestor vypočítané. Takáto štruktúra je schopná replikovať priestorové vyžarovanie pôvodnej antény. Dá sa teda povedať, že parametrický model je nahradený svojím vlastným vyžarovaním v priestore pôvodného výpočtu. Na Obr. 1.3 sú zobrazené priemety vypočítanej smerovej charakteristiky *AS2* vo FEKO v horizontálnej a vertikálnej rovine.

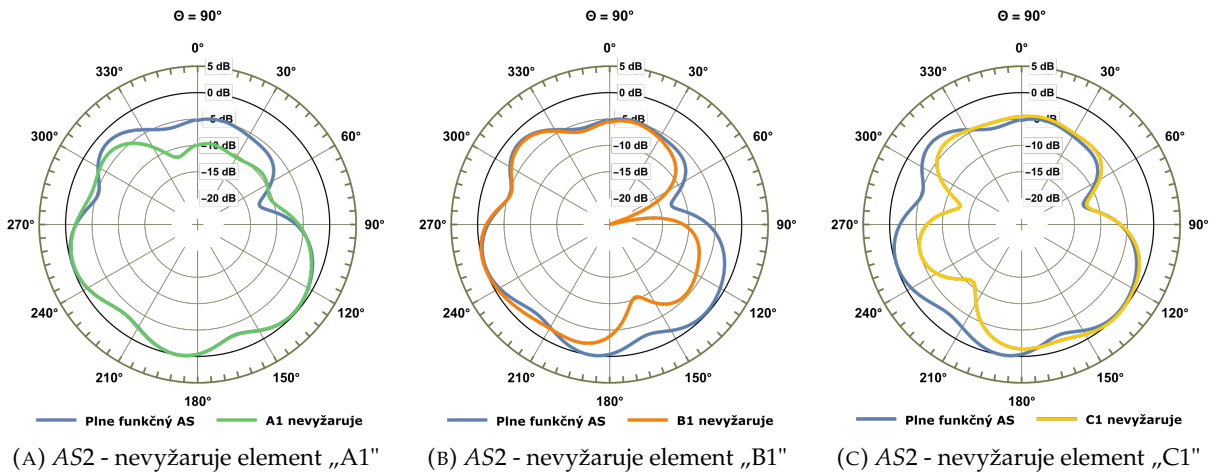


OBR. 1.3: Horizontálna a vertikálna vyžarovacia charakteristika pre *AS* pozostávajúci zo 6 antén usporiadaných do dvoch poschodí a troch azimutov (*AS2*)

### 1.1.2 Simulácia zmeny smerovej charakteristiky spôsobenej poškodenou anténou

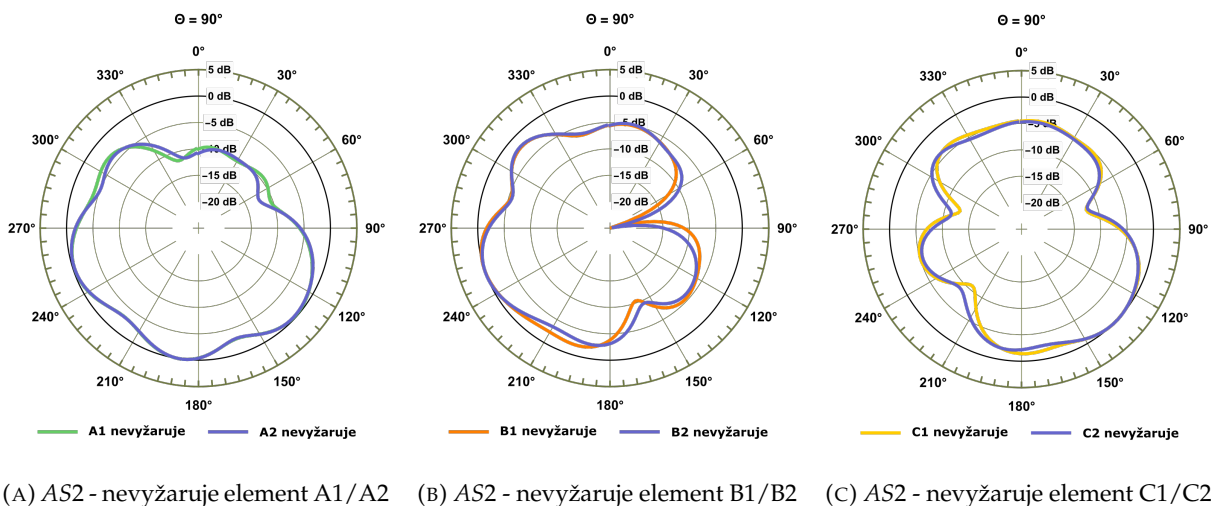
Aby bolo možné pomocou merania smerovej charakteristiky identifikovať poškodenú anténu, samotné meranie nestačí, ale je potrebné vedieť namerané dáta porovnať s nejakou referenciou. Túto referenciu môže poskytnúť FEKO, kde je možné simulovať poruchy na jednotlivých anténach a následne vypočítať smerové charakteristiky anténnych systémov, ktoré obsahujú poškodené (nevyžarujúce) antény. Použitím už vyskladaných numerických reprezentácií *AS* vo FEKO je možné simulovať poruchy postupným nastavovaním amplitúd jednotlivých elementov (numerickej náhrady antény) na nulu, čím sa docieli, že daný element nevyžaruje. Vplyv nevyžarujúcej antény na výslednú smerovú charakteristiku bude závisieť od amplitúdy a fázy jej napájacieho signálu, najmä pri vzťahnutí na ostatné antény a taktiež od veľkosti *AS* (počtu a rozdelenia antén).

Na Obr. 1.4 sú zobrazené smerové charakteristiky v horizontálnej rovine pre *AS2*, ktorý reprezentuje anténny systém pozostávajúci zo šiestich antén rozdelených do dvoch poschodí a troch azimutov a má výšku 5,69 m. Ukázané sú prípady kedy sú postupne vyradované antény v prvom poschodí a rôznych azimutoch. Vo všetkých prípadoch modrá krivka predstavuje plne funkčný *AS* a krivka inej farby predstavuje *AS* pri niektorej vyradenej anténe.



OBR. 1.4: Porovnanie horizontálnych vyžarovacích charakteristík pre AS pri plnej funkčnosti a keď nevyžaruje jeden z elementov pre AS2

Z Obr. 1.4 je možné vidieť, že vo všetkých prípadoch sa smerová charakteristika zmení na základe toho, v ktorom azimute sa nachádza nevyžarujúca anténa. Veľkosť zmeny závisí od počtu antén v AS a od veľkosti amplitúdy vstupného signálu dizajnovaného pre nevyžarujúcu anténu. Pri AS2 je pomer výkonov medzi anténami v azimutoch rozdelený na 1:3:3, kde na antény v azimute „B“ a „C“ je privedený 3-krát väčší výkon ako na antény v azimute „A“. Táto skutočnosť sa prejaví vo výraznejšej zmene smerovej charakteristiky pri vyradení antény B1, alebo C1.



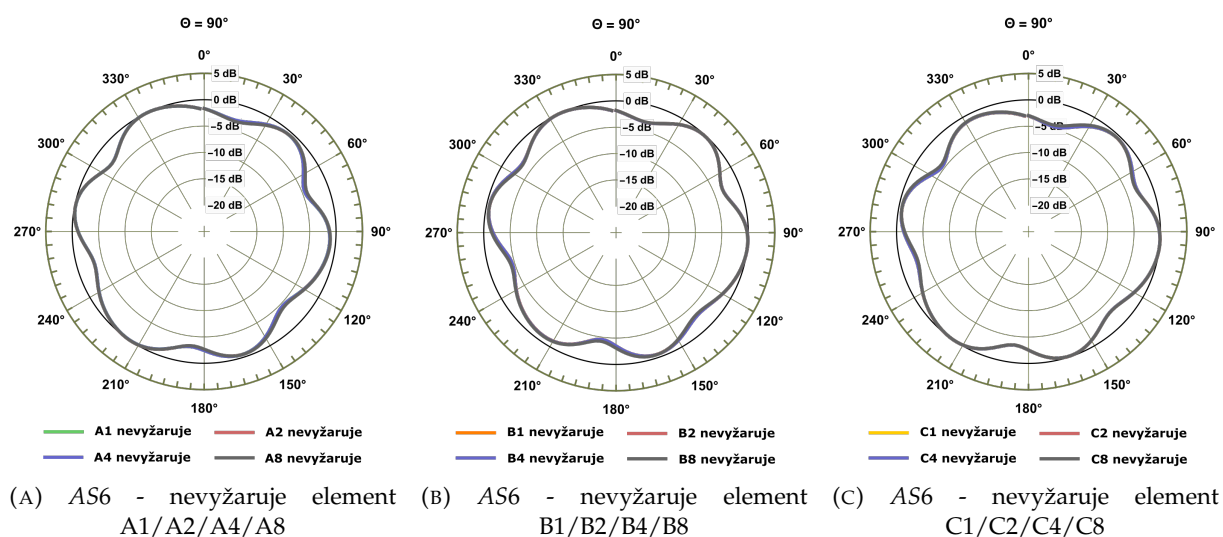
OBR. 1.5: Porovnanie horizontálnych vyžarovacích charakteristík anténnych systémov pri nevyžarujúcich elementoch v rôznych poschodiach v jednom azimute pre AS2

Následne je potrebné zistiť, či je pomocou horizontálnej charakteristiky vo vzdialenom poli možné okrem smeru, v ktorom sa nachádza poškodená anténa, tiež identifikovať aj poschodie a tým určiť konkrétnu anténu. Na Obr. 1.5 sú zobrazené horizontálne smerové charakteristiky toho istého AS, ako na Obr. 1.4. V tomto prípade sú zobrazené len prípady, kedy boli postupne

(po jednej) vyrad'ované antény v jednom azimute, ale v rôznych poschodiach. Je možné vidieť, že vyradenie antény v prvom a druhom poschodí je možné odlíšiť nakoľko sa vzniknuté smerové charakteristiky vo vzdialenom poli navzájom líšia.

### 1.1.3 Identifikácia poškodenej antény pre stredne veľké a veľké anténne systémy

Pre väčšie anténne systémy (4 a viac poschodí) sa síce zmenia smerové charakteristiky na základe toho, v ktorom smere anténa nevyžaruje, ale pri postupnom vyrad'ovaní jednotlivých antén v rôznych poschodiach, zostávajú smerové charakteristiky takmer identické a nie je možné určiť, v ktorom poschodí sa nachádza poškodená anténa. Táto vlastnosť je demonštrovaná pre veľký AS pozostávajúci z 8 poschodí (AS6) na Obr. 1.6.



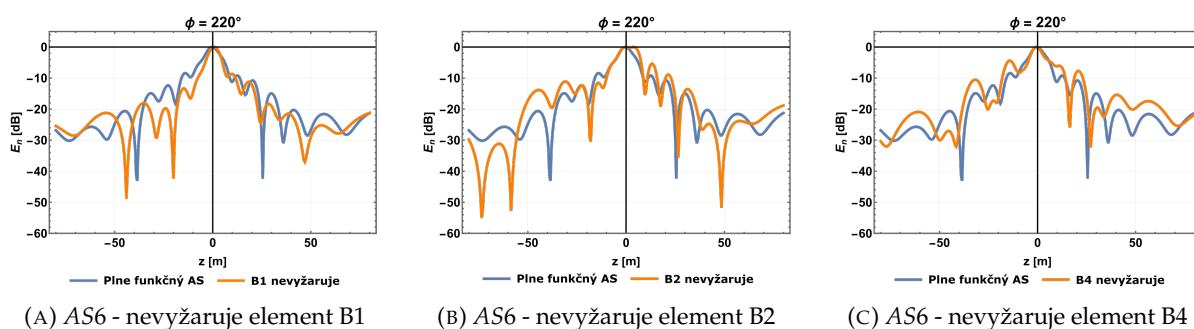
OBR. 1.6: Porovnanie horizontálnych vyžarovacích charakteristík anténnych systémov pri nevyžarujúcich elementoch v rôznych poschodiach v jednom azimute pre AS6

Je preto zjavné, že pre identifikáciu poškodenej antény v stredne veľkých (4 - 5 poschodí) a veľkých anténnych systémoch (6 a viac poschodí) bude potrebné využiť alternatívnu metódu k metóde identifikácie pomocou horizontálnej smerovej charakteristiky vo vzdialenom poli. Túto alternatívu môže predstavovať snímanie intenzity EM poľa vo *Fresnelovej zóne*. Princíp snímania vo *Fresnelovej zóne* spočíva v meraní amplitúdy a prípadne aj fázy intenzity EM poľa v sieti bodov rozložených po povrchu pomyselných rovinných plochy (Kartézská súradnicová sústava), valca (cylindrická súradnicová sústava), alebo gule (sférická súradnicová sústava). V našom prípade sa javí výhodné aplikovať metódu merania vo *Fresnelovej zóne*, najvýhodnejšie v cylindrických súradniciach, kde polohovanie sondy EM poľa môže zabezpečovať napríklad UAV. Tým pádom opäť potrebujeme z *MoM* simulácii získať numerické výpočty, tento krát však pre definovanú konečnú vzdialenosť, ktoré môžu byť neskôr použité ako referencia pre porovnanie s meraniami. V tomto prípade sa ale bude jednať o vyžarovacie charakteristiky vo vertikálnej rovine, v cylindrických súradniciach, nakoľko takým spôsobom môže UAV (napr. kvadroptéra) realizovať vertikálne lety, pričom môžeme taktiež predpokladať, že čím



menšia bude horizontálna vzdialenosť od AS, tak tým výraznejší bude vplyv nevyžarujúcej antény na výslednú vertikálnu vyžarovaciu charakteristiku.

Na Obr. 1.7 sú zobrazené vertikálne vyžarovacie charakteristiky AS6 (ktorý reprezentuje veľký AS) v cylindrických súradniciach, kde modrá krivka predstavuje plne funkčný AS a oranžová krivka predstavuje AS s jednou vyradenou anténou. Antény sú vyradované v azimute „B“, čo predstavuje azimutálny uhol  $\phi = 220^\circ$ . Na x-ovej osi je zobrazená poloha bodu pozorovania v rámci vertikálnej osi  $z$ , a bod nula predstavuje geometrický stred AS. Výpočty sú realizované pre vzdialenosť  $r = 50$  m od AS, čo predstavuje bezpečnú vzdialenosť pre meranie vertikálnej charakteristiky pri plnom vysielanom výkone. V tomto prípade je možné vidieť unikátnu zmenu vertikálnej vyžarovacej charakteristiky vždy keď je vyradená iná anténa. Pre vzdialenosť 50 m je možné vidieť, že vyradenie jednej antény ovplyvní nie len postranné laloky, ale aj tvar hlavného laloka, ktorý v tejto vzdialenosti ešte nie je dobre sformovaný. Okrem toho sa polohy bočných lalokov a miním, ktoré ich rozdeľujú posunú, kompletne zaniknú, alebo vzniknú nové a tiež úrovne jednotlivých postranných lalokov sa zmenia, čo je možné detegovať pomocou meraní kvadrokoptérou.



OBR. 1.7: Porovnanie vertikálnych vyžarovacích charakteristík pre AS6 pri nevyžarujúcich elementoch v rôznych poschodiach v jednom azimute vo vzdialenosti 50 m

Navrhovaná metóda merania za účelom diagnostiky pre stredne veľký AS preto môže pozostávať z dvoch typov meraní a to meranie aj horizontálnej aj vertikálnej vyžarovacej charakteristiky, kedy meraním horizontálnej vyžarovacej charakteristiky sa určí smer, v ktorom sa nachádza nevyžarujúca anténa a následným meraním vertikálnej vyžarovacej charakteristiky sa určí aj konkrétne poschodie.

Nakoľko pri veľkom AS je zmena tvaru horizontálnej charakteristiky vplyvom poškodenej antény veľmi malá, pre takýto systém by metóda merania za účelom diagnostiky mohla pozostávať iba z merania vertikálnej vyžarovacej charakteristiky pre všetky smery umiestnenia antén a na základe porovnania so simuláciami a vertikálnou charakteristikou plne funkčného reálneho AS by sa určil aj smer aj poschodie, kde sa nachádza poškodená anténa.

## 2 Meranie vyžarovacej charakteristiky anténneho systému pomocou UAV (kvadrokoptéry)

V dizertačnej práci sú priblížené metódy pre meranie vyžarovacích charakteristík a na základe analýzy ich výhod a nevýhod pre problematiku diagnostiky AS sme zhodnotili, že najvhodnejšia sa javí metóda merania vo voľnom priestore pomocou kvadrokoptéry. Výhodou kvadrokoptéry oproti helikoptére je jej možnosť vzletu z akékoľvek voľnej plochy v blízkosti AS, možnosť letieť v takej blízkosti k anténemu stožiaru, že problémom sa stáva vysoká intenzita EM poľa, ktorá môže zarušiť elektroniku a riadenie kvadrokoptéry, skôr než riziko kolízie. Ďalšími výhodami sú vysoká presnosť určenia jej aktuálnej polohy pomocou PPK (*Post-Processed Kinematic Positioning*) a RTK (*Real-Time Kinematic Positioning*) technológie a taktiež oveľa nižšie nároky a náklady na prevádzku.

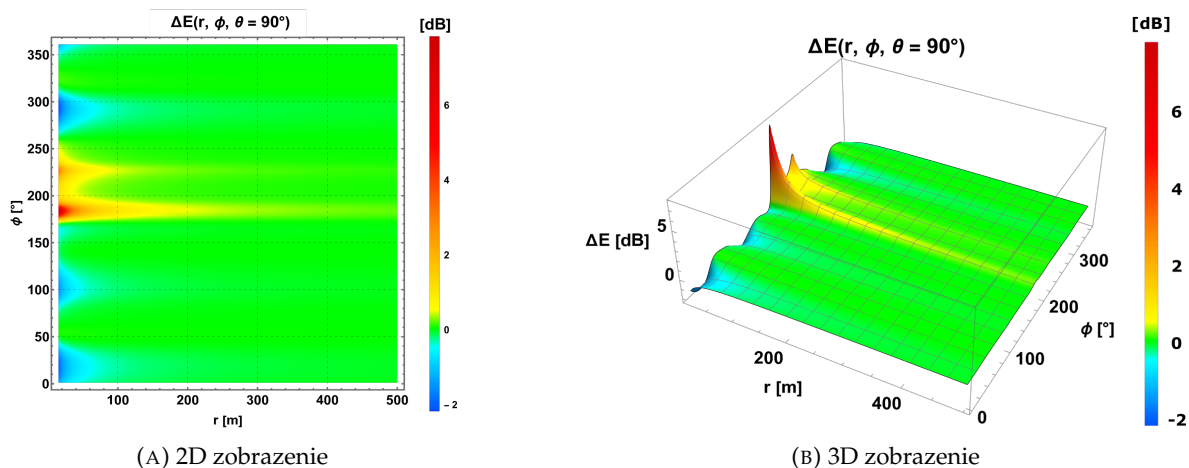
Keďže sme povedali, že funkčnosť AUT (v našom prípade AS) je možné overiť pomocou meraní prierezov smerovej charakteristiky v principiálnych rovinách, tak sa môžu vykonávať dva základné typy letových trajektórií kvadrokoptéry, kde jedným z nich je horizontálny let, kedy kvadrokoptéra vykoná oblet v celom rozsahu  $\phi$  v konštantnej vzdialenosti  $r$  a konštantnej výške  $h$ , pričom meracia anténa musí byť po celý čas namierená na AS a tak, aby snímala tangenciálnu zložku intenzity EM poľa. Vhodná vzdialenosť pre meranie horizontálneho letu podlieha viacerým kritériám definovaným v technickom predpise pre meranie veľkých anténnych systémov v pásmach VKV a UKV [8]. Existujú tri podmienky pre minimálnu vzdialenosť pre meranie, pričom dve ( $r_2, r_3$ ) sú dané technickými možnosťami kvadrokoptéry udržať konštantnú vzdialenosť/výšku a tretia z podmienok ( $r_1$ ) vyplýva z teórie EM poľa v okolí antény je ňou rovnica ( $r_1 \geq 2D^2/\lambda$ ), kde  $D$  predstavuje maximálny rozmer AS (v m) a  $\lambda$  je vlnová dĺžka (v m), pričom musí platiť:

$$(r \geq r_1) \wedge (r \geq r_2) \wedge (r \geq r_3) \quad (2.1)$$

Technický predpis [8] tvrdí, že tento vzťah platí iba v prípade, ak  $D > 10\lambda$ , bohužiaľ ale neposkytuje žiadnu alternatívu ak táto podmienka neplatí a nakoľko pri frekvencií 100 MHz, čo je približne stred frekvenčného pásma pre FM vysielanie, je rozmer  $10\lambda \doteq 30$  m, tak na Slovensku sa nenachádza taký veľký AS pre FM vysielanie, ktorý by takúto podmienku spĺňal [9]. Je preto potrebné zistiť ako sa smerová charakteristika správa aj pri takýchto anténnych systémoch.

## 2.1 Analýza amplitúdových chýb vyžarovacích charakteristík spôsobených meraním v konečnej vzdialenosti vo FEKO

Jednou z možností vyhodnotenia rozdielov vyžarovacích charakteristík v konečnej vzdialenosti sa naskytá pozorovanie úrovne maxim hlavných lalokov, nakoľko z pohľadu merania a vyhodnotenia funkčnosti AS, je dôležité mať relevantnú a presnú informáciu práve o tomto parametri a to platí najmä pre vyžarovacie charakteristiky v horizontálnej rovine. Nakoľko však horizontálne smerové charakteristiky pre rozsiahle anténne systémy sú takmer všesmerové a s malým potlačením minim oddelujúcich jednotlivé laloky, to môže spôsobiť, že aj malé zmeny v týchto oblastiach budú deformovať výsledný tvar horizontálnej charakteristiky a sledovanie iba úrovni lokálnych maxim môže viesť k zavádzajúcim výsledkom. Preto je potrebné vykresliť celú horizontálnu charakteristiku, ako funkciu vzdialenosti, identifikovať oblasti najväčších zmien a na základe toho zvoliť konkrétne body záujmu, ktoré sa môžu podrobnejšie vykresliť.

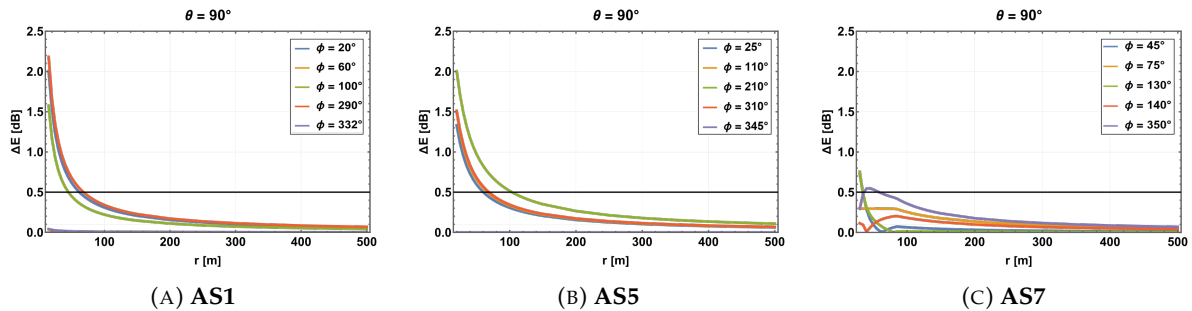


OBR. 2.1: Vyobrazenie rozdielov horizontálnej charakteristiky v konečnej a nekonečnej vzdialenosti ako funkcie vzdialenosti a uhla pre AS1

Na Obr. 2.1 sú zobrazené vzájomné rozdiely horizontálnych charakteristík AS1 v konečných vzdialenostiach 15 m - 500 m a horizontálnej charakteristiky pre nekonečnú vzdialenosť. Pre názornosť sú tieto závislosti vykreslené aj v 3D grafoch na Obr. 2.1b. Na Obr. 2.1a, viditeľné zmeny nastávajú v azimutoch  $\sim 20^\circ$ ,  $\sim 100^\circ$ ,  $\sim 290^\circ$ , čo predstavuje dva hlavné laloky a jednu oblasť medzi ďalšími dvomi lalokmi, ktorá v ideálnej horizontálnej charakteristike predstavuje lokálne minimum. Najväčšie odchýlky je však možné pozorovať v azimutoch  $\sim 185^\circ$ ,  $\sim 230^\circ$ , ktoré sa nachádzajú v oblasti väčšieho potlačenia, kde v azimute  $\sim 185^\circ$  sa nachádza globálne minimum, ktoré pri konečnej vzdialenosti dosahuje väčších útlmov ako v prípade nekonečnej vzdialenosti. Takéto správanie sa smerovej charakteristiky v konečných vzdialenostiach je aj popísané aj vo vedeckej literatúre [10], [11], kedy čím sú hlbšie minimá, tým sú náchylnejšie na vplyv fázovej chyby a ustália sa až v oveľa väčšej vzdialenosti.

Na základe vyobrazení na Obr. 2.1 a z dôvodu, že okrem úrovne vyžarovania je dôležitá aj definícia jednotlivých lalokov smerovej charakteristiky v hlavnom smere vyžarovania (ich

ohraničenosť lokálnymi minimami), je určených 5 bodov záujmu, ktoré si môžeme vykresliť aj detailnejšie a tak vyhodnotiť vhodnú vzdialenosť pre meranie. Aby bolo možné toto urobiť, je potrebné si určiť maximálnu úroveň akceptovateľnej amplitúdovej chyby od ideálnej smerovej charakteristiky. Túto úroveň si zvolíme na základe technického predpisu pre meranie pomocou helikoptéry a je to  $\pm 0,5$  dB.



OBR. 2.2: Závislosť absolútnej amplitúdovej chyby úrovni horizontálnej charakteristiky v konečnej a nekonečnej vzdialenosti vo vybraných bodoch záujmu

Na Obr. 2.2 sú zobrazené závislosti amplitúdových chýb od vzdialenosti v piatich bodoch záujmu na horizontálnych charakteristikách viacerých AS, pričom hodnoty odchýlok sú v absolútnych hodnotách. V grafoch je tiež vyznačená maximálna dovolená úroveň absolútnej chyby 0,5 dB. Vzdialenosť, kedy krivky pretnú túto hodnotu, je možné považovať za vhodnú pre meranie vyžarovacej charakteristiky v horizontálnej rovine.

Na Obr. 2.2a, ktorý vyjadruje úrovne amplitúdových chýb pre AS1, všetky skúmané chyby nadobudnú absolútnu hodnotu rovnú, alebo menšiu ako 0,5 dB približne pri horizontálnej vzdialenosti 75 m, čo predstavuje fázovú chybu spôsobenú zakrivením čela guľoplochy  $\sim 6,2^\circ$ . Pripomeňme si, že pôvodná navrhovaná vzdialenosť pre meranie na základe *Reyleigho* vzťahu, taktiež využívaná v technickom predpise, bola 20,7 m. To znamená, že na základe výpočtu vo FEKO sa táto vzdialenosť viac ako stonásobila. Ak by sme mali maximálnu úroveň chyby ešte viac sprísniť, aby bola v súlade s vedeckou literatúrou, ktorá hovorila o chybe 0,2 dB, tak by sa meracia vzdialenosť posunula až na  $\sim 200$  m.

Podrobná analýza minimálnej vzdialenosti pre meranie aj pre iné anténne systémy je dôkladne popísaná v dizertačnej práci.

Pre vertikálne charakteristiky bude najskôr postup podobný ako v prípade horizontálnych charakteristík, kedy bude vykreslený celý rozsah odchýlok v rámci uhla  $\theta$ , ako závislosť od vzdialenosti. Následne sú na základe toho definované body záujmu, ktoré budú bližšie preskúmané.

TABUĽKA 2.1: Minimálne vzdialenosti pre meranie smerových charakteristík jednotlivých anténnych systémov

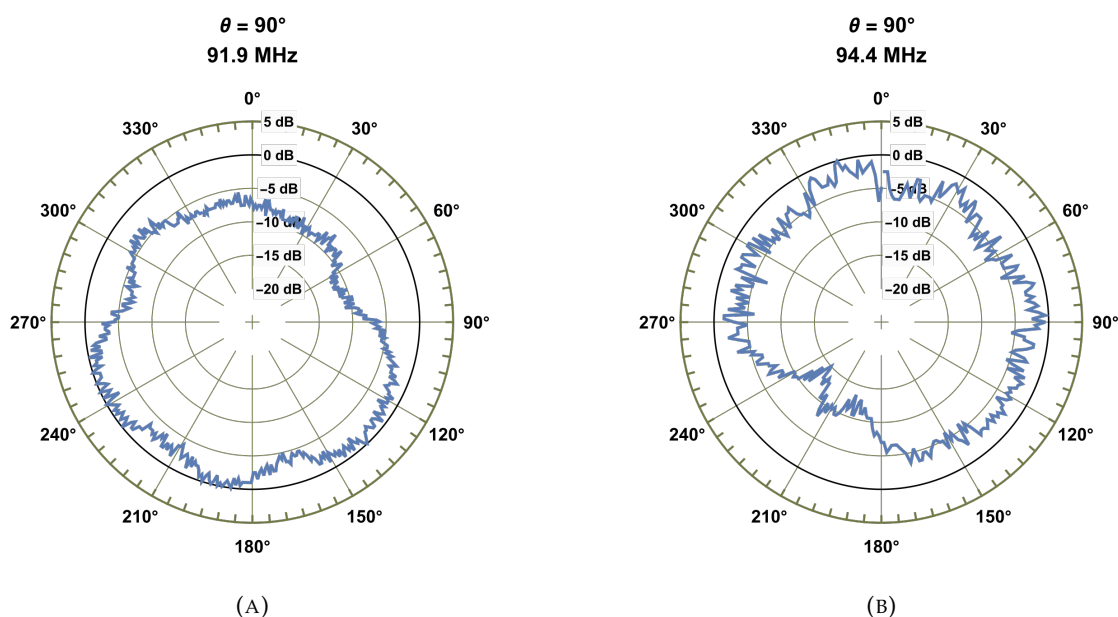
AS#	$r_{1h}$ [m]	$r_{1v}$ [m]	$r_2$ [m]
AS1	75	180	5,28
AS2	58	75	5,31
AS3	75	83	11,45
AS4	95	107	11,45
AS5	105	55	11,45
AS6	55	1 420	22,9
AS7	85	1 750	20,45
AS8	6	292	19,08

V Tab. 2.1 sú zosumarizované všetky podmienky pre minimálnu vzdialenosť, s tým, že  $r_3 = 18,18$  m, platí pre všetky anténne systémy, nakoľko táto podmienka je daná čisto schopnosťami kvadrokopty.  $r_2$  je daná klopením hlavného laloka a taktiež veľkosťou uhla, ktorý zvierajú body na hlavnom laloku, ktoré sú oproti maximu potlačené o 0,5 dB. Je vidieť, že takmer vo všetkých prípadoch je táto vzdialenosť menšia, ako výpočtom daná vzdialenosť  $r_{1h}$ , alebo  $r_{1v}$  až na AS8, kedy  $r_2 > r_{1h}$ . Ako najbližšia možná meracia vzdialenosť by mala byť braná tá najväčšia z uvedených. Taktiež je dobrou praxou merať horizontálne a vertikálne vyžarovacie charakteristiky v tej istej vzdialenosti od AS, aby boli zachované čo najrovnakejšie podmienky, ale nemusí to byť pravidlo.

## 2.2 Merania vyžarovacích charakteristík pomocou kvadrokopty DJI Matrice 300 a meracieho zariadenia Pixla 1

Keď už sme si priblížili proces zvolenia vhodnej vzdialenosti pre meranie smerovej charakteristiky AS vo vzdialenom poli, môžeme uviesť realizované merania pomocou kvadrokopty a špecializovaného meracieho zariadenia, analyzovať vykreslené, namerané údaje a zhodnotiť ich použiteľnosť za účelom diagnostiky, prípadne aplikovať metódy spracovania, ktoré prispievajú k zefektívneniu metódy diagnostiky. Realizované sú predovšetkým tri, už skôr spomínané typy letov a to *Propagačný let*, *Vertikálny let* a *Okružný let*. V ideálnom prípade sa ako prvý realizuje propagačný let, ktorým je možné vyhodnotiť vzdialenosti kedy sa prajavuje interferencia priamej a odrazenej vlny od zemského povrchu a na základe toho definovať, ktorým vzdialenostiam je potrebné sa vyhnúť. Tento let je realizovaný tak, že operátor kvadrokopty, ktorý je na zemi a priamo ovláda kvadrokopteru, zaujme s kvadrokopterou polohu vo výške geometrického stredu AS vo veľkej vzdialenosti a následne vykoná priblíženie až do najmenšej bezpečnej vzdialenosti. Alternatívne je možné vytvoriť misiu s niekoľkými bodmi, ktorými bude kvadrokopterá prelietať a v tom prípade je schopná tento let vykonať autonómne,

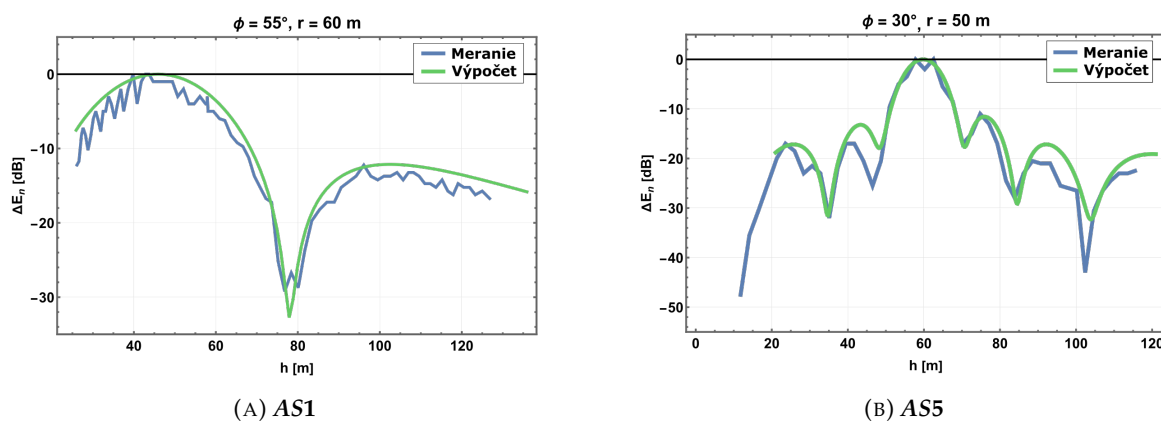
bez zásahu operátora. Avšak aj počas takejto misie musí byť operátor v priamom spojení s kvadrokoptérou, ak sa spojenie preruší, kvadrokoptéra sa po nejakej chvíli sama vráti na bot vzletu/pristátia. Počas celej doby letu si kvadrokoptéra kontruje polohu a údaje o aktuálnej polohe (súradnice), výšku, náklon v troch osiach a aktuálny čas zapisuje do letového záznamu. Počas tohoto letu je dôležité, aby kvadrokoptéra dodržala konštantnú výšku počas celej doby trvania letu. Po skončení propagačného letu môže nasledovať vertikálny, alebo okružný let. Okružný let je realizovaný tak, že operátor kvadrokoptéry, nahrá pomocou ovládacieho zariadenia do riadiacej jednotky kvadrokoptéry misiu, ktorá obsahuje dopredu definovanú skupinu bodov, ktoré sa nazývajú „waypointy“ a cez tieto body potom autonómne prelieta kvadrokoptéra, pričom meracia anténa musí byť vždy natočená na stred AS. Pri tomto lete musí kvadrokoptéra udržiavať konštantnú výšku a taktiež vzdialenosť od AS. Akékoľvek odchýlky od letovej dráhy sa môžu prejaviť ďalším rozptylom nameraných údajov. Kvadrokoptéra je však schopná si sama korigovať odchýlky spôsobené napríklad poryvom vetra. Okružné lety môžu byť taktiež realizované vo viacerých vzdialenostiach, pričom všetky musia spĺňať podmienku minimálnej vzdialenosti a taktiež vo viacerých výškach, či už v cylindrických, alebo sférických súradniciach.



OBR. 2.3: Horizontálne charakteristiky namerané pomocou okružného letu pre: AS2 (A), AS5 (B)

Na Obr. 2.3 sú zobrazené normované smerové charakteristiky anténnych systémov v horizontálnej rovine, namerané pomocou kvadrokoptéry a špecializovaného meracieho zariadenia. Všetky anténne systémy sú merané na niekoľkých frekvenciách, ktorými vyžarujú. Meracie zariadenie *Pixla 1* je schopné snímania na viacerých frekvenciách zároveň, čím sú zabezpečené rovnaké podmienky merania. Nameraná horizontálna charakteristika na frekvencii 91,9 MHz pre AS2 je zobrazená na Obr. 2.3a, pričom meracia vzdialenosť pre konkrétnu zobrazenú charakteristiku bola 75 m. Meranie bolo neskôr realizované aj vo vzdialenosti 150 m od AS, čím

sa ukázalo, že horizontálna charakteristika si zachováva tvar, a tým sa potvrdzuje, že meranie prebehlo vo vzdialenom poli. Zostáva vertikálny let, ktorý je realizovaný tak, že kvadrokoptéra zaujme polohu buď vysoko nad stredom AS, alebo hlboko pod ním, v preddefinovanej horizontálnej vzdialenosti od stredu AS a vo zvolenom azimute (zväčša v smere maximálneho vyžarovania). Prípadne ak má smerová charakteristika viac hlavných lalokov, tak sa môže vertikálny let realizovať vo viacerých azimutoch. Následne kvadrokoptéra vykoná klesanie, alebo stúpanie podľa toho, kde sa nachádza počiatočný bod, pričom musí dodržiavať konštantú horizontálnu vzdialenosť od stredu AS. Vertikálny let môže byť realizovaný aj vo viacerých vzdialenostiach, treba však dbať na to, že sa smerová charakteristika rozpína do priestoru a tým pádom vo väčšej vzdialenosti musí kvadrokoptéra taktiež preletieť väčšiu vertikálnu vzdialenosť pri meraní v cylindrických súradniciach. Je možné realizovať meranie smerovej charakteristiky vo vertikálnej rovine aj vo sférických súradniciach, v tomto prípade však musí kvadrokoptéra taktiež dodržiavať konštantnú vzdialenosť od stredu AS.



OBR. 2.4: Porovnanie vypočítaných a nameraných vertikálnych vyžarovacích charakteristík

Na Obr. 2.4 sú zobrazené vertikálne charakteristiky odmerané pomocou kvadrokoptéry a špecializovaného meracieho zariadenia *Pixla 1*. Obr. 2.4a zobrazuje nameranú vertikálnu vyžarovaciu charakteristiku AS1 vo vzdialenosti 60 m a azimutálnom uhle  $55^\circ$ . Nameraná charakteristika je porovnaná s vypočítanou vertikálnou vyžarovacou charakteristikou pomocou FEKO, pričom je zreteľná veľmi dobrá zhoda medzi meraním a výpočtom. Nameraná vertikálna vyžarovacia charakteristika AS5 je zobrazená na Obr. 2.4b, ktorá je taktiež porovnaná s výpočtom pomocou FEKO. V tomto prípade je vidieť väčšie rozdiely, avšak pozície lalokov a minim a celkový tvar sa zhodujú. Treba podotknúť, že v tomto prípade sa jednalo o experimentálne meranie a to mohlo spôsobiť väčšie odchýlky. Môžeme si všimnúť, že všetky namerané charakteristiky sú ovplyvnené rozptylom údajov, ktorý môže spôsobiť, že niektoré ich vlastnosti môžu byť ťažko detegovateľné, prípadne sa úplne stratia. To platí tiež pre zmeny spôsobené výpadkom niektorej z antén, čo by malo za následok zníženie efektivity akejkoľvek diagnostической metódy. Javí sa preto potrebné nájsť takú metódu spracovania dát, ktorá efektívne minimalizuje ich rozptyl, pričom zachová charakteristické tvarové prvky smerovej charakteristiky.

## 3 Minimalizácia rozptylu údajov použitím vhodných metód spracovania

Ako prvá a najjednoduchšia možnosť sa naskytá použitie kľzavého priemeru (*Simple Mean Average* - SMA). Jeho veľkou výhodou je jednoduchosť a nenáročnosť z pohľadu využitia a to aj priamo na mikroprocesoroch. Najlepší odhad strednej hodnoty pomocou SMA bude vtedy ak meraná charakteristika neobsahuje tvarové prvky ako ostré minimá, alebo ostré maximá a ak je rozptyl vzoriek relatívne malý. Taktiež má na efektívnosť spracovania pomocou kľzavého priemeru vplyv aj celkový počet vzoriek. Kľzavý priemer môže byť vypočítaný podľa [12]:

$$SMA = \frac{1}{m} \sum_{i=N-m+1}^n p_i. \quad (3.1)$$

Nevýhodami kľzavého priemeru sú, že pri nízkom počte údajov, aj priemerovanie cez malý interval vzoriek môže viesť k deformácii charakteristického tvaru smerovej charakteristiky tým, že vyhladzuje lokálne extrémny. Rovnako to platí aj pri veľkej amplitúde rozptylu údajov, kedy je potrebné priemerovať cez veľký interval vzoriek, aby bolo možné dosiahnuť dostatočnej hladkosti krivky - opäť dôjde k vyhladzovaniu lokálnych extrémov. Kľzavý priemer taktiež skracať súbor údajov a túto jeho vlastnosť je potrebné v rámci spracovania kompenzovať. Je preto potrebné otestovať aj iné formy odstránenia šumu pri zachovaní charakteristického tvaru smerovej charakteristiky. Schopnosť eliminácie šumu pri čo najlepšom zachovaní tvarových prvkov charakteristiky je z pohľadu smerovania dizertačnej práce veľmi dôležité, nakoľko deformácia smerovej charakteristiky nevhodným jej nevhodným spracovaním môže viesť k chybnéj identifikácii poškodenej antény.

### 3.1 Minimalizácia rozptylu údajov pomocou Rýchlej Fourierovej Transformácie (FFT)

Vlastnosti komplikovanej funkcie, alebo signálu popísaného súborom diskretných bodov so vzájomným posunom, definovaným vzorkovacou frekvenciou A/D prevodníka je možné určiť pomocou dekompozície na Fourierové koeficienty *Diskretnou Fourierovou Transformáciou* (DFT). Spätná syntéza pôvodnej funkcie/signálu je realizovaná pomocou *Inverznej Diskretnéj Fourierovej Transformácie* (IDFT). DFT a IDFT je možné zapísať v analytickom tvare nasledovne



[13]:

$$X[k_F] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk_F}; \quad k_F = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.2)$$

A pre IDFT:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k_F] e^{j\frac{2\pi}{N}nk_F}; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (3.3)$$

Pri klasickej DFT a IDFT je počet vzoriek definovaný celkovým trvaním signálu a vzorkovacou frekvenciou  $\Rightarrow N = T/T_0$ , kde  $T$  je perióda signálu a  $T_0$  je perióda vzorkovania. V našom prípade však nemáme signál definovaný v čase, ale priestorový útvar a z toho vyplýva, že  $N = \phi_{MAX}/\phi_0$ , kde  $\phi_{MAX} = 2\pi$  a  $\phi_0$  je priestorový/uhlový posun jednotlivých vzoriek. Z pohľadu výpočtu to nepredstavuje žiadnu zmenu, jedná sa skôr o korektné prispôbenie výrazov k riešenej problematike. Na základe toho je možné zostaviť maticu koeficientov známu ako *Diskrétna Fourierová Matica* [14]. FT bola riešená vo výpočtovom softvéri *Wolfram Mathematica*, ktorý implementuje efektívnejší algoritmus výpočtu DFT známy ako *Rýchla Fourierova Transformácia* (FFT) [15]. Pomocou FFT si môžeme vytvoriť spektrum Fourierových koeficientov, ktoré spoločne tvoria skúmanú krivku - smerovú charakteristiku. Pre lepšie zvýraznenie jednotlivých koeficientov budeme v spektre zobrazovať ich spektrálnu výkonovú hustotu (*Power Spectral Density* - PSD), ktorú dostaneme prenasobením Fourierovho koeficienta (ktorý je komplexný) s jeho konjugovanou hodnotou. Následne môžeme v spektre odfiltrovať Fourierové koeficienty, ktoré tvoria šum (rozptyl vzoriek), pričom zachováme koeficienty prispievajúce ku charakteristickému tvaru smerovej charakteristiky. Odfiltrovanie môžeme docieľiť pomocou metódy známej ako „*Hard Thresholding*“ [16], alebo zadefinovaním digitálneho pásmovo zádržového (PZ) filtra.

Podobne ako aj pri SMA, je aj efektívnosť minimalizácie rozptylu vzoriek pomocou FFT závislá od počtu vzoriek, kde pri počte vzoriek  $N = 3601$  je možné dosiahnuť rekonštrukciu vyhladenej krivky, ktorej rozdiely od skutočnej strednej hodnoty zašumenej krivky sú na úrovni stotín decibelov. Aj keď je vplyv počtu vzoriek na rekonštrukciu nezašumenej krivky stále prítomný, jeho závažnosť v porovnaní s kľavým priemerom nie je tak výrazná. Nedostatky spracovania smerovej charakteristiky pomocou FFT však plynú z princípu neurčitosti. Pomocou zobrazenia charakteristiky ako priestorového útvaru vieme presne lokalizovať kde sa nachádzajú jej laloky a lokálne extrémny, avšak nevieme na prvý pohľad skonštatovať aké matematické komponenty prispievajú k formácii takého útvaru. Po aplikovaní FFT vieme zase presné spektrum a poznáme všetky koeficienty, ktoré prispievajú k formácii celej charakteristiky, avšak nevieme povedať kde sa prejaví. Inými slovami vieme, že nachádzajú v celom rozsahu priestoru opísaného skúmanou charakteristikou, ale nevieme, ku ktorému z lokálnych extrémov prispievajú. Toto môže byť v niektorých prípadoch kameňom úrazu rekonštrukcie pomocou FFT. Každý útvar na charakteristike musí byť popísaný jedným, alebo viacerými koeficientami, ktoré zároveň ovplyvňujú aj zvyšok priestorovej charakteriky. To môže spôsobiť, že pri vyradovaní niektorých koeficientov za účelom minimalizácie rozptylu vzoriek eliminujeme aj koeficienty, ktoré sa navzájom kompenzujú v ostatných oblastiach krivky a vytvoríme si tým zvlhnenie, alebo dokonca lokálny extrém tam, kde by byť nemal. Tento jav môže mať opäť

nepriaznivý vplyv na metódy identifikácie poškodenej antény pomocou analýzy tvaru vyžarovacej charakteristiky. Javí sa preto potrebné analyzovať aj alternatívnu metódu minimalizácie rozptylu vzoriek k *FFT*.

### 3.2 Minimalizácia rozptylu údajov pomocou Rýchlej Vlnkovej Transformácie (FWT)

Nakoľko *FFT* naráža na nedostatky spôsobené teóriou princípu neurčitosti a keďže je schopná presne určiť frekvencie komponentov (Fourierové koeficienty), ktoré prispievajú k výslednému tvaru krivky, tak tým stráca informáciu o ich pozícii v čase/priestore. Jednou možnosťou, ktorá je bežne aplikovaná v praxi pri spacovaní signálov je metóda viacúrovňového rozlíšenia, ktorá využíva Vlnkovú Transformáciu (*Wavelet Transform* - *WT*). Táto metóda je založená na základe vlastnosti, že komponenty s nízkou frekvenciou majú dlhú periódu a tým pádom nie je potrebné poznať ich presnú polohu v čase a naopak *VF* signály, alebo prekmity trvajú len krátky okamih, takže je potrebné vedieť ich presnú polohu v čase. *WT* je v princípe konvolúcia skúmanej krivky s presne definovanou funkciou, ktorá prenáša nulovú energiu a existuje na konečnom intervale - vlnkou. Škálovanie (zúženie/rozšírenie) vlnky sa mení pri každom prejdení celého rozsahu intervalu, na ktorom sa nachádza skúmaná krivka, čím sa dosiahne zachytenie zákmitov na rôznych frekvenciách. Pre diskrétny signály existuje Diskrétna Vlnková Transformácia (*DWT*), ktorá rozloží pôvodnú krivku v rámci kaskádneho algoritmu. Niekedy sa tejto transformácií hovorí aj Rýchla Vlnková Transformácia (*FWT*). Štruktúra tohto algoritmu pripomína strom zložený z dolno priepustných a hornu priepustných filtrov, ktoré sú definované na základe šírky vlnky, teda hodnoty dilatačného parametra  $s$  - čím vyšší je  $s$ , tým užšia je vlnka, tým vyššia je zlomová frekvencia filtra. Tieto filtre rozdelia pôvodnú funkciu na detailné (*VF*) a aproximačné koeficienty (*NF*), pričom každá ďalšia úroveň pracuje s aproximačným koeficientom z predchádzajúcej úrovne. Tým pádom vieme pomocou týchto koeficientov definovať pôvodnú funkciu ako kombináciu aproximačného a detailných koeficientov. Pre aproximačný koeficient platí [17]:

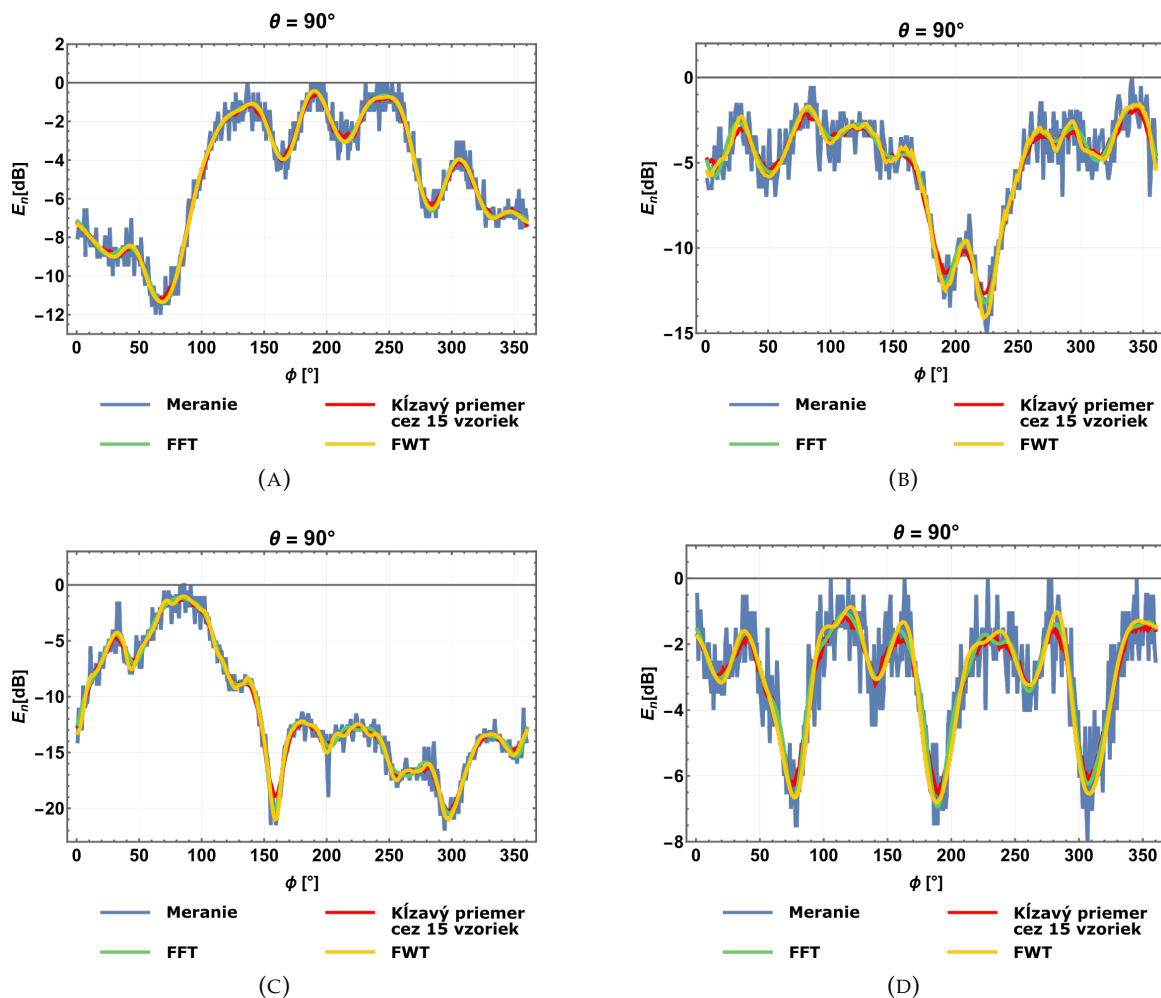
$$W_{\chi} [s_0, \tau] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} f[i] \chi_{s_0, \tau}[i]. \quad (3.4)$$

A pre detailný koeficient:

$$W_{\xi} [s, \tau] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} f[i] \xi_{s, \tau}[i]. \quad (3.5)$$

Takýmto spôsobom *FWT* rozloží signál (funkciu) na súbor detailných a aproximačných koeficientov, pričom výstup je závislý na počte kaskádnych úrovní. Následne je možné aplikovať hraničnú úroveň (threshold), ktorá eliminuje všetky detailné koeficienty, ktoré sa nachádzajú pod touto úrovňou a inverzným kaskádnym algoritmom (*IFWT*) je následne možné spätne syntetizovať pôvodný signál, tento krát však bez odfiltrovaných koeficientov. Tento princíp je veľmi podobný eliminácii koeficientov pomocou *FFT*, avšak samotný proces dekompozície

signálu je rozdielny.



OBR. 3.1: Porovnanie efektivity minimalizácie rozptylu údajov pomocou SMA, FFT a FWT pre horizontálne charakteristiky z merania: AS1 (A), AS5 (B), AS9 (C), AS6 (D)

Na Obr. 3.1a a Obr. 3.1c sú namerané vyžarovacie charakteristiky spracované pomocou FWT a porovnanie s FFT a SMA. Všetky spracované krivky sú takmer identické a neprejavujú sa nijaké veľké rozdiely a to najmä medzi krivkou spracovanou pomocou FFT a FWT, zatiaľ čo krivka spracovaná pomocou SMA má nedostatky v lokálnych extrémoch charakteristiky. Na krivke spracovanej pomocou FWT je tiež možné si všimnúť ostrejších zmien v lokálnych extrémoch charakteristiky, čo je jej hlavná výhoda. Výraznejšie rozdiely sa začnú prejavovať na Obr. 3.1b a Obr. 3.1d, kde amplitúda odchýlok vzoriek od skutočnej strednej hodnoty je výraznejšia v porovnaní s charakteristickými tvarovými prvkami oboch kriviek. Výraznejšie sa tu prejaví schopnosť FWT adekvátne replikovať aj ostrejšie tvarové zmeny, čo opäť môžeme vidieť prevažne v maximách a minimách. Schopnosť niektorej z metód vhodne aproximovať

skutočnú strednú hodnotu nameranej smerovej charakteristiky môžeme kvantifikovať pomocou výpočtu nevychýlenej smerodajnej odchýlky [18]:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 - N x_{av}^2 \right). \quad (3.6)$$

Týmto spôsobom môžeme vypočítať smerodajnú odchýlku pre krivku pred spracovaním a aj po spracovaní a ich vzájomným odčítaním môžeme zistiť, pri ktorej metóde spracovania sa výsledná hodnota  $\Delta S$  blíži k 0 - najlepšie aproximuje skutočnú strednú hodnotu.

$$\Delta S = |S_N - S_{SMA/FFT/FWT}|. \quad (3.7)$$

Hodnoty veličiny  $\Delta S$  sú zobrazené v Tab. 3.1.

TABULKA 3.1: Porovnanie rozdielov smerodajných odchýlok pre vyžarovacie charakteristiky spracované pomocou SMA, FFT a FWT

AS#	$\Delta S_{SMA} [-]$	$\Delta S_{FFT} [-]$	$\Delta S_{FWT} [-]$
AS1 $r = 75$ [m] $f_m = 91,9$ [MHz]	0,08	0,05	0,04
AS5 $r = 50$ [m] $f_m = 94,4$ [MHz]	0,30	0,19	0,08
AS9 $r = 300$ [m] $f_m = 94,4$ [MHz]	0,16	0,08	0,04
AS6 $r = 250$ [m] $f_m = 96,6$ [MHz]	0,29	0,21	0,05

Podarilo sa nám teda ukázať možnosť využitia FWT pre minimalizáciu rozptylu vzoriek a zachovať charakteristický tvar spracovanej krivky. Taktiež sme túto metódu porovnali s už skôr analyzovanou metódou minimalizácie rozptylu pomocou FFT a SMA, pričom pomocou FWT sa podarilo vždy dosiahnuť najlepšiu aproximáciu strednej hodnoty spracovanej krivky. Javí sa teda veľmi výhodná pre spracovanie nameraných vyžarovacích charakteristík, ktoré budú následne porovnávané s výpočtom, za účelom identifikácie poškodenej antény. Pre ešte väčšiu efektivitu minimalizácie rozptylu vzoriek môže byť taktiež použitá kombinácia metód FFT a FWT, najmä ak je úroveň rozptylu vzoriek príliš veľká. Nevýhoda FWT spočíva predovšetkým v jej komplexnosti a potreby definície druhej funkcie (vlnky), čo môže byť problematické pri pokuse implementovať takúto metódu na mikroprocesor s obmedzenou pamäťou a ďalšími výrobnými obmedzeniami. Tým pádom môže byť táto metóda aplikovaná výhradne v spracovaní už ukončených meraní.

Podrobná analýza efektivity minimalizácie rozptylu údajov pomocou SMA, FFT a FWT, analýza ich vlastností, ich otestovanie pre riešenú problematiku a vzájomné porovnania sú uvedené v dizertačnej práci.

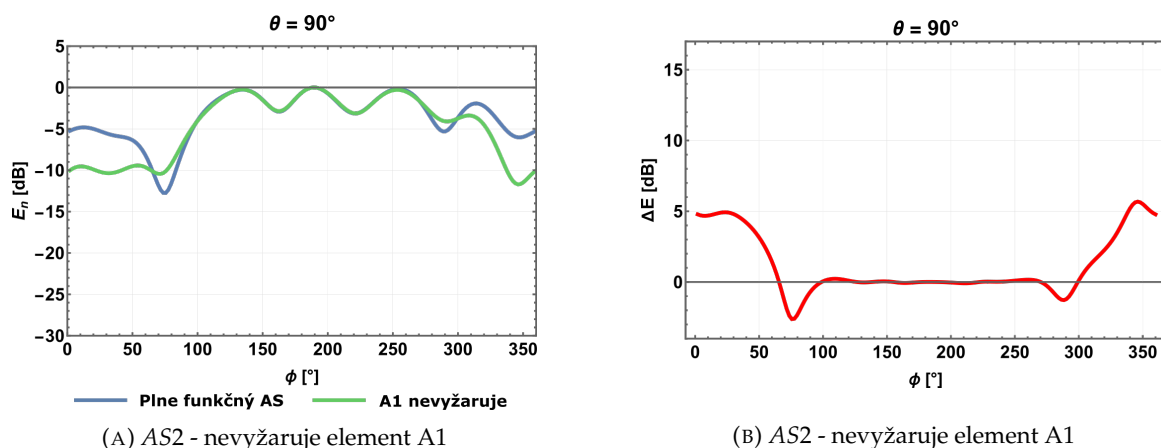
## 4 Vyhodnotenie zmeny smerovej charakteristiky spôsobenej poškodenou anténou

V rámci dizertačnej práce sme ukázali, že pomocou FEKO je možné simulovať výpadok vyžarovania na niektorej z antén a následne vypočítať smerovú charakteristiku takto zmeneného AS. Taktiež bola ukázaná schopnosť merania smerových charakteristík pomocou kvadrokop-téry a zobrazené boli aj metódy spracovania, pomocou ktorých je možné zachovať charakte-ristický tvar nameranej vyžarovacej charakteristiky a eliminovať disperziu údajov spôsobenú meraním v reálnych podmienkach. Aby bolo možné túto metódu aplikovať aj pre širší rozsah použitia, je potrebné zmenu smerovej charakteristiky kvantifikovať a vyhodnotiť. Pre tento účel je možné použiť viacej spôsobov a porovnaní pričom jedným zo spôsobov môže byť vy-hodnotenie vzájomných rozdielov smerových charakteristík plne funkčného AS a AS obsahu-júceho nevyžarujúcu anténu. V tomto prípade sa bude porovnávať simulácia so simuláciou a rozdiely sa následne porovnajú s rozdielmi z porovnania nameraných dát plne funkčného AS a AS s nevyžarujúcou anténou. Pre túto metódu je potrebné mať dopredu namerané smerové charakteristiky plne funkčného AS.

### 4.1 Analýza rozdielov vyžarovacích charakteristík v horizontálnej rovine

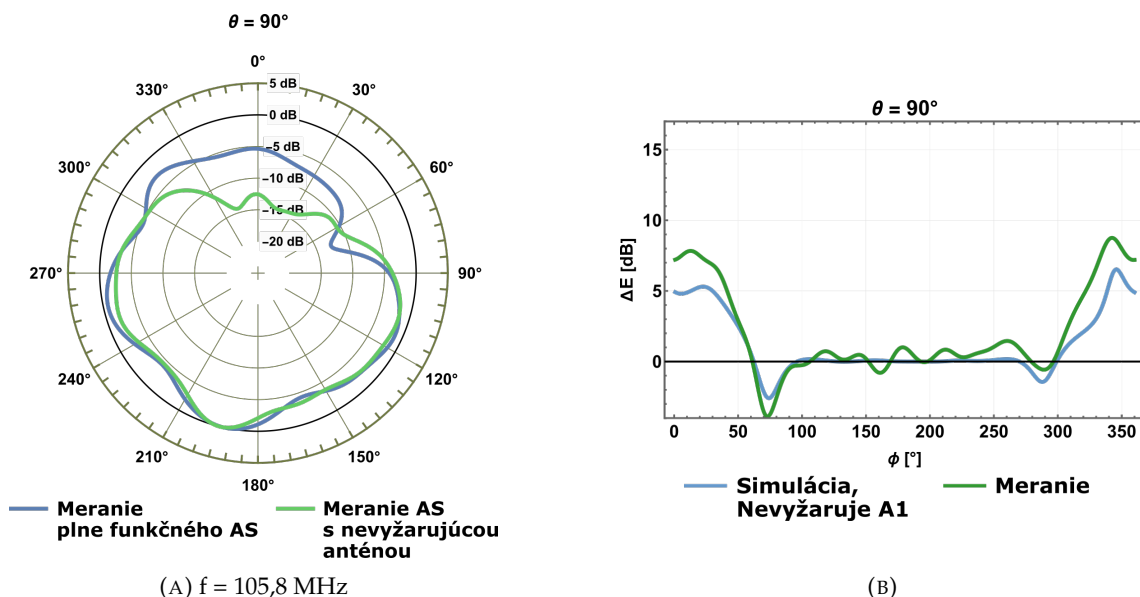
Najjednoduchším spôsobom ako zvýrazniť rozdiely dvoch vypočítaných smerových cha-rakteristík je ich vzájomne odčítať, čím vznikne tzv. chybová funkcia/krivka závislá od uhla. Táto krivka môže byť následne porovnaná s krivkou, ktorá vznikne odčítaním nameraných smerových charakteristík. Vieme, že zmeny sa prejavujú približne v oblasti, kde sa nachádza ne-vyžarujúca anténa a navyše vďaka tomu, že sú antény umiestnené len v troch/štyroch rôznych azimutoch, a v smerových charakteristikách sa nevyskytujú ostré minimá, tak sa prejavujú zmeny spojitého charakteru naprieč celou oblasťou ovplyvnenou nevyžarujúcou anténou.

Na Obr. 4.1a sú zobrazené smerové charakteristiky pre AS2 v pravouhľom grafe a na Obr. 4.1b sú zobrazené vzájomné rozdiely týchto smerových charakteristík. Je možné vidieť, že roz-diely pokrývajú značnú plochu v priestore podľa toho, ktorá anténa nevyžaruje. Takýto cha-rakter rozdielovej funkcie/krivky je výhodný a to najmä z pohľadu merania v reálnych pod-mienkach kde sa prejaví vplyv podmienok merania a vznikne rozptyl údajov, čo má vplyv na



OBR. 4.1: Porovnanie horizontálnych smerových charakteristík pre AS2 pri rôznych nevyžarujúcich elementoch v jednom azimute

konečný tvar smerových charakteristík. Smerové charakteristiky namerané vo vzdialenosti 150 m sú na Obr. 4.2a. Pôvodné namerané smerové charakteristiky boli spracované a vyhladené pomocou metódy *FFT*. Hneď si môžeme všimnúť, že v prípade smerovej charakteristiky AS s nevyžarujúcou anténou, dochádza k výraznému poklesu meraných hodnôt intenzity EM poľa v oblasti  $300^\circ \div 60^\circ$ , čo na prvý pohľad zodpovedá tomu, ako sa správa tvar smerovej charakteristiky pri poškodenej anténe „A1“. Zobrazením rozdielov ako funkcie uhla môžeme tento predpoklad potvrdiť. Na Obr. 4.2b sú zobrazené vzájomné rozdiely nameraných smerových



OBR. 4.2: Namerané smerové charakteristiky AS2 v horizontálnej rovine vo vzdialenosti 150 m

charakteristík a zároveň sú porovnané s rozdielmi vypočítaných smerových charakteristík pre nevyžarujúce antény v rôznych azimutoch. Môžeme vidieť, že tvar rozdielovej funkcie nameraných smerových charakteristík sa jednoznačne blíži k tvaru rozdielovej funkcie vypočítaných

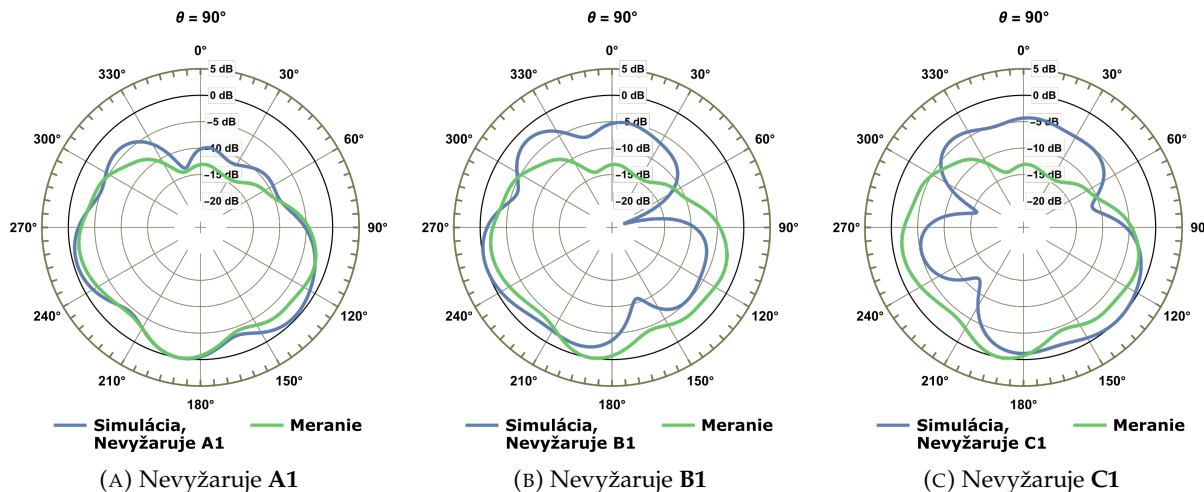
smerových charakteristík kedy nevyžarovala anténa „A1“.

## 4.2 Vyhodnotenie podobnosti nameraných a vypočítaných vyžarovacích charakteristík

Ďalšou možnosťou ako vyhodnotiť zmenu smerovej charakteristiky môže byť priame porovnanie vypočítanej nameranej charakteristiky AS pri nevyžarujúcej anténe. Parameter, pomocou ktorého môžeme vyhodnotiť ich podobnosť je napríklad Pearsonov korelačný koeficient. Pearsonov korelačný koeficient môžeme vypočítať podľa vzťahu [19]:

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - x_{av})(y_i - y_{av})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{av})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{av})^2}}. \quad (4.1)$$

Na základe korelačného koeficienta môžeme očakávať, že keď použijeme pre porovnanie vhodnú smerovú charakteristiku (vyradená anténa v simulácii je identická s poškodenou anténou pri meraní) tak hodnota korelačného koeficienta sa bude blížiť k hodnote 1. Výpočet korelačného koeficienta môžeme tiež doplniť o výpočet  $\Delta S$  z rovnice (3.7). Smerové charakteristiky z merania pri jednej nevyžarujúcej anténe sú zobrazené v polárnych grafoch na Obr. 4.3. Na týchto grafoch sú zároveň porovnané aj s vypočítanými smerovými charakteristikami pre rôzne vyradené antény.



OBR. 4.3: Porovnanie nameraných smerových charakteristík pri nevyžarujúcej anténe a vypočítaných smerových charakteristík pri rôznych nevyžarujúcich anténach na frekvencii 105,8 MHz

V Tab. 4.1 môžeme vidieť hodnoty korelačných koeficientov a smerodajných odchýlok pri porovnaní nameraných smerových charakteristík s vypočítanými. Pri porovnaní s vypočítanou smerovou charakteristikou kedy nevyžaruje anténa A1 dosahujú hodnoty korelačného koeficienta  $k_r$  hodnoty  $\sim 0,95$ , zatiaľ čo v ostatných dvoch prípadoch (predpoklad, že nevyžaruje anténa B1/C1) sa hodnoty  $k_r$  pohybujú v intervale  $\langle 0,13; 0,37 \rangle$ . Toto pozorovanie potvrdzuje závery dosiahnuté porovnaním vzájomných rozdielov dvoch smerových charakteristík.

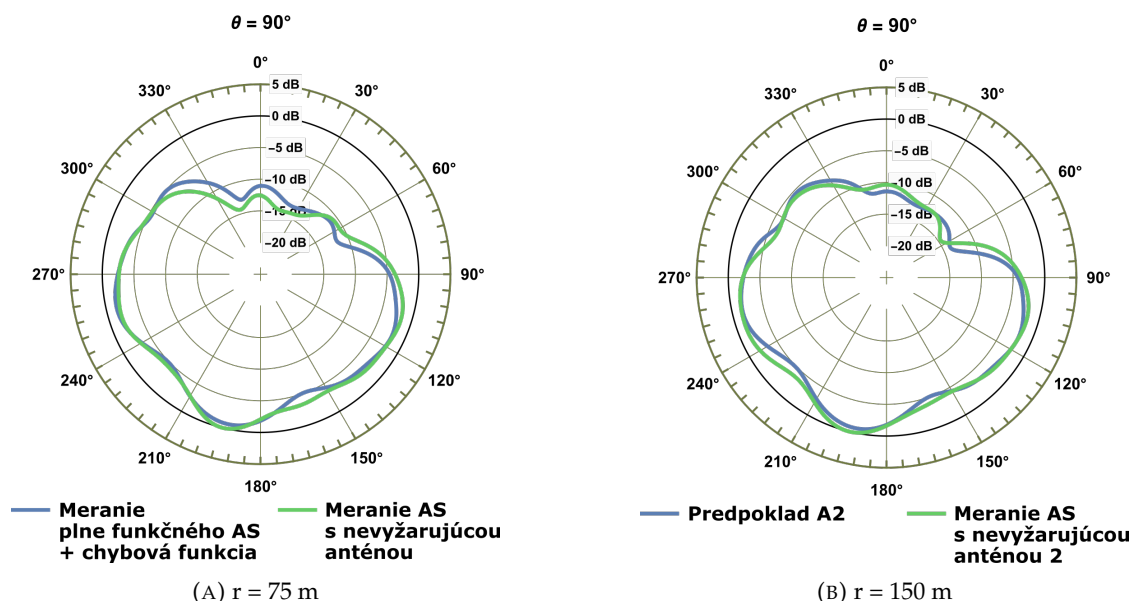
TABUĽKA 4.1: Hodnoty korelačných koeficientov nameranej a vypočítanej smerovej charakteristiky

	Meranie/ Simulácia - Nevyžaruje A1	Meranie/ Simulácia - Nevyžaruje B1	Meranie/ Simulácia - Nevyžaruje C1
	$k_r [-]$	$k_r [-]$	$k_r [-]$
$r = 75$ [m] $f = 91,9$ [MHz]	0,943	0,259	0,251
$r = 75$ [m] $f = 105,8$ [MHz]	0,960	0,372	0,134
$r = 150$ [m] $f = 91,9$ [MHz]	0,954	0,296	0,205
$r = 150$ [m] $f = 105,8$ [MHz]	0,951	0,321	0,142

### 4.3 Vytvorenie predpokladu pre tvar nameranej smerovej charakteristiky pomocou rozdielov vypočítaných smerových charakteristík

Proces vyhodnotenia môže komplikovať aj fakt, že smerové charakteristiky namerané v reálnych podmienkach sa vždy budú líšiť od výpočtu. Existuje však aj možnosť ako zachovať vlastnosti smerovej charakteristiky reálneho AS a vytvoriť predpoklad pre tvar jeho smerovej charakteristiky aj pri nevyžarujúcej anténe. Touto možnosťou je odčítanie chybovej funkcie/krivky (rozdiely vypočítaných smerových charakteristík) od nameraných charakteristík plne funkčného AS. Vzniknutá smerová charakteristika môže byť následne porovnaná s meraniami a pomocou korelačného koeficienta môže byť vyhodnotená ich podobnosť. Nameraných bolo 8 smerových charakteristík v horizontálnej rovine pri dvoch rôznych nevyžarujúcich anténach (vždy nevyžarovala iba jedna) v azimute „A“. Aby bolo možné odhadnúť, ktorá charakteristika prislúcha ku ktorej nevyžarujúcej anténe, je potrebné všetkých 8 charakteristík porovnať s predpokladom pre nevyžarujúcu anténu A1 (ďalej len „Predpoklad A1“) a s predpokladom pre anténu A2 (ďalej len „Predpoklad A2“). Na Obr. 4.4a sú zobrazené smerové charakteristiky z merania 1 (meranie pri prvej vyradenej anténe), porovnané s *Predpokladom A1* a na Obr. 4.4b sú zobrazené smerové charakteristiky z merania 2 (meranie pri druhej vyradenej anténe), ktoré sú porovnané s *Predpokladom A2*. Jedná sa o merania vo vzdialenosti 150 m, na frekvencii 105,8 MHz. Vzájomné podobnosti pre všetky prípady sú pomocou korelačného koeficienta vyčíslené v Tab. 4.2.





OBR. 4.4: Porovnanie smerových charakteristík AS2 nameraných vo vzdialenosti 105,8 MHz s vytvoreným predpokladom

TABUĽKA 4.2: Hodnoty korelačného koeficienta pri porovnaní nameraných a predpokladaných smerových charakteristík pri rôznych vyradených anténach v jednom azimute

	Meranie 1/ Predpoklad A1	Meranie 1/ Predpoklad A2	Meranie 2/ Predpoklad A1	Meranie 2/ Predpoklad A2
	$k_r[-]$	$k_r[-]$	$k_r[-]$	$k_r[-]$
$r = 75 \text{ [m]}$ $f = 91,9 \text{ [MHz]}$	0,965	0,955	0,962	0,967
$r = 75 \text{ [m]}$ $f = 105,8 \text{ [MHz]}$	0,977	0,943	0,966	0,971
$r = 150 \text{ [m]}$ $f = 91,9 \text{ [MHz]}$	0,984	0,967	0,961	0,975
$r = 150 \text{ [m]}$ $f = 105,8 \text{ [MHz]}$	0,974	0,938	0,968	0,978

V Tab. 4.2 si môžeme všimnúť, že korelačný koeficient pre všetky smerové charakteristiky z merania 1 porovnané s Predpokladom A1 a Predpokladom A2 má hodnoty bližšie k hodnote 1 pri porovnaní s Predpokladom A1, čo naznačuje, že pri meraní naozaj nevyžarovala anténa A1. Toto zistenie je ešte viac utvrdené porovnaním merania 2 s oboma predpokladmi. V tomto prípade korelačný koeficient má vyššie hodnoty pri porovnaní s Predpokladom A2, čo poukazuje na nevyžarujúcu anténu A2. V ani jednom z prípadov nedochádza k žiadnemu prekryvu (Meranie 1 by sa viac podobalo na Predpoklad A2, alebo Meranie 2 by sa viac podobalo na Predpoklad A1). Správnosť tohto vyhodnotenia bolo potvrdené aj technikmi, ktorí manuálne odpájali jednotlivé antény za účelom realizácie experimentu. Tí potvrdili, že naozaj pri meraní 1 nevyžarovala anténa A1 a pri meraní 2 nevyžarovala anténa A2.

## Záver a zhnutie

Práca sa venovala problematike diagnostiky anténneho systému, kde cieľom bolo navrhnuť a otestovať metódu, ktorá by zefektívnila proces identifikácie poškodenej antény. Na základe teoretickej analýzy a matematického vyjadrenia smerovej charakteristiky anténnej sústavy sa podarilo ukázať, že jej tvar priamo súvisí ako s parametrami jednotlivých elementov (antén), tak aj od ich rozloženia v priestore a vlastností ich napájacích signálov. Na základe toho sme dokázali, že výpadok vyžarovania niektorej z antén vplyvom poškodenia vedie k zmene tvaru smerovej charakteristiky, čo je možné skúmať pomocou meraní. Aby bolo možné budúce merania vyhodnotiť bolo potrebné si vytvoriť predpoklad toho akým spôsobom sa zmení smerová charakteristika v prípade poškodenia rôznych elementov. Pre tento účel poslúžil simulačný a výpočtový softvér FEKO, v ktorom bolo možné vytvoriť parametrické modely antén a vypočítať ich vyžarovacie parametre. Nakoľko vyskladanie AS pomocou parametrických modelov a následný výpočet jeho smerovej charakteristiky by si vyžadoval extrémne vysoké nároky na výpočtový hardvér, bola využitá schopnosť FEKA nahradiť parametrické modely numerickými substitúciami. Pomocou týchto substitúcií boli následne vypočítané smerové charakteristiky ôsmich anténnych systémov.

### 1. Návrh metódy diagnostiky AS

Vyrad'ovaním jednotlivých antén boli simulované ich poškodenia a zobrazené smerové charakteristiky takto zmenených anténnych systémov. Na základe analýzy novo-vzniknutých smerových charakteristík sa ukázalo, že v prípade malých anténnych systémov (2 - 3 poschodia s anténami) je možné analýzou prierezu smerovej charakteristiky v horizontálnej rovine identifikovať azimut, v ktorom sa nachádza poškodená anténa a taktiež aj poschodie. V prípade stredne veľkých anténnych systémov (4 - 5 poschodí s anténami) a veľkých anténnych systémov (6 a viac poschodí s anténami) sa ukázala iba analýza smerových charakteristík v horizontálnej rovine nedostatočná a bolo potrebné navrhnuť doplňujúcu analýzu, vo výsledku meranie. Táto alternatíva sa ukázala vo forme prierezu smerovej charakteristiky vo vertikálnej rovine, v azimute, v ktorom sa nachádza poškodená anténa. Podarilo sa ukázať, že vyrad'ovanie antén v rôznych poschodiach má unikátny vplyv na tvar smerovej charakteristiky vo vertikálnej rovine, čím je možné jednoznačne určiť, v ktorom poschodí sa nachádza poškodená anténa. Na základe týchto zistení sme navrhli metódu diagnostiky pomocou merania smerovej charakteristiky AS, pričom pre malé anténne systémy môže postačovať meranie smerovej charakteristiky v horizontálnej rovine a v prípade stredne veľkých a veľkých anténnych systémov môže byť meranie v horizontálnej rovine použité pre určenie azimutu, kde sa nachádza poškodená anténa a meraním vo vertikálnej rovine bude môcť byť identifikovaná konkrétna poškodená anténa. Tým pádom sme splnili prvý čiastkový cieľ dizertačnej práce s názvom **Návrh metódy diagnostiky AS** a navrhli sme metódy, pomocou ktorých môže byť identifikovaná

poškodená anténa.

## 2. Vyhodnotenie a identifikácia vplyvu fázovej chyby na merané hodnoty intenzity EM poľa

Nakoľko efektivita navrhovanej metódy spočíva predovšetkým vo vhodnej metóde merania, tak nasledujúce riešenie práce bolo zamerané na výber vhodnej meracej metódy a návrh metodiky za účelom diagnostiky AS. Boli v krátkosti priblížené metódy merania vyžarovacích anténnych parametrov, ako merania v odtienených komorách, vo vonkajších podmienkach nad zemským povrchom, alebo merania vo voľnom priestore (vo veľkej výške nad zemským povrchom). Na základe analýzy výhod a nevýhod jednotlivých metód pre riešenie problematiky, bolo ako najvhodnejšie zvolené meranie smerovej charakteristiky vo voľnom priestore. Toto meranie bolo v minulosti realizované pomocou helikoptéry a ako také má dobre definovanú metodiku a postup merania. Keďže v dnešnej dobe existuje analógia k helikoptére v podobe bezpilotných dronov, v našom prípade kvadroptéry, tak niektoré aspekty, ako napríklad vhodná vzdialenosť pre merania smerovej charakteristiky museli byť bližšie analyzované. Všeobecne je ako podmienka minimálnej vzdialenosti používaný *Reyleigho* vzťah ( $2D^2/\lambda$ ), pričom odporúčania pre helikoptéru hovorili o minimálnej meracej vzdialenosti 1 km a viac. Nakoľko kvadroptéra dokáže bezpečne letieť oveľa bližšie a presnosť určenia aktuálnej polohy je oveľa lepšia, tak aj nároky na minimálnu vzdialenosť pre meranie môžu byť benevolentnejšie. V rámci analýzy vhodnej meracej vzdialenosti bol opäť využitý výpočtový softvér FEKO, v ktorom boli vypočítané prierezy smerových charakteristík v horizontálnej a vertikálnej rovine v rôznych konečných vzdialenostiach. Tieto charakteristiky boli následne porovnané s charakteristikami vypočítanými pre nekonečnú vzdialenosť, čo predstavuje ideálny stav. Účelom bolo nájsť najbližšiu možnú vzdialenosť, kedy maximálna amplitúdová chyba spôsobená meraním v konečnej vzdialenosti nepresahuje hodnotu 0,5 dB. Na základe analýzy bolo ukázané, že pre malé anténne systémy je *Reyleigho* podmienka nedostatočná a je potrebné merať v približne trojnásobnej vzdialenosti, pre stredne veľké anténne systémy sa ukázala byť táto podmienka adekvátne a pre veľké anténne systémy sa pre meranie v horizontálnej rovine ukázala byť táto podmienka príliš striktná, pričom je možné merať v bližšej vzdialenosti a naopak vo vertikálnej rovine je potrebné merať v oveľa väčšej vzdialenosti. Výsledky naznačujú, že okrem fyzickej veľkosti AS je podstatným parametrom ovplyvňujúcim vhodnú meraciu vzdialenosť aj samotný tvar meranej smerovej charakteristiky a pri návrhu postupu merania je potrebné brať ohľad aj na tento fakt. Výsledky analýzy v tejto časti sú výhodné hneď z dvoch dôvodov. Jedným prínosom tejto analýzy je presnosť samotných meraní a minimalizácia systematickej chyby, ktorá by vznikla meraním v nevhodnej vzdialenosti od AS. Zároveň nemusí byť potrebné merať v príliš veľkých vzdialenostiach, kedy je meranie náchylné na interferenciu priamej a odrazenej EM vlny. Druhým prínosom zjednodušenie samotných výpočtov smerových charakteristík pre porovnanie s meraniami, nakoľko ak je dodržaná podmienka dostatočnej vzdialenosti, výpočty sa dá realizovať pre vzdialené pole a nie je potrebné ich realizovať pre konečnú vzdialenosť, čo niekoľko krát zníži nároky na výpočet. Táto analýza priamo riešila

druhý čiastkový cieľ dizertačnej práce, ktorým bolo **Vyhodnotenie a identifikácia vplyvu fázovej chyby na merané hodnoty intenzity EM poľa**. V rámci riešenia tejto práce sa nepodarilo výsledky zo simulácii otestovať meraniami. Najvhodnejšie meranie na potvrdenie tejto analýzy by v budúcnosti mohlo byť vytvorenie zmenšeného modelu AS (na vyšších frekvenciách), ktorý by bolo možné merať v odtienenej bezodrazovej komore, čo by zabezpečilo kontrolované podmienky a vysokú presnosť merania.

### **3. Zdokonalenie a spresnenie metód vyhodnocovania vyžarovacej (smerovej) charakteristiky za účelom identifikácie poškodenej antény**

Po zvolení vhodnej metódy merania, vyšpecifikovaní podmienok pre meranie a priblížení metodiky sme prešli k analýze a spracovaniu samotných dát z merania smerovej charakteristiky získanej pomocou kvadroptéry. Nakoľko meranie v reálnych podmienkach je ovplyvnené vlastnosťami prostredia, ako aj samotnou meracou aparatúrou, tak na nameraných smerových charakteristikách sa prejavil zreteľný rozptyl údajov. Práca s údajmi s výrazným rozptylom, prípadne nevhodné spracovanie a minimalizácia rozptylu by mohli viesť k zníženiu efektivity akejkoľvek implementovanej analýzy, ktorej účelom je identifikácia poškodenej antény pomocou vyhodnotenia tvaru smerovej charakteristiky. Riešenie problému s rozptylom údajov spočívalo v otestovaní a porovnaní viacerých metód spracovania, ktoré sú schopné minimalizovať rozptyl údajov (odstrániť šum) a zachovať základný tvar a charakteristické tvarové prvky nameranej smerovej charakteristiky. Za týmto účelom boli porovnané tri metódy a to kľzavý priemer, spracovanie pomocou rýchlej fourierovej transformácie a viacúrovňové spracovanie pomocou vlnkovej transformácie.

V prípade kľzavého priemeru sa ukázalo, že je najviac náchylný na počet nameraných údajov a amplitúdu rozptylu a aby bolo možné dosiahnuť požadovanú „hladkosť“ smerovej charakteristiky je potrebné priemerovať cez väčší počet údajov, čo v konečnom dôsledku deformuje jej výsledný tvar. Veľkou výhodou je však jeho jednoduchosť a tým pádom aj aplikovateľnosť priamo do možného meracieho zariadenia, prípadne pre zobrazenie orientačných výsledkov.

Spracovanie pomocou *FFT* spočívalo v dekompozícii smerovej charakteristiky na spektrum fourierových koeficientov, pričom následne boli vynulované tie, ktoré tvorili šum a ponechané boli tie, ktoré najviac prispievali k tvaru smerovej charakteristiky. Toto spracovanie vykazovalo veľkú efektívitu a veľmi dobré zachovanie tvaru smerovej charakteristiky, čo bolo ukázané aj pomocou analýzy smerodajných odchýlok a porovnaním s kľzavým priemerom.

Pomocou vlnkovej transformácie bolo možné najlepšie zachovať charakteristický tvar smerovej charakteristiky a to najmä pri lokálnych extrémoch, akými sú silne potlačené minimá, alebo priestorovo malých tvarových prvkoch ako malé postranné laloky. Nevýhodou tejto metódy je jej komplexnosť a komplikovanosť, čo ju obmedzuje len na použitie v tzv. „post-processingu“.

Táto analýza sa dotýkala tretieho čiastkového cieľa dizertačnej práce, ktorým bolo **Zdokonalenie a spresnenie metód vyhodnocovania vyžarovacej (smerovej) charakteristiky za**

**účelom identifikácie poškodenej antény.** Využitie metód spracovania ako *FFT* a *FWT* môže výrazne zefektívniť proces identifikácie poškodenej antény.

Cieľom poslednej časti práce bolo identifikovať nevyžarujúce antény v *AS* pomocou nameraných smerových charakteristík v horizontálnej rovine. K dispozícii bolo 12 smerových charakteristík, ktoré boli namerané v dvoch vzdialenostiach a na dvoch frekvenciách. Tieto charakteristiky boli rozdelené do troch celkov, pričom jeden bol definovaný tým, že merania boli realizované pri plne funkčnom *AS* (bez poškodenej antény), do druhého spadali merania pri jednej nevyžarujúcej anténe a do tretieho patrili merania pri inej nevyžarujúcej anténe.

Vyhodnotenie v tejto časti práce bralo v úvahu všetky poznatky z predchádzajúcich častí dizertačnej práce, kde pre porovnania boli použité vypočítané smerové charakteristiky podľa metódy približenej v prvej časti, samotné merania museli spĺňať parametre na základe analýzy z druhej časti a pre samotné spracovanie nameraných smerových charakteristík boli použité metódy z tretej časti dizertačnej práce.

Pre identifikáciu nevyžarujúcej antény bolo implementovaných viac metód kde jedna spočívala v porovnaní rozdielov nameraných smerových charakteristík (jedna z merania pri plne funkčnom *AS* a druhá z merania pri jednej nevyžarujúcej anténe) a rozdielov vypočítaných smerových charakteristík. Druhá bola založená na priamom porovnaní nameraných a vypočítaných smerových charakteristík, kde ich vzájomná podobnosť bola vyhodnotená pomocou korelačného koeficienta. Tretia metóda spojila dve predošlé metódy, kde pomocou odčítania rozdielov vypočítaných charakteristík od nameranej charakteristiky plne funkčného *AS* vznikol predpoklad tvaru smerovej charakteristiky, ktorú reálny *AS* nadobudne pri poškodení jednej z antén. Tento predpoklad bol následne porovnaný s meraniami a na základe vyhodnotenia korelačným koeficientom sa podarilo identifikovať dve rôzne nevyžarujúce antény pre dve merania. Vyriešením tejto časti práce bol dosiahnutý cieľ dizertačnej práce a podarilo sa navrhnúť a otestovať novú metódu, pomocou ktorej je možné identifikovať poškodenú anténu. Implementácia tejto metódy môže pomôcť k zefektívneniu diagnostiky *AS* a umožní minimalizovať čas odstávky vysielania len na čas potrebný pre výmenu poškodenej antény.

Je potrebné podotknúť, že merania a následné vyhodnotenia boli realizované len pre jeden *AS* a tým bol jeden z malých anténnych systémov. Merania pri poškodených anténach pre stredne veľký *AS* a pre veľký *AS* v rámci riešenia práce neboli realizované. Tým pádom nebolo možné prakticky potvrdiť metódu identifikácie poškodenej antény pomocou vertikálnych letov a tieto merania budú musieť byť realizované v rámci budúceho výskumu.

Úspešné vyriešenie tejto práce má prínos nie len v rámci diagnostiky *AS*, ale aj v rámci meraní smerových charakteristík pomocou kvadroptéry. Na základe analýzy v druhej časti práce je možné zefektívniť samotný proces merania a znížiť veľkosť systematických chýb, ktoré vyplývajú z merania v nedostatočnej vzdialenosti. Analýza v tretej časti práce umožňuje efektívne spracovanie nameraných smerových charakteristík a vďaka nej je možné minimalizovať rozptyl údajov pri zachovaní charakteristického tvaru smerovej charakteristiky.

# Bibliografia

- [1] C. A. Balanis. *Antenna Theory. Analysis and Design*. 4. vyd. Wiley & Sons, Inc., dec. 2015, s. 1072.
- [2] C. A. Balanis. *Advanced engineering electromagnetics*. 1. vyd. Wiley & Sons, Inc., 1989, s. 981. ISBN: 0-471-50316-9.
- [3] S. Charland. *An investigation of the extent of the Fresnel region of aperture antennas with attention to superdirectivity*. Defence research establishment Ottawa, Canada, Schválené pre verejné vydanie. August 1989, s. 78.
- [4] J. E. Hansen. *Spherical Near-Field Antenna Measurements*. IEE Electromagnetic Series 26. Peter Peregrinus Ltd. on behalf of Institution of Electrical Engineers; London; UK, 1988, s. 387. ISBN: 0-86341-110-X.
- [5] Š. Vávra a J. Turán. *Antény a šírenie elektromagnetických vln*. 1. vyd. Alfa, Bratislava, 1982, s. 298.
- [6] R. Hart'anský a J. Hallon. *Senzory pre meranie elektromagnetického poľa*. 1. vyd. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, s. 166. ISBN: 978-80-227-4565-9.
- [7] J. D. Kraus. *Antennas*. 2. vyd. McGraw-Hill, 1988, s. 873.
- [8] *Měření antén v pásmu velmi krátkých a ultra krátkých vln*. CZ. Rezortní technický předpis RA11. Praha: Federální ministerstvo dopravy a spojů, 1989.
- [9] *Dubnik FM Transmitting Antenna; Version 1.0*. en. Technical Proposal. Kronstaudener Weg 1; 83 071 Stephankirchen; Rosenheim; Germany: Kathrein Solutions GMBH, 2021.
- [10] P. Hacker a H. Schrank. „Range distance requirements for measuring low and ultralow sidelobe antenna patterns“. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 30.5 (1982), s. 956–966. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142916.
- [11] C. C. Cutler, A. P. King a W. E. Kock. „Microwave Antenna Measurements“. In: *Proceedings of the IRE* 35.12 (1947), s. 1462–1471. DOI: 10.1109/JRPROC.1947.234571.
- [12] S. Harmsen, Yu-Hui Chang a S. Hattrup. „Simple Moving Average: A Method of Reporting Evolving Complication Rates“. In: *Orthopedics* 39 (máj 2016). DOI: 10.3928/01477447-20160517-02.
- [13] O. Ondráček. *Diskrétné signály a systavy*. 1. vyd. Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2002, s. 250. ISBN: 80-227-1649-9.

- 
- [14] S. L. Brunton a J. N. Kutz. *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. 1. vyd. Cambridge University Press, 2019, s. 552. DOI: 10.1017/9781108380690.
- [15] E. O. Brigham. *The Fast Fourier Transform and its Applications*. Prentice Hall Inc. - A Division of Simon & Schuster., 1988, s. 552. ISBN: 0-13-307505-2.
- [16] A. C. Olivieri, G. M. Escandar, H. C. Goicoechea a A. M. de la Pena. *Fundamentals and Applications of Multiway Data Analysis*. 1. vyd. Elsevier, 2024, s. 688. ISBN: 978-0-443-13261-2.
- [17] Chun-Lin Liu. „A Tutorial of the Wavelet Transform“. In: (feb. 2010), s. 71.
- [18] J. Anděl. *Matematická statistika*. 1. vyd. STNL - Nakladatelství technické literatury, 1978, s. 352.
- [19] P. Schober, C. Boer a L. Schwarte. „Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation“. In: *Anesthesia & Analgesia* 126 (feb. 2018), s. 1. DOI: 10.1213/ANE.0000000000002864.

## Publikácie a citácie autora

### *V2 Vedecký výstup publikačnej činnosti ako časť editovanej knihy alebo zborníka*

---

- V2<sub>01</sub> DZURIŠ, M. - HARTĀNSKÝ, R. - KRCHNÁK, J. Improving hardware solution for large antenna systems radiation pattern measurement. In Electro-mechanical systems application in industry 2022 : Zliechov, Slovakia. August 23-26, 2022. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, S. 9-13. ISBN 978-80-227-5280-0. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>02</sub> DZURIŠ, M. - KRCHNÁK, J. Large antenna systems radiation pattern measurement. In Electro-mechanical systems application in industry 2022 : Zliechov, Slovakia. August 23-26, 2022. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, S. 15-17. ISBN 978-80-227-5280-0. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>03</sub> DZURIŠ, M. - HARTĀNSKÝ, R. - KRCHNÁK, J. Measuring the radiation pattern of large FM antenna system. In Measurement 2023 : 14th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia. May 29-31, 2023. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2023, S. 135-138. ISBN 978-80-972629-6-9. V databáze: IEEE: 10164409 ; SCOPUS: 2-s2.0-85165000898 ; DOI: 10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164409. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>04</sub> DZURIŠ, M. - KRCHNÁK, J. - HARTĀNSKÝ, R. Rapid prototyping of planar microwave filters with ANSYS and KICAD. In Electro-mechanical systems application in industry 2023 : Zliechov, Slovakia. August 22-25, 2023. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 1-7. ISBN 978-80-227-5400-2. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD



- V2<sub>05</sub> HARTĀNSKÝ, R. - KRCHNÁK, J. - DZURIŠ, M. - FINTOR, J. Wireless force measurement device with mems sensing element. In Electro-mechanical systems application in industry 2022 : Zliechov, Slovakia. August 23-26, 2022. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, S. 29-32. ISBN 978-80-227-5280-0. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>06</sub> KRCHNÁK, J. - HARTĀNSKÝ, R. - GRILLI, N. UHF DTV antenna system diagnostics by radiation pattern measuring. In Measurement 2021 : 13th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 17-19, 2021. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2021, S. 232-235. ISBN 978-80-972629-5-2. V databáze: IEEE: 9446822 ; SCOPUS: 2-s2.0-85111585193 ; DOI: 10.23919/Measurement52780.2021.9446822. Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>07</sub> KRCHNÁK, J. - HARTĀNSKÝ, R. - DZURIŠ, M. - ŠTIBRANÝ, M. Detection of faulty antenna in antenna system using equivalent hertzian dipole structures. In Electro-mechanical systems application in industry 2022 : Zliechov, Slovakia. August 23-26, 2022. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2022, S. 47-50. ISBN 978-80-227-5280-0. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>08</sub> KRCHNÁK, J. - HARTĀNSKÝ, R. - DZURIŠ, M. - ŠTIBRANÝ, M. Calculation of induced currents in antenna system anchoring cables by equivalent source substitution. In Measurement 2023 : 14th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia. May 29-31, 2023. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2023, S. 139-142. ISBN 978-80-972629-6-9. V databáze: IEEE: 10164480 ; SCOPUS: 2-s2.0-85165052858 ; DOI: 10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164480. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>09</sub> KRCHNÁK, J. - HARTĀNSKÝ, R. - DZURIŠ, M. Testing the influence of the measurement antenna on the radiation pattern measurement. In Electro-mechanical systems application in industry 2023 : Zliechov, Slovakia. August 22-25, 2023. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 47-52. ISBN 978-80-227-5400-2. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

- V2<sub>10</sub> KRCHNÁK, J. - DZURIŠ, M. - HARŤANSKÝ, R. - KLIUCHKA, A. - ŠTIBRANÝ, M. Towards an Identification of Faulty Antenna in Large Antenna Systems using Vertical Flight Pattern Quadcopter Measurements. In Radioelektronika 2024 : 34th International Conference. Žilina, Slovakia. April 17-18, 2024. Piscataway : IEEE, 2024, [4] s. ISSN 2767-9969. ISBN 979-8-3503-6216-9. V databáze: DOI: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA61599.2024.10524079 ; SCOPUS: 2-s2.0-85194182769 ; IEEE: 10524079. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>11</sub> ŠTIBRANÝ, M. - HARŤANSKÝ, R. - KRCHNÁK, J. - DZURIŠ, M. Faulty antenna detection in large antenna systems by measuring the phase of reflected wave. In Measurement 2023 : 14th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia. May 29-31, 2023. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2023, S. 179-182. ISBN 978-80-972629-6-9. V databáze: IEEE: 10164414 ; SCOPUS: 2-s2.0-85164983512 ; DOI: 10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164414. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD
- V2<sub>12</sub> ŠTIBRANÝ, M. - HARŤANSKÝ, R. - DZURIŠ, M. - KRCHNÁK, J. Design of microwave solid-state power amplifier using microstrip components. In Electro-mechanical systems application in industry 2023 : Zliechov, Slovakia. August 22-25, 2023. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2023, S. 53-59. ISBN 978-80-227-5400-2. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

---

### *V3 Vedecký výstup publikačnej činnosti z časopisu*

---

- V3<sub>01</sub> HARŤANSKÝ, R. - HALLON, J. - KRCHNÁK, J. - DZURIŠ, M. Renewal of Middle Wave Transmitters in Slovak Republic. In Vestník Iževského gosudarstvennogo techničeskogo universiteta. Vol. 24, iss. 4 (2021), s.65-72. ISSN 1813-7903. Kategória publikácie do 2021: ADE
- V3<sub>02</sub> HARŤANSKÝ, R. - MIERKA, M. - JANČÁRIK, V. - BITTERA, M. - HALGOŠ, J. - DZURIŠ, M. - KRCHNÁK, J. - HRICKO, J. - ANDOK, R. Towards a MEMS force sensor via the electromagnetic principle. In Sensors. Vol. 23, iss. 3 (2023), Art. no. 1241 [16] s. ISSN 1424-3210 (2022: 3.900 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.764 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/s23031241 ; WOS: 000932946300001 ; CC: 000932946300001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85147998215. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADC

V3<sub>03</sub> KRCHNÁK, J. - HARTĀNSKÝ, R. - DZURIŠ, M. - HALGOŠ, J. - GRILLI, N. - ŠTIBRANÝ, M. Identification of Faulty Antenna in Large FM Antenna System Using Quadcopter Measurements. In International Journal on Communications Antenna and Propagation. Vol. 13, iss. 5 (2023), s. 238-248. ISSN 2039-5086 (2022: 0.264 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.15866/irecap.v13i5.24214 ; SCOPUS: 2-s2.0-85185656971. Typ výstupu: článok; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: ADM

---

Zdroj: <https://kis.cvt.stuba.sk/i3/epcareports/epcarep.csp?ictx=stu&language=1>

---

*Citácie registrované v databáze SCOPUS*

---

- 1 MARDLIJAH - SANTOSO A. - IMRON C. - KHOTIMAH A.K. - PRIHATINI D. - ALIFAH Z.N. - JONATHAN K. Comparison of Quadcopter Stability Motion Using Feedback Control System and LQG. In *International Review of Automatic Control*. Vol. 16, iss. 6 (2023), s. 282-289. ISSN 1974-6059. DOI: 10.15866/ireaco.v16i6.24152 ; SCOPUS: 2-s2.0-85188988287.
- 2 SHAMA Y.S. - RAHMANIAN S. - MOUHARRAR H. - ABDELRAHMAN R. - ELHADY A. - ABDEL-RAHMAN E.M. Unraveling the nature of sensing in electrostatic MEMS gas sensors. In *Microsystems and Nanoengineering*. Vol. 10, iss. 1 (2024), Art. No. 56. ISSN 2055-7434. DOI: 10.1038/s41378-024-00688-3 ; SCOPUS: 2-s2.0-85192155603.
- 3 LYU P. - ZHU J. - LAI J. - YUAN C. - WANG P. Indoor pedestrian navigation method based on behavior probability analysis. In *Zhongguo Guanxing Jishu Xuebao/Journal of Chinese Inertial Technology*. Vol. 31, iss. 11 (2023), s. 1122-1131. ISSN 1005-6734. DOI: 10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2023.11.008 ; SCOPUS: 2-s2.0-85179677424.
- 4 WU Q. - WANG S. - YAO M. - NIU Y. - WANG C. Nonlinear dynamics of three-layer microplates: simultaneous presence of the micro-scale and imperfect effects. In *European Physical Journal Plus*. Vol. 139, iss. 5 (2024), Art. No. 446. ISSN 2190-5444. DOI: 10.1140/epjp/s13360-024-05255-3 ; SCOPUS: 2-s2.0-85194585920.
- 5 JIE G. - HAO Z. - HUADONG Y. High-precision Elevation Sensor Based on Atmospheric Pressure. In *Sensors and Materials*. Vol. 35, iss. 12 (2023), s. 3985-3996. ISSN 9144935. DOI: 10.18494/SAM4575 ; SCOPUS: 2-s2.0-85181056167.
- 6 KLARÁK J. - KLAČKOVÁ I. - ANDOK R. - HRICKO J. - BULEJ V. - TSAI H.-Y. Autoencoders Based on 2D Convolution Implemented for Reconstruction Point Clouds from Line Laser Sensors. In *Sensors*. Vol. 23, iss. 10 (2023), Art. No. 4772. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s23104772 ; SCOPUS: 2-s2.0-85160440229.
- 7 TIWARI B. - GHORBANI M. - CISIER D. - PERRIARD Y. Towards Development of a Novel Variable Stiffness Instrumented Gripper. In *2023 11th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, ICCMA 2023*. s. 392-396. ISBN 979-835031568-4. DOI: 10.1109/ICCMA59762.2023.10374678 ; SCOPUS:2-s2.0-85183586046.
- 8 GUPTA A. - PARK D. - BASHAR S. - GIRERD C. - BHAT N. - MUNDHRA S. - MORIMOTO T.K. - BHARADIA D. ForceSticker: Wireless, Batteryless, Thin & Flexible Force Sensors. In *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. Vol. 7, iss. 1 (2023), Art. No. 13. ISSN 2474-9567. DOI: 10.1145/3580793 ; SCOPUS:2-s2.0-85152478095.