SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Ferdinand Vavrík

Autoreferát dizertačnej práce

Anténne fázové systémy

na získanie akademického titulu "philosophiae doctor", "PhD."

v doktorandskom študijnom programe:5.2.10 Teoretická elektrotechnika

Bratislava, 2019

Dizertačná práca bola vypracovaná v **dennej forme doktorandského štúdia** na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ:	Ing. Ferdinand Vavrík Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav Elektrotechniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Školiteľ:	prof. Ing. Peter Ballo, PhD. Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav jadrového a fyzikálneho inžinierstva Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Oponenti:	doc. Ing. Ladislav Harmatha, PhD. Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroniky a fotoniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava Ing. Alica Rosová, CSc.

Slovenská akadémia vied Elektrotechnický ústav Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod.

Na

Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská technická univerzita v Bratislave Ilkovičova 3, miestnosť:

> Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec Dekan fakulty STU v Bratislave, FEI Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

ANOTÁCIA
ANNOTATION
ÚVOD
1. Ciele Dizertačnej práce
2. Elektromagnetické pole v okolí antény 7
3. Anténne sústavy
3.1. Impedancia antény v anténnej sústave10
4. Anténne fázové systémy
4.1. Druhy anténnych fázových systémov12
4.2. Elektromagnetické pole v okolí anténnych fázových systémov
4.2.1. Matematický model pre simulácie14
4.2.2. Faktory ovplyvňujúce vyžarovaciu charakteristiku anténnych fázových systémov
4.2.3. Mechanizmus fázového riadenia17
4.3. Aplikácie anténnych fázových systémov19
5. Návrh anténneho fázového systému 21
5.1. Technická realizácia 4-kanálového generátora
6. Vzájomné ovplyvňovanie antén v lineárnych a kruhových anténnych sústavách 24
7. Hľadanie vhodnej konfigurácie antén a fáz
7.1. Lineárne anténne fázové systémy
7.2. Kruhové anténne fázové systémy
8. Experimentálne meranie fokusácie EM poľa
8.1. Lineárne anténne fázové systémy
8.1. Kruhové anténne fázové systémy
ZÁVER
Zoznam publikačnej činnosti autora
Použitá literatúra

ANOTÁCIA

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ústav Elektrotechniky

Študijný program:Teoretická ElektrotechnikaAutor:Ing. Ferdinand VavríkNázov dizertačnej práce:Anténne fázové systémyŠkoliteľ:prof. Ing. Peter Ballo, PhD.Rok odovzdania:2019

Dizertačná práca uvádza do problematiky anténnych fázových systémov. Po teoretickej stránke poskytuje ucelený pohľad na procesy prebiehajúce v rámci anténnych fázových systémov, ako je vzájomné ovplyvňovanie antén v systéme, schopnosť fokusácie a riadenia smeru vyžarovania elektromagnetickej energie. Práca sa primárne zameriava na anténne fázové systémy, v ktorých sa hodnota rozpätia medzi anténami pohybuje v rozsahu blízkeho reaktívneho elektromagnetického poľa. Za týmto účelom taktiež vysvetľuje rozloženie elektromagnetického poľa v okolí antény. V práci sú uvedené dva typy meraní, vykonaných v bezodrazovej komore. Prvý typ merania je meranie vplyvu vzájomného ovplyvňovania antén v anténnom systéme na koeficient odrazu antény. Týmto meraním sa preukázalo, že vzájomné ovplyvňovanie je najväčšie v rámci blízkeho reaktívneho elektromagnetického poľa. Druhým typom meraní bolo meranie vyžarovacej charakteristiky lineárnych a kruhových anténnych fázových systémov, kde sa ukázala dobrá zhoda medzi simulovanými a meranými dátami. Taktiež sa preukázala možnosť fokusácie a riadenia smeru vyžarovania elektromagnetickej energie anténnym fázovým systémom s rozpätím medzi anténami okolo stotiny vlnovej dĺžky.

kľúčové slová: Elektromagnetické pole v okolí antény, anténne fázové systémy, anténne sústavy, vzájomná impedancia.

ANNOTATION

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY BRATISLAVA Faculty of Electrical Engineering and Information Technology

Institute of Electrical Engineering

Curriculum: Author: Title of the dissertation thesis: Supervisor: Year of the submission:

Curriculum:Theoretical Electrical EngineeringAuthor:Ing. Ferdinand Vavríktation thesis:Phased array antennasSupervisor:prof. Dr. Peter Ballosubmission:2019

Dissertation thesis discusses phased array antennas, processes inside of them, such as influence of mutual impedance on single antenna reflection coefficient, focusation and also direction managing of radiated electromagnetic energy. Distance between antennas in the range of reactive near field region is the main interest of this thesis. Two basic types of experiments have been made in anechoic chamber. First type of experiment has been focused to mutual impedance impact on single antenna reflection coefficient. This experiment has shown the biggest impact of mutual impedance is in the range of reactive near field region. Second type of experiment has been focused to measurement of circular and linear phased array antennas radiation patterns. The result has shown the possibility of electromagnetic field focusation by phased array antennas with antenna spacing around 0.01 multiple of wavelength and also possibility of direction managing of radiated electromagnetic energy.

Keywords: Electromagnetic field around antenna, antenna arrays, phased array antennas, mutual impedance

ÚVOD

Anténne fázové systémy sú predmetom neustáleho zdokonaľovania a nachádzania ich uplatnenia v rôznych oblastiach. V dizertačnej práci sa venujem anténnym fázovým systémom, v ktorých rozpätie medzi anténami je hlboko pod vlnovou dĺžkou vysielaných elektromagnetických vĺn. Konkrétne ide o oblasť blízkeho reaktívneho elektromagnetického poľa. V teoretickej časti práca uvádza delenie elektromagnetického poľa na jednotlivé časti v okolí antény. Vysvetľuje, aký je rozdiel medzi anténnou sústavou a anténnym fázovým systémom. Pre lepšie pochopenie, ako vplývajú antény anténneho fázového systému na jednu anténu v systéme, je vysvetlená impedancia antény v prípade, že je v priestore sama a taktiež keď je súčasťou anténnej sústavy. V práci nechýba ani krátky pohľad do histórie vývoja anténnych fázových systémov ako aj ich rozdelenie na rôzne typy. V závere teoretickej časti tejto práce je opis elektromagnetického poľa v okolí anténneho fázového systému, ako aj matematický model použitý na simulácie vyžarovacích charakteristík anténnych fázových systémov. Oblasti použitia anténnych fázových systémov sú taktiež obsiahnuté v teoretickej časti.

Praktická časť práce pozostáva zo štyroch hlavných bodov. Prvým je návrh a technická realizácia štvorkanálového generátora, ktorý som použil pri experimentálnom meraní fokusácie elektromagnetického poľa pomocou mnou navrhnutých a zrealizovaných anténnych fázových systémov. Druhým bodom je experimentálne meranie vzájomného vplývania antén systému ako vplyvu na koeficient odrazu danej antény. Tretím bodom je simulačné vyšetrenie vplyvu parametrov anténnych fázových systémov, ako je počet antén v systéme, rozpätie medzi anténami a distribúcia fáz na jednotlivých anténach. Pričom je ukázaný rozdiel medzi lineárnymi a kruhovými anténnymi fázovými systémami. Štvrtým a zároveň aj záverečným bodom praktickej časti práce je porovnanie simulovaných dát s experimentálnymi dátami. Tie boli získané meraním vyžarovacích charakteristík lineárnych ako aj kruhových anténnych fázových systémov v bezodrazovej komore.

1. Ciele Dizertačnej práce

- 1. Vytvoriť matematický model fázovej anténnej sústavy, založený na Huygensovom-Fresnelovom princípe.
- 2. Navrhnúť technickú realizáciu fázovej anténnej sústavy pre vytvorený matematický model, pri dodržaní nasledovných podmienok:
 - a. Poloha jednotlivých antén fázovej sústavy sa bude nachádzať v reaktívnej časti blízkeho poľa.
 - b. Nájsť vhodné rozloženie fáz signálov privádzaných na jednotlivé antény, pomocou ktorého sa zabezpečí fokusácia vyžarovacej charakteristiky danej anténnej fázovej sústavy.
 - c. Anténny fázový systém bude schopný demonštrovať zmenu smeru vyžarovania, bez zmeny polôh a orientácie jednotlivých antén.
- 3. Zhotoviť navrhnutú technickú realizáciu fázovej anténnej sústavy.
- 4. Kvalitatívne zmerať vyžarovaciu charakteristiku zhotovenej anténnej fázovej sústavy a porovnať ju s vyžarovacou charakteristikou vypočítanou pomocou navrhnutého matematického modelu.

2. Elektromagnetické pole v okolí antény

Anténa je dôležitým prvkom bezdrôtového systému prenosu informácií. Okolo antény je počas vysielania elektromagnetické pole, ktoré má rôzne vlastnosti v závislosti na vzdialenosti od antény. Vzhľadom na to sa elektromagnetické ("EM") pole v smere od antény rozdeľuje na reaktívne blízke EM pole, žiarivé blízke EM pole a vzdialené EM pole. Vyžarovacia charakteristika antény má rôzne tvary pre rôzne časti EM poľa, čo zobrazuje obrázok 1, kde "D" zodpovedá najväčšiemu rozmeru antény [1].



Obr. 1: Časti EM poľa v okolí antény s vyznačenými hranicami.

Za predpokladu, že anténa je dipólového tvaru s orientáciou tak, ako je zobrazené na obrázku 2, rovnice 1a, 1b a 2a až 2c vyjadrujú výpočet zložiek intenzít magnetického poľa H a intenzít elektrického poľa E pre sférickú súradnú sústavu. Tieto rovnice majú platnosť pre všetky časti EM poľa v okolí antény. Avšak pri výpočtoch v rámci jednotlivých častí EM poľa je možné dané rovnice zjednodušiť. Kľúč k zjednodušeniu je zobrazený na obrázku 3, ktorý zobrazuje váhu jednotlivých členov v hranatých zátvorkách rovníc 1a až 2c v závislosti na vzdialenosti od antény. Hraničná hodnota r = $\lambda/2\pi$, zobrazená na obrázku 3, zodpovedá násobku kr = 1 [1].



Obr. 2: Orientácia dipólu v priestore s jednotlivými zložkami elektrickej intenzity E.

$$H_r = H_\Theta = 0 \tag{1a}$$

$$H_{\Phi} = j \frac{k I_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr}$$
(1b)

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos(\Theta)}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr}$$
(2a)

$$E_{\Theta} = j\eta \frac{kI_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr}$$
(2b)

$$E_{\Phi} = 0 \tag{2c}$$



Obr. 3: Priebeh hodnôt členov v rovniciach 1a, 1b a 2a až 2c [1]

Táto hodnota je hranicou, rozdeľujúcou EM pole v okolí antény podľa povahy energie. Pod touto hranicou prevláda reaktívna (imaginárna) energia nad žiarivou (reálnou) energiou. Nad touto hranicou je to naopak. Vzhľadom na obrázok 3, pre zložku intenzity H v reaktívnom blízkom EM poli prevláda člen 1/kr, zatiaľ čo v ostatných častiach člen s hodnotou 1. Pre intenzitu E v blízkom reaktívnom EM poli prevláda člen $1/(kr)^2$ pre zložku E_{Θ} a 1/kr pre zložku E_r . Člen s hodnotou 1 začína prevládať od blízkeho žiarivého EM poľa u oboch zložiek E_{Θ} a E_r . Vo vzdialenom EM poli ostane len zložka E_{Θ} , nakoľko zložka E_r zanikne skôr kvôli členu r² v menovateli. V tabuľke 1 sú uvedené zjednodušenia rovníc 1a až 2c berúce do úvahy vyššie zmienené podmienky [1].

Reaktívne blízke EM pole kr<<1	Blízke žiarivé EM pole kr>1	Vzdialené EM pole kr>>1
$H_r = H_\Theta = 0$	$H_r = H_\Theta = 0$	$H_r = H_\Theta = 0$
$H_{\Phi} \simeq \frac{I_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r^2} e^{-jkr}$	$H_{\Phi} = j \frac{k I_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} e^{-jkr}$	$H_{\Phi} \simeq j \frac{k I_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} e^{-jkr}$
$E_r \simeq -j\eta \frac{I_0 l \cos(\Theta)}{2\pi k r^3} e^{-jkr}$	$E_r \simeq \eta \frac{I_0 l \cos(\Theta)}{2\pi r^2} e^{-jkr}$	$E_r \simeq 0$
$E_{\Theta} \simeq -j\eta \frac{I_0 l \sin(\Theta)}{4\pi k r^3} e^{-jkr}$	$E_{\Theta} \simeq j\eta \frac{kI_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} e^{-jkr}$	$E_{\Theta} \simeq j\eta \frac{kI_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} e^{-jkr}$
$E_{\Phi} = 0$	$E_{\Phi}=0$	$E_{\Phi}=0$

Tabuľka 1: Zjednodušené rovnice 1a až 2c pre konkrétne časti EM poľa v okolí antény.

3. Anténne sústavy

Anténne sústavy sú zoskupenia viacerých antén. Pri správnom priestorovom rozmiestnení na seba pôsobia tak, že zlepšujú výsledné vyžarovacie vlastnosti. Rozdeľujeme ich do troch kategórii podľa geometrického rozmiestnenia antén, smeru vyžarovania a napájania jednotlivých antén. Podľa rozmiestnenia antén ich rozdeľujeme na lineárne sústavy (paralelné alebo kolineárne), planárne sústavy, kruhové sústavy (planárne alebo prstencovité) a na rôzno-tvaré (konformálne) sústavy [1 - 4]. Toto delenie je zobrazené na obrázku 4.



Obr. 4: Druhy anténnych sústav podľa geometrického rozmiestnenia antén.

Podľa smeru vyžarovania anténne sústavy delíme na broadside a end-fire. Pri broadside sústava vyžaruje v smere kolmom na anténnu sústavu. Pri end-fire vyžaruje v smere spojnice, spájajúcej všetky antény sústavy [1]. Toto rozdelenie je na obrázku 5.



Obr. 5: Druhy anténnych sústav podľa smeru vyžarovania.

Podľa napájania anténne sústavy delíme na anténne fázové systémy, parazitické sústavy a pasívne sústavy. Pri anténnych fázových systémoch sú všetky vstupy antén fázovo riaditeľné. Parazitické majú aj aktívne a aj pasívne antény (napr. Yagi-Uda anténa). Pasívne sústavy majú len prijímacie antény [1-3].

3.1. Impedancia antény v anténnej sústave

V anténnej sústave dochádza k interagovaniu medzi jednotlivými anténami, čím vzniká vzájomná väzba a vzájomné ovplyvňovanie, ktoré pôsobia na impedanciu daných antén. Impedancia antény v sústave môže byť pasívna alebo aktívna. Pasívna impedancia je vtedy, ak ostatné antény sú pasívnymi, zakončenými impedanciou zodpovedajúcou impedancii generátora (50 Ω). Pri aktívnej impedancii ostatné antény sústavy sú aktívnymi, vyžarujúcimi EM vlny. Vo väčšine prípadov je pasívna a aktívna impedancia prakticky totožná. Je to z dôvodu totožnosti prostredia vzájomného ovplyvňovania, ako aj totožnosťou impedančného zakončenia s impedanciami generátorov [1, 2].

Impedancia antény v anténnej sústave závisí od vstupnej impedancie antény a vzájomnej impedancie medzi danou anténou a inými anténami, prípadne prekážkami. Vzájomná impedancia je výsledkom vzájomnej väzby, na ktorú priamo vplývajú jednotlivé antény sústavy a nepriamo blízke objekty a prekážky, prípadne napájacia sieť [1,2]. Obrázok 6 zobrazuje jednotlivé prvky vystupujúce vo vzájomnej väzbe.



Obr. 6: Prvky zúčastňujúce sa na vzájomnej impedancii

Sú dva mechanizmy vzájomnej väzby a to vzájomná väzba v aktívnom móde a vzájomná väzba v pasívnom móde. V aktívnom móde anténa 1 vyžaruje EM vlny smerom do priestoru a taktiež smerom k anténe 2. Časť energie EM vlny vyžiarenej smerom k anténe 2 sa od nej znovu rozptýli do priestoru a časť sa pohltí a smeruje k zdroju napájajúceho anténu 2. Časť odrazenej energie od antény 2 smeruje naspäť k anténe l, pričom táto časť energie sa tiež rozdelí na tú časť, ktorá sa odrazí a ktorá prejde anténou a smeruje k jej zdroju. Takto sa energia delí a odráža medzi anténami donekonečna. V pasívnom móde antény anténnej sústavy nevyžarujú EM pole, len ho prijímajú. Energia prichádzajúcej elektromagnetickej vlny sa pri dopade na anténu 1 rozdelí na tri časti. Prvá časť sa odrazí do priestoru, druhá časť sa dostane cez anténu 1 do jej prijímača a tretia časť sa odrazí smerom k anténe 2. Takýmto spôsobom na seba pôsobia antény, pričom prijatá elektromagnetická energia anténou 2 je daná súčtom prichádzajúcej elektromagnetickej vlny z priestoru a odrazenej elektromagnetickej vlny od antény 1 [1, 5]. Tieto mechanizmy sú zobrazené na obrázku 7.



Obr. 7: Základné mechanizmy vzájomnej väzby [1].

Vzájomná väzba je nechceným efektom, pretože komplikuje návrh antén, ich analýzu, pôsobí na vyžarovací diagram celej anténnej sústavy a taktiež na celkovú výkonnosť anténnej sústavy [1, 5]. Vzájomná väzba medzi jednotlivými anténami je závislá na konštrukčných parametroch ako je počet a typ jednotlivých antén, rozpätie medzi anténami, orientácia antén v priestore, vyžarovací diagram jednotlivých antén, skenovací uhol anténnej sústavy, šírka pásma, tvar anténnej sústavy, smer prichádzajúcej EM vlny a taktiež komponenty napájacej siete [6]. Konštrukčné parametre vplývajú na celkovú výkonnosť anténnej sústavy tak, že menia vstupnú impedanciu jednotlivým anténam, tým aj im zodpovedajúci koeficient odrazu a aj vyžarovací diagram celej anténnej sústavy [1]. Na obrázku 8 je zobrazený vplyv zmeny rozpätia d medzi anténami (zobrazenými vedľa grafu) na frekvenčnú závislosť koeficientu odrazu S₁₁. Zmenšenie rozpätia d posunie celú krivku smerom k nižším frekvenciám.



Obr. 8: Vplyv rozpätia d medzi anténami na frekvenčnú závislosť koeficientu odrazu [7].

Na obrázku 9 je zobrazená osem prvková anténna sústava mikropásikových patch (peč) antén spolu s vyžarovacími diagramami prvej, piatej a ôsmej antény. Tieto diagramy boli merané tak, že vždy len meraná anténa bola aktívna a ostatné boli zakončené impedanciami zodpovedajúcimi vnútornej impedancii generátora. Vyžarovacie diagramy druhej až siedmej antény sú takmer totožné s vyžarovacím diagramom piatej antény, avšak s tým rozdielom, že vyžarovacie diagramy sú si navzájom zrkadlovým obrazom s osovou súmernosťou nachádzajúcou sa medzi štvrtou a piatou anténou. Prvá a ôsma anténa sú hraničnými anténami, pričom ich

vyžarovacie diagramy sú najviac deformované. Najväčšia deformácia vyžarovacích diagramov je na stranách smerom preč od anténnej sústavy, čo je spôsobené nesymetrickosťou a hraničnými efektmi konečnej zemniacej plochy antény [2].



Obr. 9: Vplyv vzájomnej väzby na vyžarovací diagram anténnej sústavy [2].

4. Anténne fázové systémy

Anténne fázové systémy sú anténne sústavy s rovnomerným napájaním antén s možnosťou riadenia fáz alebo inak povedané časových oneskorení signálov privádzaných do jednotlivých antén. Hlavný dôvod použitia anténnych fázových systémov je vytvorenie smerového lúča, ktorého smer je možné elektronicky ovládať bez nutnosti zmeny polohy antén v anténnom fázovom systéme [2, 3].

4.1. Druhy anténnych fázových systémov

Anténne fázové systémy môžeme rozdeliť do dvoch hlavných kategórií. Prvá kategória je daná formou prevedenia napájacej siete, druhá je daná formou prevedenia fázového posúvania. Napájanie antén môže byť riešené paralelne, sériovo, prípadne ich kombináciou a to sério-paralelne. Antény môžu byť napájané aj priestorovo, kde antény sú priamo osvecované vyžarovaním zo samostatne napájanej antény. Na obrázku 10 sú znázornené dva typy priestorového napájania anténneho fázového systému.



Obr. 10: Priestorovo napájané anténne fázové systémy [3].

Fázové posúvanie môže byť realizované posúvaním signálov vo všetkých vetvách zmiešavačov vo funkcii analógovej násobičky RF signálov, a to konkrétne vo vysokofrekvenčných signálových cestách, v medzifrekvenčných signálových cestách, v signálových cestách vedúcich od lokálneho oscilátora alebo môže byť riešené digitálne pomocou DDS technológie (direct digital synthezis) [2, 3, 8].

4.2. Elektromagnetické pole v okolí anténnych fázových systémov

V tejto kapitole bude opisované vzdialené elektromagnetické pole v okolí anténneho fázového systému pozostávajúceho z dipólov s rovnakým rozostúpením, pričom napájacie prúdy majú rovnaké amplitúdy a fázy napájacích prúdov sú lineárne narastajúce. Orientácia v priestore je zobrazená na obrázku 11.



Obr. 11: 3D aj 2D orientácia anténneho fázového systému v priestore.

Vo vzdialenom poli je prítomná len zložka E_{θ} intenzity elektrického poľa, ktorá sa dá pomocou smerovej funkcie dipólu $F(\theta)$ upraviť nasledovne.

$$E_{\Theta} \simeq j\eta \frac{kI_0 l \sin(\Theta)}{4\pi r} e^{-jkr} \simeq j\eta \frac{I_0}{2\pi r} F(\Theta) e^{-jkr} \qquad F(\Theta) = \frac{\pi}{\lambda} l \sin(\Theta)$$
(3)

Rozpätie d medzi jednotlivými dipólmi má tiež vplyv na fázy jednotlivých prúdov. Rovnica 4 matematicky opisuje polohové fázovanie PF jednotlivých prúdov [2].

$$PF = I_0 + I_1 e^{jkd \cos(\Phi)} + I_2 e^{jk2d \cos(\Phi)} + \dots = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jknd \cos(\Phi)}$$
(4)

Príspevky jednotlivých dipólov vrátane polohového fázovania PF a fázového posunu α , kde $E_{\theta n}$ je všeobecná rovnica príspevku dipólu v anténnom fázovom systéme sú vyjadrené nasledovne [2].

$$E_{\Theta 0} \tilde{-} j\eta \frac{I}{2\pi r} F(\Theta) e^{-jkr} \qquad \qquad E_{\Theta 1} \tilde{-} j\eta \frac{I}{2\pi r} F(\Theta) e^{-jkr} e^{j(kd\cos(\Phi) + \alpha)}$$
(5a,b)

$$E_{\Theta 2} \simeq j\eta \frac{I}{2\pi r} F(\Theta) e^{-jkr} e^{j2(kd\cos(\Phi) + \alpha)} E_{\Theta n} \simeq j\eta \frac{I}{2\pi r} F(\Theta) e^{-jkr} e^{jn(kd\cos(\Phi) + \alpha)}$$
(5c,d)

Výsledná intenzita elektrického poľa E od anténneho fázového systému v bode pozorovania je nasledovná:

$$E_{\Theta} = \sum_{n=0}^{N-1} E_{\Theta n} = j\eta \frac{I}{2\pi r} F(\Theta) e^{-jkr} \left[1 + e^{j(kd\cos(\Phi) + \alpha)} + e^{j2(kd\cos(\Phi) + \alpha)} + \cdots + e^{jn(kd\cos(\Phi) + \alpha)} \right]$$
(6)

Výraz v hranatej zátvorke rovnice 6 je smerovou funkciou anténneho fázového systému (faktor poľa), ktorého tvar je nasledovný [1].

$$FP = \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn \, (kd \, \cos{(\Phi)} + \alpha)} \tag{7}$$

Pomocou rovnice 7 môžeme rovnicu 6 prepísať do nasledovného tvaru.

$$E_{\Theta} = \sum_{n=0}^{N-1} E_{\Theta n} = j\eta \frac{I}{2\pi r} F(\Theta) \cdot FP(n, \Phi) e^{-jkr}$$
(8)

Ako je vidno z rovnice 8, celkový vyžarovací diagram fázového anténneho systému je daný ako násobok smerovej funkcie antény a faktoru poľa. Toto násobenie je znázornené na obrázku 12.



Obr. 12: Grafické znázornenie násobenia smerovej funkcie a faktora poľa [1].

4.2.1. Matematický model pre simulácie

Podstatu matematického modelu použitého pri výpočtoch vyžarovacích charakteristík tvorí Huygensov-Fresnelov princíp. Tento princíp charakterizuje šírenie elektromagnetických vĺn v priestore. Každá vlnoplocha šíriacej vlny môže byť nahradená plochou pokrytou sekundárnymi zdrojmi guľových vĺn. Pričom každý bod vlnoplochy je daný superpozíciou vĺn sekundárnych zdrojov guľových vĺn z predchádzajúcej vlnoplochy [9]. Graficky je tento princíp zobrazený na obrázku 13.



$$E(b) = \int_{S} \frac{A_A e^{-jkr}}{r} dS \tag{9}$$

$$E(b) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{S_n} \frac{A_{An} e^{-j(kr_n + \alpha_n)}}{r_n} dS \qquad (10)$$

Obr. 13: Huygens-Fresnelov princíp šírenia elektromagnetických vĺn.

Matematicky je Huygensov-Fresnelov princíp vyjadrený rovnicou 9 [10]. Rovnica 10 je aplikáciou rovnice 9 na anténny fázový systém pozostávajúci z N počtu antén. S_n je plocha antény obsadená zdrojmi guľových vĺn, A_{An} je amplitúda sekundárneho zdroja guľovej vlny patriaceho n-tej anténe, r_n je vzdialenosť sekundárneho zdroja od bodu b a α_n je fáza zodpovedajúca n-tej anténe.

Tento matematický model je svojou podstatou totožný s výpočtami uvedenými v kapitole "4.2. Elektromagnetické pole v okolí anténnych fázových systémov". Rozdiel spočíva len v spôsobe výpočtu, kde tento matematický model je numerickým výpočtom získaným skladaním príspevkov jednotlivých sekundárnych zdrojov EM guľových vĺn. Naproti tomu v kapitole 4.2. išlo o analytické odvodenie.

Presnosť tohto matematického modelu som experimentálne overil už počas vypracovávania mojej bakalárskej práce. Konkrétne išlo o difrakciu svetla na apertúrach.

4.2.2. Faktory ovplyvňujúce vyžarovaciu charakteristiku anténnych fázových systémov

V anténnej sústave pozostávajúcej z identických antén je najmenej päť faktorov ovplyvňujúcich vyžarovaciu charakteristiku antény. Týmito faktormi sú geometrické rozmiestnenie jednotlivých antén, rozpätie medzi anténami, amplitúda vyžarovanej vlny, fáza vyžarovanej vlny a vyžarovacia charakteristika jednotlivých antén [1].

V tejto kapitole bude prezentovaný vplyv polohy a rozpätia medzi jednotlivými anténami v planárnom anténnom fázovom systéme, pozostávajúceho z 21 dipólov v horizontálnej rovine a 11 dipólov vo vertikálnej rovine. Orientácia v priestore je zobrazená na obrázku 14.

Šírka vyžarovacieho zväzku v horizontálnom smere sa s narastajúcim počtom antén zmenšuje. To isté platí aj v prípade narastajúceho rozpätia medzi anténami. Tieto tvrdenia sú podporené dátami zo simulácií zobrazenými na obrázku 15.



Obr. 14: Rozmiestnenie dipólov v priestore (h je horizontálne rozpätie a v je vertikálne rozpätie medzi dipólmi).



Obr. 15: Závislosti šírky zväzku od počtu antén a rozpätia h v horizontálnom rade [11].

Hodnota rozpätia h rovnajúca sa vlnovej dĺžke je hraničná. Dosiahnutím tejto hodnoty začínajú nechcené efekty. Pri celočíselnom násobku vlnovej dĺžky vznikajú postranné zväzky rovnobežné z osou x. Tieto postranné zväzky sa so zväčšujúcim rozpätím rozdelia a postupujú smerom k hlavnému zväzku vyžarujúcemu v smere osi y [11]. Mechanizmus nechcených efektov pri zmene horizontálneho rozpätia h medzi anténami je zobrazený na obrázku 16.



Obr. 16: Vyžarovacie charakteristiky anténneho fázového systému s rozdielnym horizontálnym rozpätím h medzi anténami [11].

Šírka zväzku vo vertikálnom smere vykazuje taktiež zmenšovanie s narastajúcim počtom dipólov a rozpätím medzi nimi [11]. Dáta zo simulácií, podporujúce toto tvrdenie sú graficky zobrazené na obrázku 17.



Obr. 17: Závislosti šírky zväzku od počtu antén a rozpätia v vo vertikálnom rade [11].

Pri vertikálnom rozpätí v je polovica vlnovej dĺžky hraničnou hodnotou, pri ktorej vznikajú postranné zväzky v smere osi z. Postranné zväzky vzniknú pri nepárnom násobku polovice vlnovej dĺžky (n·($\lambda/2$), n = 1, 3, 5, ...). S narastajúcim rozpätím v sa tieto zväzky taktiež rozdelia a pohnú sa smerom k hlavnému vyžarovaciemu zväzku [11]. Mechanizmus nechcených efektov pri zmene vertikálneho rozpätia v medzi anténami je zobrazený na obrázku 18.



Obr. 18: Vyžarovacie charakteristiky anténneho fázového systému s rozdielnym vertikálnym rozpätím v medzi anténami [11].

Na obrázku 19 je zobrazený prípad, keď horizontálne rozpätie h aj vertikálne rozpätie v majú hodnotu väčšiu ako sú ich hraničné hodnoty.

h = 3λ v = $2,5\lambda$

Obr. 19: Vyžarovacia charakteristika v prípade prekročenia hraničných hodnôt rozpätí h a v [11].

4.2.3. Mechanizmus fázového riadenia

V tejto časti bude prezentované fázové riadenie rovnakého anténneho fázového systému ako v predchádzajúcej kapitole. Rozmiestnenie antén v priestore je zobrazené na obrázku 14. Rozpätie medzi anténami je $\lambda/4$. Pri lineárnych fázových anténnych systémov platí, že lineárne narastajúca fáza prúdov na anténach smerom od jedného kraja po druhý kraj systému, spôsobí natočenie vyžarovacej charakteristiky. Pričom toto platí ako pri paralelnom usporiadaní antén, tak aj pri kolineárnom usporiadaní. Na obrázku 20 je zobrazený mechanizmus vychyľovania vyžarovacej charakteristiky v horizontálnej rovine. Fázy na anténach v danom rade sú rozdistribuované s lineárnym nárastom

od jedného kraja po druhý kraj, pričom parameter α vyjadruje fázu poslednej antény v rade. Pri hodnote $\alpha = 0$ anténny fázový systém vyžaruje ako broadside, čo je jeho prirodzená fokusácia pri danom rozpätí medzi anténami. Avšak pri hodnote $\alpha = 11\pi$ už vyžaruje ako end-fire. Zmena z broadside vyžarovania na end-fire nastáva vtedy, keď fázový rozdiel medzi krajnými anténami sa rovná násobku π , ktorý zodpovedá počtu antén od stredu daného radu po jeho kraj, vrátane strednej antény [11]. Ďalším zvyšovaním parametra α sa zmení smer end-fire vyžarovania z jednej strany na druhú a následne sa tento zväzok rozdelí a opätovne sa dosiahne stav ako v prípade parametru α rovnému 0π .



Obr. 20: Fázové riadenie natočenia vyžarovacej charakteristiky v horizontálnej rovine. Parameter α je rozdiel fáz medzi krajnými anténami.



Obr. 21: Fázové riadenie natočenia vyžarovacej charakteristiky vo vertikálnej rovine. Parameter α je rozdiel fáz medzi krajnými anténami.

Na obrázku 21 je mechanizmus vychyľovania vyžarovacej charakteristiky vo vertikálnej rovine. Distribúcia fáz na anténach a parameter α majú rovnakú podstatu ako pri vychyľovaní vyžarovacej charakteristiky v horizontálnej rovine. Pri vychyľovaní

vo vertikálnej rovine vzniká nechcený efekt. Týmto efektom je vznik postranného zväzku v smere osi z, ktorý je zobrazený na obrázku 21 pri $\alpha = 5\pi$. Vzniknutý zväzok sa následne rozdelí a vytvorí nové zväzky ($\alpha = 8\pi$). Pôvodné zväzky smerujúce smerom hore sa zväčšovaním hodnoty parametra α spoja a vytvoria jeden zväzok smerujúci hore ($\alpha = 17\pi$). Zväzok smerujúci hore zmizne s ďalším zväčšovaním hodnoty parametra α a ostaný len spodné zväzky, ktoré nahradia tie pôvodné. Tento proces je cyklický [11].

4.3. Aplikácie anténnych fázových systémov

Anténne fázové systémy si vďaka svojim vlastnostiam našli uplatnenie vo všetkých oblastiach bezdrôtových technológií. Či už ide o armádne využitie alebo civilné ich prínos je veľký. V armáde sa využívajú najmä ako radary, či už je to v letectve, protivzdušnej obrane alebo námorných ozbrojených silách [12]. Príklady využitia fázových anténnych systémov ako radarov v armáde, sú zobrazené na obrázku 22.



Obr. 22: Príklady využitia fázových anténnych systémov v armádnom sektore. a) radar stíhacieho lietadla; b) radar protivzdušnej obrany; c) morský radar SBX-1 systému skorého varovania; d) pozemný stacionárny radar.

V civilnej sfére si anténne fázové systémy našli uplatnenie v každej oblasti, ktorá vyžaduje či už komunikáciu, alebo monitoring nejakej oblasti. V oblasti pozemskej mobilnej komunikácie základňové stanice mobilnej bunkovej siete využívajú vlastnosti fázových anténnych systémov pre fokusáciu EM vĺn, čím znižujú interferenciu z vedľajších buniek systému [13]. V oblasti satelitnej komunikácie sa anténne fázové systémy využívajú nielen na satelitoch nízkej obežnej dráhy, ale aj na satelitoch umiestnených na geostacionárnych dráhach [14 – 16].

V medicíne sa anténne fázové systémy používajú na mikrovlnnú hypertermiu, pri liečení rakoviny. Podstatou mikrovlnnej hypertemie je fokusácia mikrovlnného žiarenia na rakovinové tkanivá, ktorých zahrievanie nastane formou joulových strát. Hypertermia pôsobí buď proti malígnym nádorom, alebo zvyšuje účinnosti dostupných protirakovinových terapií [17].

Automobilový sektor našiel uplatnenie pre anténne fázové systémy ako radarový systém zvyšujúci bezpečnosť cestnej premávky a zlepšenie vlastností autonómnych vozidiel. Pokročilé asistenčné systémy vodiča, označované ako ADAS – advanced driver assistant systems, pozostávajú z krátko-dosahových (parkovací asistent a precrash systém), stredno-dosahových (monitorovanie mŕtveho bodu a vozidiel križujúcich dráhu vozidla) a ďaleko-dosahových systémov (adaptívny tempomat) [18 - 20].

Osobitnou oblasťou, ktorá sa v dnešnej dobe stále viac rozvíja je bezdrôtový prenos energie. Tento prenos môže byť realizovaný troma spôsobmi a to prenos pomocou rádiových vĺn, rezonančnej väzby, prípadne indukčnej väzby. Pri indukčnej väzbe je vysielačom cievka, pričom tento spôsob prenosu je vhodný na krátke vzdialenosti. Pri rezonančnej väzbe je vysielačom rezonátor a tento spôsob prenosu je vhodný na stredné vzdialenosti. Pri prenose pomocou rádiových vĺn je vysielačom anténa a tento spôsob prenosu môže byť využívaný od najkratších po veľmi dlhé vzdialenosti [21, 22]. Pričom práve v tomto spôsobe prenosu energie si našli anténne fázové systémy uplatnenie.

Prvým uskutočneným bezdrôtovým prenosom energie bol pokus Nikola Teslu v Colorado Springs v roku 1899 [23]. Avšak väčší záujem o bezdrôtový prenos energie nastal v 60-tych rokoch 20. storočia. V tomto období nastal značný rozvoj technológií vylepšujúcich celkovú efektivitu prenosu energie. Celkový reťazec bezdrôtového prenosu energie pozostáva z prevedenia energie do požadovaného frekvenčného pásma, v ktorom sa bude energia prenášať priestorom. Na prijímacej strane sa pomocou rekteny (rektifikačnej antény) prijatá vysokofrekvenčná energia transformuje na jednosmerný prúd. Celková efektivita sa označuje aj ako celková efektivita prenosu z DC na DC. Táto celková efektivita bola v roku 1963 na úrovni 13%. Vývojom technológií sa celková efektivita dostala na úroveň 54% v roku 1975. Na celkovej efektivite sa taktiež podieľa aj efektivita konverzie rekteny z vysokofrekvenčnej energie na jednosmernú. Táto efektivita bola v roku 1964 55%-ná a v roku 1976 už dosahovala 91% [24]. Čo sa týka množstva prenesenej energie na veľké vzdialenosti, tak v roku 1975 pomocou mikrovĺn dokázali na vzdialenosť 1,6 km preniesť 30 kW jednosmerného prúdu. Avšak energia mikrovĺn z klystrónu vysielača bola 450 kW. V roku 2008 prebehol experiment, počas ktorého pomocou fázových anténnych systémov preniesli 20 W mikrovlnnej energie na vzdialenosť 150 km [22, 25].

V roku 1968 bol prvýkrát navrhnutý koncept solárnych satelitov. Tieto satelity by obiehali po geostacionárnej dráhe. kde solárnych by pomocou panelov o veľkosti niekoľkých desiatok kilometrov štvorcových, transformovali slnečné svetlo na jednosmerný prúd. Následne by tento prúd bol transformovaný na vysokofrekvenčné mikrovlnné žiarenie, ktoré by bolo pomocou anténneho fázového systému vysielané smerom na zemský povrch. Na povrchu bolo mikrovlnné žiarenie bv transformované rektenou na jednosmerný prúd, prípadne podľa požiadaviek na prúd takej frekvencie zodpovedajúcej elektrickej sieti [24, 26, 27]. Na obrázku 23 je graficky zobrazený koncept prenosu energie pomocou solárnych satelitov.



Obr. 23: Koncept bezdrôtového prenosu energie pomocou solárnych satelitov [27].

Koncept solárnych satelitov je dlhodobo udržiavanou a rozvíjanou myšlienkou. V roku 2020 je plánovaná demonštrácia prenosu energie z orbity zeme v malom meradle (100 kW). Týmto budú otestované všetky technológie vyžadované pre komerčné účely. Medzi rokmi 2020 a 2030 sa očakáva demonštrácia 2 MW a 200 MW bezdrôtového prenosu. Od roku 2030 by mal byť prvý 1 GW komerčný model [27].

Okrem vvužitia bezdrôtového prenosu energie v energetickom priemysle je možné tento spôsob prenosu energie vvužiť ai na bezdrôtové nabíjanie mobilných zariadení, tabletov, vozidiel ale aj plavidiel ako sú vzducholode [22, 25, 26, 28]. Výhoda takéhoto nabíjania je nielen v pohodlnosti používania, ale aj v možnosti redukovania kapacity batérie vo vozidlách. Využitie môže byť najmä v mestskej hromadnej doprave, kde nabíjacia stanica môže byť integrovaná pod zastávkou. Takto by sa jednotlivé autobusy dobýjali pri každom zastavení na zastávke, čo by umožnilo redukovať kapacitu batérií a tým aj celkovú hmotnosť



Obr. 24: Navrhovaný systém bezdrôtového nabíjania vozidiel [28].

autobusu. Podobná technológia sa používa v Južnej Kórei, avšak na princípe indukčnej väzby [22]. Avšak vyvíja sa aj bezdrôtové nabíjanie na báze mikrovĺn, kde sa používajú anténne fázové systémy. Takýto systém je zobrazený na obrázku 24, ktorý je navrhnutý pre nabíjanie nákladných vozidiel Volvo. Rektena je umiestnená na streche vozidla a vysielacia časť je nad vozidlom. Celý nabíjací systém je prispôsobiteľný výške vozidla. Počas vývoja zistili, že pri menšej vzdialenosti vysielacia časť spolu s rektenou vytvárajú väzbu podobnej tej rezonančnej väzbe [28].

5. Návrh anténneho fázového systému

Pri návrhu anténneho fázového systému sa vychádzalo z požiadaviek uvedených v cieľoch dizertačnej práce. Požiadavky boli kladené na fokusáciu vyžarovacej charakteristiky spolu s demonštráciou zmeny smeru vyžarovania ak je rozpätie medzi anténami systému v rozsahu reaktívnej časti blízkeho poľa daných antén. Aby bolo možné splniť tieto požiadavky, bolo nutné vyriešiť dva hlavné problémy a to typ a rozmery antén a technickú realizáciu fázového riadenia pri prijateľnom rozpočte.

Na výber typu a rozmeru antén vplývala najmä technická realizácia fázového riadenia. Finančné prostriedky potrebné na zhotovenie fázového riadenia rapídne rastú s nárastom frekvencie, pri ktorej by sa vykonávalo fázové riadenie. Kvôli prijateľnosti rozpočtu bolo nutné ísť s pracovnou frekvenciou anténneho fázového systému nižšie,

rádovo v rozmedzí megahertzov. So znižujúcou sa frekvenciou narastá rozmer antény, čím sa zväčšuje priestor, v ktorom môžu byť dané antény rozmiestnené.

Ďalšou požiadavkou počas návrhu bolo, aby všetky antény boli spoľahlivé a mali rovnaké parametre. Predpokladom pre dosiahnutie toho je dlhodobá skúsenosť s výrobou antén a preto bolo upustené od ich svojpomocného vyrábania. Týmto do výberu antén vstúpil ďalší faktor, ktorým je komerčná dostupnosť daných antén na trhu. Faktor komerčnosti zúžil typ antén a zároveň aj stanovil pracovné frekvenčné pásmo. Týmto pásmom sa stalo CB pásmo, pre ktoré platí všeobecné povolenie pre občianske rádiostanice v rozsahu frekvencií 26,850 až 27,410 MHz. Konečným výberom sa stala prútová anténa Sunker Elite 115. Ide o 1,5 m dlhú monopólovú anténu, používanú na zabezpečovanie prenosu komunikácie z automobilov a kamiónov. Rozsah použitia stanovený výrobcom je 26 až 28 MHz. Pre rozsah 20 až 30 MHz je hranica blízkeho reaktívneho poľa 0,83 m (pre 20 MHz) až 1,02 m (pre 30 MHz). Začiatok vzdialeného EM poľa je 1,2 m (pre 20 MHz) až 1,8 m (pre 30 MHz).

Najlepšou voľbou pre technickú realizáciu fázového riadenia je digitálne riadenie pomocou DDS technológie. Nakoľko pri digitálnom riadení je možné kompenzovať nerovnosť parametrov antén a prenosovej siete. Vzhľadom na uvedené sa najlepšou voľbou dostupnou na trhu stal čip AD9959 od Analog devices. Tento čip umožňuje nezávisle riadenie amplitúdy, frekvencie a fázy pre štyri samostatné kanály na báze DDS technológie. Fázu je možné riadiť 14 bitovým slovom. Jednému bitu zodpovedá krok približne 0,022° [29]. Táto hodnota dostatočne pokrýva potreby požadovaného fázového riadenia. Počet kanálov generátora určilo aj maximálny počet antén navrhovaného anténneho fázového systému.

5.1. Technická realizácia 4-kanálového generátora

Na obrázku 25 je zjednodušená schéma navrhnutého štvorkanálového generátora pozostávajúca zo štyroch častí. Prvá časť obsahuje čip AD9959. Druhá časť obsahuje procesor zodpovedný za komunikáciu s riadiacim počítačom. Tretia časť zabezpečuje zosilnenie výstupného signálu z AD9959. Štvrtá časť je zodpovedná za napájanie prvej až tretej časti. Návrh dosky plošných spojov pre generátor vo forme jednej celistvej dosky, obsahujúcej všetky potrebné komponenty, by bol časovo príliš náročný. Z tohto dôvodu sa pristúpilo k nahrádzaniu jednotlivých častí schémy hotovými doskami, ponúkanými výrobcami daných komponentov. Analog devices ponúka pre čip AD9959 vývojovú dosku, ktorá obsahuje potrebné obvody na zabezpečenie funkcionality čipu. Pre riadiacu komunikáciu smerom z počítača k AD9959 bola vybratá vývojová doska pre procesor MSP432P401R. Výstup z vývojovej dosky pre AD9959 je na úrovni -12 dBm, čo je nevyhovujúca hodnota na ďalšie spracovávanie a preto je potrebné tento signál zosilniť. Toto zabezpečuje obvod založený na MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) zosilňovači INA-02184, ktorý má zosilnenie približne 30 dB v rozsahu 0.1 až 2000 MHz [30]. Každý výstup má svoj vlastný zosilňovač, umiestnený v celokovovom, dobre uzemnenom kryte, aby nedochádzalo k rušeniu medzi jednotlivými kanálmi (obrázok 28). Signál medzi vývojovou doskou a zosilňovačmi

je vedený koaxiálnymi káblami, kvôli dobrému tieneniu a tým zabezpečeniu nerušenia medzi jednotlivými kanálmi.



Obr. 25: Zjednodušená bloková schéma 4kanálového generátora.



Obr. 26: Vonkajší náhľad hotovej technickej realizácie 4-kanálového generátora

Napájanie jednotlivých dosiek vyžaduje viaceré úrovne napätia. Vývojová doska pre AD9959 potrebuje dve úrovne napätia a to 3,3 V a 1,8 V. Zároveň potrebuje hodinový signál z externého oscilátora v rozmedzí 20 až 30 MHz [29, 31]. Pre tieto účely bol zvolený kryštál TCXO s frekvenciou 25 MHz. Doska MSP432P401R je napájaná priamo z rozhrania USB, ktorým prebieha komunikácia s počítačom. Napájacie napätie pre zosilňovače jednotlivých výstupov je 10 V. Uvedené napätia sa získali zo sieťového napätia 230 V tak, že sa sieťové napätie najskôr transformovalo na 12 V. Následne sa toto napätie usmernilo a z usmerneného napätia sa pomocou lineárnych stabilizátorov dostali potrebné napájacie napätia. Doska plošných spojov bola navrhnutá v programe Altium Designer. Vyrobená bola na Ústave informatiky Slovenskej akadémii vied. Zmontovanie bolo realizované v laboratóriu Ústavu Elektrotechniky FEI STU. Zhotovená doska napájania je v pravom dolnom rohu obrázku 27 vpravo. Na obrázku 26 je zobrazený náhľad na hotovú technickú realizáciu 4-kanálového generátora.



Obr. 27: Vnútorný náhľad 4-kanálového generátora. Obrázok vpravo priblížený náhľad.



Obr. 28: Náhľad technickej realizácie zosilňovačov jednotlivých kanálov. Obrázok vpravo zobrazuje detailnejšiu montáž zosilňovačov v celokovovom kryte.

Na obrázku 29 sú zobrazené výstupné priebehy všetkých kanálov zrealizovaného generátora, po vyriešení všetkých problémov spojených so zemnením vo vyšších frekvenciách. Tabuľka 2 obsahuje zoznam technických parametrov zhotoveného generátora.



Obr. 29: Výstupné priebehy hotového 4-kanálového generátora.

Počet kanálov	4
Frekvenčný rozsah [MHz]	0 až 125
Vzorkovacia frekvencia [MSPS]	500
Výstupné napätie [V]	0,2 až 1,6
Krok pre zmenu fázy [°]	0,022

Tabuľka 2: Technické parametre zrealizovaného generátora

6. Vzájomné ovplyvňovanie antén v lineárnych a kruhových anténnych sústavách

Predmetom záujmu bolo zistiť, ako vplýva na jednotlivé antény rôzna konfigurácia anténnej sústavy s rôznym rozpätím medzi jednotlivými anténami. Preto bol navrhnutý a zrealizovaný experiment, v ktorom sa sledovala hodnota koeficientu odrazu v rozsahu 20 až 30 MHz. Skúmané boli dve konfigurácie anténnej sústavy a to lineárna a kruhová s hodnotami rozpätia d medzi 14,5 a 145 cm. Na obrázku 30 sú načrtnuté konfigurácie skúmaných anténnych sústav. Koeficient odrazu bol meraný pomocou vektorového sieťového analyzátora v bezodrazovej komore. Meracie pracovisko je zobrazené na obrázku 30 vpravo. Rozloženie meracieho pracoviska nevplývalo na meranie, nakoľko vzájomné ovplyvnenie je fenoménom blízkeho EM poľa. Pre použitý typ antény začína vzdialené EM pole už od 1,2 m pri 20 MHz a od 1,8 m pri 30 MHz. Analyzátor bol od antén vzdialený viac ako 1,8 m počas celého merania.



Obr. 30: Náčrt skúmaných konfigurácii anténnej sústavy. Parameter d je rozpätím medzi anténami. Obrázok vpravo je fotografia z merania v bezodrazovej komore.

Zmena rozpätia d medzi anténami spôsobila posun krivky koeficientu odrazu. So zmenšovaním rozpätia d sa krivka posúvala na frekvenčnej stupnici smerom k nižším frekvenciám, čo je zobrazené na obrázku 31. Pozornosť sa zamerala na závislosť frekvenčného posunu minima koeficientu odrazu na rozpätí d medzi anténami. Okrem zmeny rozpätia d sa počas experimentu menili aj antény na jednotlivých pozíciách, kvôli rozdielnosti ich parametrov. Výsledné závislosti frekvenčnej pozície miním koeficientu odrazu sa získali spriemerovaním získaných údajov daných permutáciou jednotlivých antén. K týmto hodnotám boli následne vypočítané smerodajné odchýlky určujúce rozptyl jednotlivých hodnôt od priemernej. Takto isto sa postupovalo nielen pri meraných hodnotách, ale aj tých simulovaných. Údaje zo simulácie boli získané simulačným softvérom Altair Feko, ktorý používal pri výpočte momentovú metódu. Do simulácií vstupoval ešte jeden parameter a to naklonenie vrchu antény do strany. Toto naklonenie bolo približne 4 cm.

Sústava dvoch antén je špecifickým prípadom anténnej sústavy. Môže byť považovaná za lineárnu sústavu ale taktiež aj za kruhovú sústavu s tým, že rozstup medzi anténami je 180°. Z tohto dôvodu sa sústava dvoch antén brala ako referenčná anténna sústava, ku ktorej sa vzťahovali namerané údaje lineárnych aj kruhových sústav. Na obrázku 32 je porovnanie závislostí meranej a simulovanej frekvenčnej pozície minima koeficientu odrazu na rozpätí d medzi anténami referenčnej sústavy.



Obr. 31: Frekvenčný posun krivky koeficientu odrazu spôsobený zmenou rozpätia d medzi anténami trojprvkovej kruhovej anténnej sústavy.



Obr. 32: Závislosť frekvenčnej pozície minima koeficientu odrazu na rozpätí d medzi anténami referenčnej anténnej sústavy.

Pri lineárnych anténnych sústavách sa skúmali štyri prípady. Dva prípady pre trojprvkovú anténnu sústavu, z ktorých jeden prípad bol meranie koeficientu odrazu krajnej antény a druhý prípad meranie koeficientu odrazu strednej antény, čo je zobrazené na obrázku 33.



Obr. 33: Závislosti frekvenčných pozícií miním koeficientu odrazu od rozpätia d medzi anténami. Graf naľavo patrí anténam na kraji trojprvkovej lineárnej sústavy. Graf napravo patrí anténam v strede trojprvkovej lineárnej sústavy.

Ďalšími dvoma prípadmi boli štvorprvkové anténne sústavy. Jeden prípad bol meranie koeficientu odrazu krajnej antény a druhý prípad meranie koeficientu odrazu na anténe druhej od kraju. Tieto prípady sú zobrazené na obrázku 34.



Obr. 34: Závislosti frekvenčných pozícií miním koeficientu odrazu od rozpätia d medzi anténami. Graf naľavo patrí anténam na kraji štvorprvkovej lineárnej sústavy. Graf napravo patrí anténam druhým od kraja štvorprvkovej lineárnej sústavy.

Na obrázku 35 sú dva grafy, zobrazujúce porovnania meraných a simulovaných dát všetkých prípadov lineárnych anténnych sústav s referenčnou anténnou sústavou.



Obr. 35: Závislosti frekvenčných pozícií miním koeficientu odrazu od rozpätia d medzi anténami pre všetky skúmané prípady lineárnych anténnych sústav spolu s referenčnou sústavou. Graf napravo sú merané hodnoty. Graf naľavo sú simulované hodnoty.

Pri kruhových anténnych sústavách boli skúmané dva prípady a to trojprvková kruhová anténna sústava a štvorprvková kruhová anténna sústava. Vzhľadom na fakt, že antény sú umiestnené v kruhu, stačí skúmať len antény na jednej pozícií, nakoľko všetky pozície sú si navzájom rovnocenné. Merané antény boli kombinačne menené. Merané a simulované závislosti pre trojprvkovú aj štvorprvkovú kruhovú anténnu sústavu sú zobrazené na obrázku 36.



Obr. 36: Závislosti frekvenčnej pozície miním koeficientu odrazu na rozpätí d medzi anténami v kruhovej anténnej sústave. Graf naľavo patrí trojprvkovej anténnej sústave. Graf napravo patrí štvorprvkovej anténnej sústave.

Na obrázku 37 sú dva grafy, zobrazujúce porovnania meraných a simulovaných dát kruhových anténnych sústav s referenčnou anténnou sústavou.





Z údajov zobrazených na obrázkoch 32 až 37 vyplýva, že antény na krajoch lineárnych anténnych sústav vykazujú najväčšie odchýlky v porovnaní s anténami na ostatných pozíciách. Ďalší zaujímavý fakt vyplývajúci z meraných a simulovaných údajov je, že antény, ktoré sa nachádzajú hneď za susednými anténami, významne neovplyvňujú danú anténu. Najlepšie je to vidieť na obrázkoch 35 a 37. Pri lineárnych sústavách ide najme o porovnanie dvoch prípadov a to anténna sústava pozostávajúca z troch antén, kde meraná anténa je v strede a zo štyroch antén, kde meraná anténa je druhá od kraja. To isté je aj v prípade kruhových anténnych sústav pozostávajúcich z troch a štyroch antén. V oboch porovnaniach vidno, že ďalšia anténa navyše síce posunula celú krivku smerom hore, no tento posun môže byť zanedbaný.

Ako môže byť vidieť na údajoch zobrazených na obrázkoch 32 až 37, zmena pozície minima koeficientu odrazu začína pri zmenšovaní rozpätia d medzi anténami už od 90 cm. Táto hodnota rozpätia medzi anténami je zároveň priemernou hodnotou z hodnôt rozpätí zodpovedajúcich hranici blízkeho reaktívneho poľa v rozsahu od 20 do 30 MHz. Týmto sa potvrdilo tvrdenie "Vzájomná väzba medzi anténami je fenoménom blízkeho elektromagnetického poľa", pričom tieto dáta dopĺňajú tento výrok o presnejšie určenie reaktívneho blízkeho EM poľa.

7. Hľadanie vhodnej konfigurácie antén a fáz

Anténny fázový systém môže pozostávať maximálne zo štyroch antén. Z dostupných konfigurácií pripadajú do úvahy dva druhy anténnych sústav a to lineárna a kruhová. Na obrázku 38 je znázornená geometria oboch druhov skúmaných anténnych sústav. Použitá bola simulačná metóda založená na Huygens-Fresnellovom princípe, vysvetlenom v kapitole "4.2.1. Matematický model pre simulácie". Všetky rozmery v simuláciách sú normované k pracovnej vlnovej dĺžke. Vyžarovacie charakteristiky sú normované k najvyššej hodnote.



Obr. 38: Geometria skúmaných anténnych sústav. Lineárna anténna sústava je naľavo. Kruhová anténna sústava je napravo.

Antény majú byť umiestnené tak, aby rozpätie medzi nimi nepresiahlo hranicu reaktívnej časti blízkeho EM poľa. Podstatným je interval možných rozpätí medzi anténami. Pre lineárne sústavy je dôležitým parametrom rozpätie d medzi anténami. Avšak pre kruhové sústavy je dôležitým parametrom polomer sústavy r_{sust}. Najmenšie možné rozpätie d medzi anténami je 0,145 m, čomu zodpovedá priemer podstavca s magnetickým uchytávaním antén. Pri lineárnych anténnych sústavách sa rozpätie d pohybuje v rozsahu 0,009673 λ až 0,102 λ . Pri kruhových anténnych sústavách pozostávajúcich z troch antén je interval pre polomer sústavy 0,005585 λ až 0,0589 λ a pre pozostávajúce zo štyroch antén 0,00684 λ až 0,0721 λ .

7.1. Lineárne anténne fázové systémy

Schopnosť prirodzenej fokusácie (samofokusácie) EM poľa majú lineárne anténne fázové systémy len v obmedzenom rozsahu rozpätí medzi jednotlivými anténami. Samofokusácia vyžarovaného EM poľa nezávisí na počte antén v systéme, ale závisí najmä na celkovej šírke anténnej sústavy. Samofokusácia sa začína prejavovať pri hodnote celkovej šírky anténnej sústavy rovnajúcej sa približne 0,25 násobku pracovnej vlnovej dĺžky. Tieto tvrdenia sú podložené dátami zo simulácií na obrázku 39.



Obr. 39: Vľavo - Závislosť šírky zväzku od počtu dipólov pre rôzne rozpätia medzi dipólmi. Vpravo - Závislosti šírky zväzku od celkovej šírky sústavy pre rôzne rozpätia medzi dipólmi.

Vplyv mechanizmu lineárne narastajúceho fázového posunu na jednotlivých dipóloch lineárneho anténneho fázového systému, závisí na troch faktoroch. Týmito faktormi sú rozpätie medzi anténami d, počet antén v systéme N a celková šírka systému CŠ. Tieto tri faktory boli menené v jednotlivých simuláciách.

Rozpätie d v simuláciách bolo menené v intervale od najmenšieho rozpätia 0,009673 λ , až do niekoľko násobku vlnovej dĺžky. Tento interval je možné rozdeliť do štyroch menších intervalov Ξ , Π , β a Ψ . Intervaly majú nasledovné hranice $\Xi = (0,009673\lambda; 0,436\lambda)$, $\Pi = (0,436\lambda; 0,505\lambda)$, $\beta = (0,505\lambda; \lambda)$ a $\Psi \ge \lambda$, pričom zátvorky nemajú význam matematicky značených hraníc intervalov. Niektoré hranice závisia od počtu antén N. V intervale Ξ sa zmena smeru systémom fokusovaného EM vyžarovania správa podobne, ako na obrázku 20. Avšak s rozdielom, že v tomto intervale sa tvar vyžarovacej charakteristiky cyklicky vyvíja a degraduje, pričom hlavný cyklus vývoja Δ sa delí na niekoľko podcyklov Λ , prejavujúcich sa medzi zmenami end-fire vyžarovaniami. Podcykly majú vyžarovacie charakteristiky podobné na obrázku 40.



Obr. 40: Vyžarovacie charakteristiky dvoch dipólov s variabilnými rozpätiami d a fázovými posunmi ψ [32].

Zmena tvaru vyžarovacích charakteristík jednotlivých podcyklov Λ zodpovedá vyžarovacím charakteristikám zobrazených na obrázku 40 v stĺpcoch. Pričom

na konkrétne zmeny vyžarovacích charakteristík vplýva párnosť, respektíve nepárnosť počtu antén v systéme. Pri párnom počte antén v systéme má vyžarovacia charakteristika na začiatku podcyklu Λ taký tvar, ako vyžarovacia charakteristika zobrazená na obrázku 40 s fázovým posunom $\psi = 0^{\circ}$. V strede podcyklu Λ je vyžarovacia charakteristika s fázovým posunom $\psi = 180^{\circ}$ a na konci podcyklu je opäť vyžarovacia charakteristika zodpovedajúca fázovému posunu $\psi=0^{\circ}$. Pri nepárnom počte je to naopak. To, ktorý stĺpec sa bude zobrazovať v daných podcykloch, závisí od celkovej šírky CŠ systému, pričom rozpätie d z obrázka 40 korešponduje s celkovou šírkou CŠ systému. Priebehy podcyklov Λ pre párny a nepárny počet antén sú zobrazené na obrázku 41.



Obr. 41: Priebehy podcyklov v strede hlavného cyklu Δ vzhľadom na počet antén v systéme pre rôzne hodnoty α . Horný rad 20 antén, dolný rad 21 antén, rozpätie $d = 0.036\lambda$.

Tvar vyžarovacích charakteristík jednotlivých podcyklov Λ podlieha vývoju a degradácii. Najlepšie vyvinuté vyžarovacie charakteristiky sa nachádzajú v podcykle, ktorý je v strede hlavného cyklu Δ . Tento vývoj je zobrazený na obrázku 42, kde je zobrazená vyžarovacia charakteristika zodpovedajúca strede podcyklu Λ . Vyžarovacie charakteristiky s hodnotami $\alpha = 418^{\circ}$ a $\alpha = 6782^{\circ}$ sú hraničnými vyžarovacími charakteristikami jednotlivých end-fire smerov vyžarovaní.



Obr. 42: Vývoj stredovej vyžarovacej charakteristiky podcyklu s nárastom hodnoty parametra α pre 21 antén s rozpätím d = 0,036 λ .

V prípade, že celková šírka CŠ lineárneho anténneho fázového systému s rozpätím d spadajúcemu do podintervalu Ξ, prekročí vlnovú dĺžku, začnú vznikať nové postranné zväzky. Vznik týchto zväzkov je zobrazený na obrázku 43, pričom aj tu sa prejavuje párnosť, respektíve nepárnosť počtu antén v systéme. Podobný mechanizmus je zobrazený aj na obrázkoch 16, 18 a 19.



Obr. 43: Mechanizmus vzniku nových zväzkov pri zväčšovaní celkovej šírky anténneho fázového systému CŠ vzhľadom na počet antén Ν. Rozpätie d = 0,009673λ

Vznik nových postranných zväzkov opisuje rovnica 11, získaná sériou desiatok simulácii.

$$C\check{S}_{Z} = C\check{S}_{C} + p \tag{11}$$

V rovnici 11 je $C\check{S}_Z$ skratkou celkovej šírky anténneho fázového systému, pri ktorej dochádza k zmene, $C\check{S}_C$ je celočíselná celková šírka anténneho fázového systému ($C\check{S}_C = n\lambda$, kde n = 1, 2, 3, ...) a p je hodnota, pri ktorej nastáva zmena vo vyžarovacej charakteristike. Hodnota parametra p je závislá od párnosti respektíve nepárnosti počtu antén v systéme. Pri párnom počte antén pre vyžarovaciu charakteristiku v strede podcyklu nový zväzok vzniká, keď sa hodnota p = 0,05 λ . Plne vyvinutý zväzok je pri hodnote p = 0,5 λ . Následne sa vzniknutý zväzok rozdeľuje pri hodnote p = 0,55 λ a vzniknuté zväzky postupujú smerom k hlavnému smeru vyžarovania anténneho fázového systému, ktorým je smer 90° a 270°. Pri nepárnom počte pre rovnakú vyžarovaciu charakteristiku vzniká nový zväzok pri hodnote p = 0,55 λ . Plne rozvinutý je pri hodnote p = 0 λ a rozdeľuje sa pri hodnote p = 0,05 λ . Pri nepárnom počte antén celý mechanizmus vzniku nových zväzkov vo vyžarovacích charakteristikách v strede podcyklov začína už pri hodnote C $\check{S}_C = 0$.

Pri vyžarovacích charakteristikách mimo stredu a kraju podcyklov A je mechanizmus odlišný. Parametre v rovnici 11 majú odlišné hodnoty. $C\check{S}_C$ má význam celočíselného násobku polovice vlnovej dĺžky ($C\check{S}_C = n(\lambda/2)$, kde n = 1, 2, 3, ...) Pôvodný tvar vyžarovacej charakteristiky, pri celkovej šírke anténneho fázového systému $C\check{S}$ rovnajúcej sa vlnovej dĺžke, obohatený o novo vzniknuté zväzky je možné sledovať pri hodnote p = 0 λ . Pričom je možné sledovať obrátenie takýchto vyžarovacích charakteristík o 180°. Na obrázku 44 je znázornený mechanizmus vzniku nových zväzkov pre vyžarovaciu charakteristiku nachádzajúcu sa v 1/4 a 3/4 podcyklu.



Obr. 44: Mechanizmus vzniku nových zväzkov pri zväčšovaní celkovej šírky anténneho fázového systému CŠ vzhľadom na počet antén N pre vyžarovaciu charakteristiku zodpovedajúcu obrázku 55 s hodnotou $\psi = 90^{\circ}$. Rozpätie d = 0,009673 λ .

V podintervale Π je zmena smeru vyžarovania fokusovanej EM energie lineárnym anténnym fázovým systémom totožná ako na obrázku 20 s tým, že tu nie sú v hlavnom cykle Δ žiadne iné podcykly Λ , ako to bolo v podintervale Ξ . Následky tohto sú také, že vyžarovacia charakteristika systému nepodlieha vývoju a degradácii počas cyklu a nenachádzajú sa tu žiadne iné tvary vyžarovacej charakteristiky medzi zmenami endfire vyžarovaním systému.

V podintervale β sa zmena smeru vyžarovania fokusovanej EM energie lineárnym anténnym fázovým systémom správa rovnako, ako je to zobrazené na obrázku 21 aj napriek tomu, že obrázok 21 zobrazuje anténny fázový systém, v ktorom sa fáza menila kolineárne usporiadaným anténam. Na obrázku 45 je mechanizmus zmeny smeru vyžarovania v podintervale β , systém už nedokáže prejsť zväzkom celý priestor od 0° po 180° bez toho, aby sa neobjavil iný zväzok. Na obrázku 46 sú zobrazené plne rozvinuté druhé zväzky, pre rôzne rozpätia d. Čím väčšie rozpätie je, tým skôr vznikne druhý zväzok.



Obr. 45: Priebeh celého cyklu pri narastajúcej hodnote parametra α pre 20 antén s rozpätím medzi anténami d = 0,7 λ .



Obr. 46: Plne rozvinutý druhý zväzok pre konkrétne rozpätia d. Počet antén N = 20.

V prípade intervalu Ψ , kde rozpätie d je väčšie alebo rovnajúce sa vlnovej dĺžke, lineárny anténny fázový systém nie je schopný vyžarovať len jedným zväzkom. Na obrázku 47 je mechanizmus vzniku nových zväzkov, ktorý je daný len polohou antén. Obrázok 48 znázorňuje mechanizmus zmeny vyžarovacej charakteristiky so zmenou fázového posunu α , pričom zobrazený mechanizmus platí aj pri rozpätiach d väčších ako vlnová dĺžka.



Obr. 47: Vznik nových zväzkov so zväčšovaním rozpätia medzi anténami d. Počet antén N = 20, parameter $\alpha = 0^{\circ}$.



Obr. 48: Mechanizmus zmeny vyžarovacej charakteristiky so zväčšujúcim sa parametrom α , pre rozpätie d = λ . Počet antén N = 20.

7.2. Kruhové anténne fázové systémy

Geometria rozmiestnenia antén v priestore je zobrazená na obrázku 38 vpravo. Schopnosť prirodzenej samo-fokusácie kruhových anténnych sústav, spôsobenej polohou antén v priestore, nie je tak jednoznačná, ako to bolo pri lineárnych anténnych sústavách. Vplyv polohy antén na samo-fokusáciu je jedinečný pre každú kruhovú anténnu sústavu odlišujúcu sa počtom antén N. Túto jedinečnosť je možné vidieť na obrázkoch 49 až 51.



Obr. 49: Vyžarovacie charakteristiky kruhového anténneho fázového systému pri zmene polomeru sústavy r_{sust} a tomu zodpovedajúcemu rozpätiu medzi anténami d. Počet antén

N = 3.

Obrázok 49 zobrazuje vplyv polohy antén na trojprvkový kruhový anténny fázový systém. Poloha antén je v smere 0°, 120° a 240°. Dokonalá samo-fokusácia nastáva prvýkrát pri polomere sústavy $r_{sust} = 0.375\lambda$.

Na obrázku 50 je zobrazený vplyv polohy antén na šesť prvkový kruhový anténny systém. Poloha antén v tomto prípade je v smeroch 0°, 60°, 120°, 180°, 240° a 300°. Táto konfigurácia antén je zaujímavá tým, že hodnoty r_{sust} sú rovnaké ako hodnoty rozpätí medzi anténami d (šesť uholník sa skladá zo šiestich rovnostranných trojuholníkov). Prvá samo-fokusácia sa pri tejto konfigurácii nachádza tiež pri hodnote $r_{sust} = 0,38\lambda$.



Obr. 50: Vyžarovacie charakteristiky kruhového anténneho fázového systému pri zmene polomeru sústavy r_{sust} a tomu zodpovedajúcemu rozpätiu medzi anténami d. Počet antén N = 6.

Zaujímavosťou kruhových anténnych fázových systémov je počet zväzkov vzniknutých prvou fokusáciou. Pri párnom počte antén množstvo zväzkov zodpovedá počtu antén. Avšak pri nepárnom počte sa počet zväzkov rovná dvojnásobku počtu antén v systéme. Toto je možné vidieť na obrázku 51.



Obr. 51: Prvá fokusácia vyžarovacích charakteristík anténnych fázových systémov pri polomere sústavy r_{sust} a jej zodpovedajúcemu rozpätiu medzi anténami d, pre rôzny počet antén N.

Na obrázku 52 je zobrazený vplyv fázového riadenia na kruhový anténny fázový systém pozostávajúci z troch antén, pre rôzne hodnoty polomeru r_{sust} . Hodnota $r_{sust} = 0,005585\lambda$ zodpovedá najmenšiemu možnému priemeru technicky realizovateľnému pomocou antén, ktoré boli zvolené. Šírka cyklu Δ pre tri antény je 720°. Keďže počet antén je v tomto prípade tri, počet zväzkov na krajoch cyklu Δ bude

ich dvojnásobkom. Šírka podcyklov je 240° pre tri antény. Špecifické hodnoty parametra α sú 240° a 480°. Pre tieto hodnoty sa so zvyšujúcou hodnotou r_{sust} vyžarovacia charakteristika fokusuje, pričom počet zväzkov zodpovedá počtu antén v systéme. Okrem hodnôt 240° a 480° je zaujímavý aj stred cyklu Δ , ktorého hodnota je 360°. Pri tejto hodnote sa s nárastom r_{sust} objavuje dvojzväzková vyžarovacia charakteristika, charakteristická pre lineárne anténne fázové systémy. Avšak tieto spomenuté vlastnosti vyžarovacej charakteristiky sú mimo hraníc intervalu r_{sust} rovnajúcich sa 0,005585 λ až 0,0589 λ , vyjadrujúceho oblasť blízkeho reaktívneho EM poľa. V tomto intervale je možné dosiahnuť tvar vyžarovacej charakteristiky vo forme kardioidy.



Obr. 52: Zmena vyžarovacej charakteristiky kruhového anténneho fázového systému s nárastom hodnoty parametra α a zmenou polomeru r_{sust} . Počet antén N = 3.

8. Experimentálne meranie fokusácie EM poľa

V predchádzajúcich kapitolách boli ukázané možnosti fokusácie EM poľa pre rôzne rozpätia medzi anténami. Avšak pri experimentálnom meraní sa merali najmä také rozpätia medzi anténami, ktoré spadali do blízkeho reaktívneho EM poľa. Merania prebiehali v bezodrazovej komore patriacej Ústavu Elektrotechniky, Fakulty Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej Univerzity. Pohľad zvonku a zvnútra bezodrazovej komory je zobrazený na obrázku 53. Merali sa dva hlavné druhy anténnych fázových systémov a to lineárny a kruhový.





V záujme najprehľadnejšieho spôsobu prezentovania nameraných dát budú konfiguračné parametre spoločne s polárnym grafom nameraných a simulovaných dát zobrazené v jednej tabuľke. V týchto meraniach nejde o kvantitatívnu povahu údajov. Ide najmä o kvalitatívnu povahu a to tvar EM poľa v okolí daného anténneho fázového systému. Preto namerané aj simulované údaje sú normované na najvyššiu hodnotu. K dispozícii boli štyri antény, pričom každá mala svoje vlastné číselné označenie, ktoré sa taktiež uvádza v tabuľkách.

8.1. Lineárne anténne fázové systémy

Geometria rozmiestnenia antén je zobrazená na obrázku 38 vľavo. Merané boli tri konfigurácie, rozlišujúce sa počtom antén, a to dvojica, trojica a štvorica antén. Rozpätie d medzi anténami, zodpovedajúce blízkemu reaktívnemu EM poľu sa pohybuje v rozsahu 0,009673λ až 0,102λ. Pri takýchto hodnotách rozpätia d nie je možné sledovať fokusáciu EM poľa v broadside smere. V end-fire smere je fokusácia možná. Toto spôsobuje, že lineárne anténne fázové systémy, pre dané rozpätie d medzi anténami, nedokážu meniť smer fokusovaného EM poľa, bez zmeny polôh antén. Týmto lineárne anténne fázové systémy nespĺňajú jednu z podmienok určených zadaním dizertačnej práce. Preto nasledovné merania sú len orientačné, určené pre vyskúšanie funkčnosti fokusácie v end-fire smere.

Pri týchto meraniach som sa zameral na hornú časť hodnôt pre rozpätie d medzi anténami. Otočná plošina v bezodrazovej komore má priemer 1 meter, pričom ja som potreboval väčší rozmer. Z tohto dôvodu bolo potrebné vyrobiť prídavné rameno, na ktorom by boli antény umiestnené. Pričom bolo nutné splniť podmienku, aby toto rameno bolo čo najnižšie a zároveň, aby bolo dobre vodivo spojené s uzemnením, ktorým v tomto prípade je podlaha. Preto ako vhodná alternatíva sa zvolil plechový plát spojený s otočnou plošinou dvoma skrutkami. Jeho technická realizácia je na obrázku 54.



Obr. 54: Fotografie z merania lineárnych anténnych fázových systémov. Počet antén N = 2 (fotka vlľavo), N = 3 (fotka v strede) a N = 4 (fotka vpravo).

Meraná	á Vlnová		Rozpätie medzi anténami		Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná čiara)
f [MHz]	2	пzка \[m]	d [m]	d [λ]	a merané dáta (plná čiara)
24,1	12	2,4395	2,15	0,1728	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
Merané antéi	ny	Pol anté	oha n [°]	Fázy na anténach [°]	
4		d/2 (180°)	180	210 330
2 d/2		(0°)	0	240 270 300	

Tabuľka 3: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov pre dvojicu antén s rozpätím $d = 0,1728\lambda$.

Tabuľky 3 a 4 obsahujú konfiguračné parametre, potrebné k nastaveniu simulácií a taktiež meraní lineárneho anténneho fázového systému, pozostávajúceho z dvoch antén. Fázový posun v oboch prípadoch bol 180°, pričom rozdiel bol v meraných anténach a rozpätím d medzi nimi. V tabuľke 3 sa rozpätie d rovná 2,15 m, čo zodpovedá 0,1728λ.

Táto hodnota je mimo hodnôt spadajúcich do blízkeho reaktívneho EM poľa, avšak toto meranie bolo len kontrolné. V tabuľke 4 sa rozpätie d rovná 1,05 m, čo zodpovedá 0,09176λ. Pri tomto meraní namerané údaje vykazujú zmenšenie ľavého zväzku oproti simulovaným údajom. Toto môže byť spôsobené rôznou hodnotou koeficientu odrazu daných antén pri danej frekvencii. Do antény číslo 2 sa nedostáva rovnaké množstvo energie, ako do antény číslo 1 a taktiež dochádza aj k zmenšeniu rozdielu fáz antén.

Meraná	Vlnová dĺžka		R	.ozp ar	ätie medzi nténami	Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná
f [MHz]	2	λ [m]	d [m	1]	d [λ]	čiara) a merané dáta (plná čiara)
26,2	11	1,4424	1,05	5	0,09176	$90 \\ 120 \\ 0.8 \\ 0.6 \\ 20$
Merané antér	ny	Polo antér	oha 1 [°]		Fázy na anténach [°]	
2		d/2 (1	80°)		0	210 330
1	d/2 ((0°)		180	240 270 300

Tabuľka 4: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajovpre dvojicu antén s rozpätím d = $0,09176\lambda$.

Meraná	Vlnová dĺžka λ [m]		Vlnová dĺžka		Rozpā an	itie medzi ténami	Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná
f [MHz]			d [m]	d [λ]	čiara) a merané dáta (plná čiara)		
80	3,747	74 1,15		0,30688	120 1 60 0.8 0.6 30		
Merané ant	tény	;	Poloha antén [°]	Fázy na anténach [°]			
4	(4		d (180°)	180	
1		0 (stred)		90	210 330		
3		d (0°)		0	240 300 270		

Tabuľka 5: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov pre trojicu antén s rozpätím $d = 0,30688\lambda$.

V tabuľke 5 sú údaje merania pri frekvencii 80 MHz. Antény sú naladené na frekvenčný rozsah 26 až 28 MHz, avšak sú schopné vysielať aj na iných frekvenciách. Samozrejme na týchto frekvenciách sú vysoké straty spôsobené odrazmi, avšak pre túto prácu je dôležitý tvar EM poľa v okolí anténnych fázových systémov a nie efektivita prenosu energie. Tento prípad je uvedený pre zaujímavosť.

V tabuľke 6 sú konfiguračné parametre, potrebné k nastaveniu simulácií a taktiež meraní lineárneho anténneho fázového systému, pozostávajúceho zo štyroch antén. Rozpätie d medzi anténami je 0,6 m, čo zodpovedá 0,05264λ. Fázový posun medzi krajnými anténami je 180°.

Meraná Vlnov frekvencia dĺžka		á Rozpä	tie medzi énami	Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná čiara)
f [MHz]	dizka λ[m]	d [m]	d [λ]	a merané dáta (plná čiara)
26,3	11,398	89 0,6	0,05264	120 1 60 0.8
Merané an	tény	Poloha antén	Fázy na anténach [°]	150 0.6 30
4		1,5d (180°)	180	
3		0,5d (180°)	120	210 330
1		0,5d (0°)	60	240 300
2		1,5d (0°)	0	270 270

Tabuľka 6: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov pre štvoricu antén s rozpätím $d = 0.05264\lambda$.

8.1. Kruhové anténne fázové systémy

Geometria rozmiestnenia antén je zobrazená na obrázku 38 vpravo. Meraný bol kruhový anténny fázový systém pozostávajúci z trojice antén s polomerom systému rovnajúcemu sa 0.5. 0.3 a 0.15 m. Na obrázku 55 sú fotografie z meraní.



Obr. 55: Fotografie z merania kruhového anténneho fázového systému pozostávajúceho z troch antén.

V tabuľkách 7 a 8 sú konfiguračné parametre, potrebné k nastaveniu simulácií a taktiež meraní kruhového anténneho fázového systému, pozostávajúceho z troch antén s polomerom r_{sust} rovnajúcemu sa 0,5 m, čo zodpovedá 0,043864 λ . V tabuľke 7 je zobrazený prípad, kde parameter α má hodnotu 174° a je použité lineárne rozloženie fáz na anténach. V tabuľke 8 je prípad, kde parameter α má hodnotu 249,4° avšak rozloženie fáz nie je lineárne. Pre dosiahnutie výraznejšej fokusácie bolo potrebné počas meraní upraviť jednu z fáz. Preto stredná fáza nie je 124,7° ale 117,6°.

Meraná	i Vlnová		Polomer systému		Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná čiara)
frekvencia		ilžka [m]	<i>a</i> [m]	[2]	a merané dáta (plná čiara)
		t [III]	$r_{sust} [m]$ $r_{sust} [\lambda]$		90 1 60
26,3	11	,3989	0,5	0,043864	0.8 30
Merané antéi	ny	Poloha antén [°]		Fázy na anténach [°]	
1		0		87	
2		120		0	210 330
3			240	174	240 300 270

Tabuľka 7: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov pre trojicu antén s polomerom systému $r_{sust} = 0,043864\lambda$.

Meraná	Vlnová dĺžka		Polo	mer systému	Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná
f [MHz]	λ[m]	r _{sust} [m]	r _{sust} [λ]	čiara) a merané dáta (plná čiara)
26,3	11,3	3989	0,5	0,043864	
Merané ant	ény	P an	oloha tén [°]	Fázy na anténach [°]	150 0.4 180 0 0
1	1		0	117,6	
2		120		249,4	210 330
3			240	0	240 270 300

Tabuľka 8: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov pre trojicu antén s polomerom systému $r_{sust} = 0.043864\lambda$.

V tabuľke 9 sú konfiguračné parametre, potrebné k nastaveniu simulácií a taktiež meraní kruhového anténneho fázového systému, pozostávajúceho z troch antén

s polomerom r_{sust} rovnajúcemu sa 0,3 m, čo zodpovedá 0,0242168 λ . V tomto prípade bolo zachované získané rozloženie fáz úpravou fázy jednej antény, ktoré je taktiež v tabuľke 8.

Meraná V		lnová í≚1	Polomer systému		er systému	Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná
f [MHz]	$\lambda_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$		m] r _{sust} [m		r _{sust} [λ]	čiara) a merané dáta (plná čiara)
24,2	12	,3881	0,3		0,0242168	90 1 60 120 0.8
Merané anté	ny	Po anté	loha en [°]		Fázy na anténach [°]	150 0.6 30 0.4 180 0
1		0) 0		
2		1	20		249,4	210 330
3		240			117,6	240 270 300

Tabuľka 9: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov
pre trojicu antén s polomerom systému $r_{sust} = 0,0242168\lambda.$

V tabuľke 10 sú konfiguračné parametre, potrebné k nastaveniu simulácií a taktiež meraní kruhového anténneho fázového systému, pozostávajúceho z troch antén s polomerom r_{sust} rovnajúcemu sa 0,145 m, čo je najmenšia možná vzdialenosť medzi anténami, pri ktorej sa navzájom dotýkali podstavce jednotlivých antén. Vyžarovacia charakteristika získaná meraním je oproti charakteristike získanej simuláciou mierne vychýlená v smere nárastu uhla. Toto bude pravdepodobne spôsobené odchýlkou v rozmiestnení jednotlivých antén na otočnej plošine.

Meraná	Vln	ová	Polomer systému		Polárny graf znázorňujúci simulované dáta (bodkovaná
frekvencia f [MHz]	dĺžka λ [m]		r _{sust} [m]	r _{sust} [λ]	$\check{c}iara)$ a merané dáta (plná čiara) 90 120 90 60
24,2	12,3	8881	0,145	0,011705	0.8 0.6 30
Merané antény		Poloha antén [°]		Fázy na anténach [°]	180 210 240 270 300 0 330 300
1		0		249,4	
2		120		0	
3		240		117,6	

Tabuľka 10: Konfiguračné parametre spolu s grafom meraných a simulovaných údajov pre trojicu antén s polomerom systému $r_{sust} = 0, 011705\lambda$.

ZÁVER

Dizertačná práca sa zaoberá problematikou anténnych fázových systémov. Vysvetlené bolo, aké procesy prebiehajú v rámci anténneho fázového systému, ako je vzájomné ovplyvňovanie antén navzájom. Pričom toto bolo dané do kontrastu voči samotnej anténe. Taktiež boli uvedené druhy anténnych fázových systémov, ktoré sú v podstate podmnožinou anténnych sústav. V práci som sa zameral najmä na anténne fázové systémy, v ktorých je rozpätie medzi jednotlivými anténami v rozmedzí blízkeho reaktívneho elektromagnetického poľa. Pre tento účel som vysvetlil jednotlivé časti elektromagnetického poľa s uvedením ich hraníc.

Pre účely dizertačnej práce som v rámci doktorantúry zhotovil štvorkanálový generátor, ktorý som následne používal pri meraniach vyžarovacích charakteristík iednotlivých anténnych fázových systémov. Pomocou simulácií založených na Huygensovom-Fresnelovom preukázal fokusácie princípe som možnosť elektromagnetického poľa v okolí anténnych fázových systémov, v ktorých rozpätie medzi anténami spadá do intervalu blízkeho reaktívneho elektromagnetického poľa. V práci som uviedol dva typy meraní, ktoré som vykonal. Jeden typ meraní bol zameraný na dopad vzájomného ovplyvňovania na reflexný koeficient daných antén. Pri tomto type meraní som preukázal, že vzájomné ovplyvňovanie antén je najmä fenoménom blízkeho reaktívneho elektromagnetického poľa. Druhý typ meraní bol zameraný na meranie vyžarovacích charakteristík lineárnych a kruhových anténnych fázových systémov. Pri lineárnych anténnych fázových systémoch je síce možné dosiahnuť fokusáciu vyžarovaného elektromagnetického poľa, avšak v prípade nutnosti manipulácie so smerom vyžarovania je nutné fyzicky hýbať s celým systémom. Naproti tomu kruhové anténne fázové systémy sú schopné fokusácie vyžarovaného elektromagnetického poľa a navyše majú tú výhodu, že v prípade potreby zmeny smeru vyžarovania stačí cyklicky presunúť jednotlivé fázy na anténach. Vyžarovacia charakteristika sa pootočí v rovnakom smere, v akom sa presunuli fázy na anténach.

Výsledky prezentované v mojej práci môžu poslúžiť ako dôkaz možnosti dosiahnuť fokusáciu elektromagnetického poľa vyžarovaného anténnym fázovým systémom, kde rozpätie medzi jeho anténami je okolo stotiny vlnovej dĺžky vyžarovanej energie. Toto by bolo možné použiť pre budovanie anténnych fázových systémov pre bezdrôtový prenos elektrickej energie, založený na nižších frekvenciách. Pri vhodnom frekvenčnom pásme nižších frekvencií by bolo možné použiť na väčšie vzdialenosti oproti systémom založeným na indukčnej alebo rezonančnej väzbe a zároveň nebude až tak škodlivý ako mikrovlnné pásmo. Anténny fázový systém skonštruovaný po zvážení spomenutých vlastností by ako jedno z možných uplatnení bolo možné nasadiť v mestách za účelom bezdrôtového nabíjania elektricky poháňaných vozidiel. Pričom anténny fázový systém by bol schopný smerovať energiu ku konkrétnym vozidlám. Klient by nemusel vyhľadávať nabíjaciu stanicu a auto pripájať drôtovo. Stačilo by len auto zaparkovať na vyhradenom parkovisku, kde by najskôr prebehla bezdrôtová komunikácia medzi autom a nabíjacím systémom

Zoznam publikačnej činnosti autora

Pracovisko: E040 - FEI. Ústav elektrotechniky Autor: Vavrík, Ferdinand Rok vydania: 2000~2019 Ďalšie spracovanie: NOT e~f

Zobrazovací formát: Zoznam dokumentov podľa ISO690 Štatistika: Kategória publikačnej činnosti Triedenie: Kategória publikačnej činnosti, Meno prvého autora Voľby: Číslovanie kategórií publ.činnosti, Číslovanie ohlasu poradovými číslami, Odsadenie ohlasov doprava, Zobraziť iba ohlasy daného roku, Zobraziť len ohlasy danej kategórie, Zobraziť ohlasy len z danej databázy, Podčiarknuť domácich autorov, Nezobrazovať číslo archívnej kópie, Odsadenie celého záznamu doprava, Skryť červené chybové správy, Rozšírený výpis selekčných kritérií

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADN01 <u>VAVRÍK, Ferdinand</u> - <u>HALLON, Jozef</u>. Frequency shift of the minimal magnitude of reflection coefficient in antenna array. In *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 70, No. 1 (2019), s. 64-68. ISSN 1335-3632.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 VAVRÍK, Ferdinand BALLO, Peter <u>HARŤANSKÝ, René</u>. Fázovo riadené radary. In ŠVOČ 2014 [elektronický zdroj] : Zborník vybraných prác 2014, Bratislava, 29. apríl 2014. 1.vyd. Bratislava : FEI STU, 2014, CD-ROM, s. 125-130. ISBN 978-80-227-5154-5.
- AFD02 <u>VAVRÍK, Ferdinand</u>. Phased array radar. In *ELITECH'16 [elektronický zdroj] : 18th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. June 8, 2016.* 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4561-1.
- AFD03 <u>VAVRÍK, Ferdinand</u>. 3-elements printed Yagi-Uda antenna : Design, Technical implementation and testing. In *ELITECH'17 [elektronický zdroj] : 19th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 24, 2017.* 1. ed. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, [4] p. ISBN 978-80-227-4686-1.
- AFD04 <u>VAVRÍK, Ferdinand</u>. Testing of 3-elements printed Yagi-Uda antenna. In *Measurement 2017 : 11th International conference on measurement*. *Smolenice, Slovakia, May 29-31, 2017*. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2017, S. 143-146. ISBN 978-80-972629-0-7. V databáze: IEEE.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEE01 <u>VAVRÍK, Ferdinand</u>. Design of phased array radar: Effects caused by positioning of radar elements. In *International interdisciplinary PhD* workshop 2016 : Brno, Czech Republic. September 12-15, 2016. Brno : University of Technology, 2016, S. 130-134. ISBN 978-80-214-5387-6.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADN	Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS	1
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	4
BEE	Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)	1
Súčet		6

Použitá literatúra

- BALANIS C. A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd edition, Canada, 2005. 1136 p. ISBN 0-471-66782-X
- [2] STUTZMAN L. W. THIELE A. G. Antenna Theory and Design, 3rd edition, 2012. 843 p. ISBN 978-0-470-57664-9
- [3] MAILLOUX J. R. Phased array antenna handbook. 2nd edition, 2005. ISBN 1-58053-689-1
- [4] Josefsson L. a Persson P. Conformal Array Antenna Theory and Design. 2006. ISBN-13 978-0-471-46584-3; ISBN- 10 0-471-46584-4
- [5] TECSOR I. Mutual coupling effects and optimum architecture of a sparse antenna array. Diplomová práca, Štokholm, Švédsko 2013.
- [6] Hema S., Sneha H. L., Jha R. M. Mutual Coupling in Phased Arrays: A Review. Publikované v: International Journal of Antennas and Propagation. Volume 2013, Article ID 348123.
- [7] A. Osama; A.-R. Sebak. *Mutual Coupling Effect on Ultrawideband Linear Antenna Array Performance*, In International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2011, Article ID 142581.
- [8] NIKNEJAD M. A., HASHEMI H., mm-Wave silicon technology: 60 GHz and beyond. 2007, 297 strán, ISBN 978-0-387-76558-7
- [9] Gomes de A. H. *Huygens-Fresnel Principle in Superspace*. Published in: Cornell University Library pod číslom: arXiv:gr-qc/0602092
- [10] MALÝ, P. *Optika*. Praha: Univerzita Karlova, 2008. 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0
- [11] VAVRÍK, F. Masívne paralelné numerické simulácie elektromagnetických polí. Diplomová práca, Bratislava: FEI STU, 2015. 69 s.
- [12] DELANEY W., From vision to reality 50+ years of phased array development. Publikované v: IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST), 18. až 21. októbra 2016.
- [13] STAPLETON S. P., QUON G. S., A cellular base station phased array antenna system. Publikované v: IEEE 43rd Vehicular Technology Conference. 18. až 20. Máj, 1993.
- [14] IVANOV A., TEPLYAKOV V., KALININ V., Mobile communication system with a hybrid phased array antenna system. Publikované v: IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 26. až 29. Septembra, 2015
- [15] WARSHOWSKY J., KULISAN C., VAIL D., 20 GHz phased array antenna for GEO satellite communications. Publikované v: MILCOM 2000 Proceedings. 21st Century Military Communications. Architectures and Technologies for Information Superiority (Cat. No.00CH37155), 22. až 25. Októbra, 2000
- [16] ZHANG H.-T., WANG W., JIN M.-P., LU X.-P., An active phased array antenna for broadband mobile satellite communication at ka-band. Publikované v: CIE International Conference on Radar (RADAR), 10. až 13. októbra 2016

- [17] BUCCI O. M., CROCCO L., SCAPATICCI R., BELLIZZI G., On the Design o Phased Arrays for Medical Applications. Publikované v: Proceedings of the IEEE, Vol. 104, Issue: 3, 2016, str. 633 až 648
- [18] KU B-H., SCHMALENBERG P., KIM S. Y., KIM C-Y., a ostatní autori, A 16element 77–81-GHz phased array for automotive radars with ±50° beamscanning capabilities. Publikované v: IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2. – 7. Jún, 2013
- [19] YAN J., WANG H., YIN J., YU C., HONG W., *Planar series-fed antenna array for 77 GHz automotive radar*. Publikované v: Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 16. až 19. október 2017
- [20] PATOLE S. M., TORLAK M., WANG D., ALI M., Automotive radars: A review of signal processing techniques. Publikované v: IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 34, Issue: 2, 2017, str. 22 až 35
- [21] SHINOHARA N., Beam Efficiency of Wireless Power Transmission via Radio Waves from Short Range to Long Range. Publikované v: Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 10, NO. 4, 2010.
- [22] SHINOHARA N., Power without wires. Publikované v: IEEE Microwave Magazine, Vol. 12, Issue 7, 2011, str. 64 – 73.
- [23] Brown C. W. The history of Power Transmission by Radio Waves. Published in: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MIT-32, No. 9, September 1984
- [24] Brown C. W. *The history of wireless power transmission*. Published in: Solar Energy, Vol. 56, No. 1, pp. 3-21, 1996
- [25] TOMAR A., GUPTA S., Wireless power Transmission: Applications and Components. Publikované v: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1, Issue 5, 2012
- [26] Dickinson M. R. Power in the Sky. Published in: IEEE Microwave magazine. 6. March 2013
- [27] SASAKI S., TANAKA K. MAKI K-I., *Microwave Power Transmission Technologies for Solar Power Satellites.* Publikované v: Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 6, 2013.
- [28] SHINOHARA N., KUBO Y., TONOMURA H., Wireless charging for electric vehicle with microwaves. Publikované v: 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2013
- [29] *AD9959, 4-Channel, 500 MSPS DDS with 10-Bit DACs*. Datasheet dostupný na stránke výrobcu: http://www.analog.com/en/index.html
- [30] INA-02184. Datasheet dostupný na stránke: https://www.alldatasheet.com/
- [31] *AD9959/PCB*. Datasheet dostupný na stránke výrobcu: http://www.analog.com/en/index.html
- [32] TURÁN, J. VAVRA, Š. Antény a šírenie elektromagnetických vĺn. Bratislava: Alfa, 1989. 423 s. ISBN 80-05-00131-2