

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANTÉNNÍ ŘADA PRO URČOVÁNÍ POZICE LETADEL

ANTENNA ARRAY TO DETERMINE POSITIONS OF AIRPLANES

DIPLOMOVÁ PRÁCE MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE AUTHOR

Bc. Pavel Zelenka

VEDOUCÍ PRÁCE SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektronika a sdělovací technika

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Pavel Zelenka *Ročník:* 2

ID: 170394 *Akademický rok:* 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Anténní řada pro určování pozice letadel

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte anténní řadu pro práci v pásmu 1025 až 1150 MHz. Anténní řada je určena pro pasivní radiolokační systém, využívající informace o úhlu příchodu signálu. Anténní element navrhované řady musí vykazovat azimutální úhel minimálně 90° a zisk větší než 7 dB.

Anténní řadu navrhněte pro různé typy substrátů, numericky ji modelujte v programu CST Microwave Studio a optimalizujte z hlediska elektrotechnických parametrů (impedanční šířka pásma, zisk, vyzařovací charakteristika). Optimalizované antény porovnejte z výkonnostního, ekonomického a mechanického hlediska. Vybranou verzi antény vyrobte a experimentálně ověřte její parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BAN-LEONG OOI, SHEN QIN a MOOK-SENG LEONG. Novel design of broad-band stacked patch antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, vol. 50, no. 10, p. 1391-1395.

[2] SANCHEZ-OLIVARES, P.; SANCHEZ-DANCAUSA, P.P.; MASA-CAMPOS, J.L.; Circularly conformal patch array antenna with omnidirectional or electronically switched directive beam, IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, vol. 11, no. 15, p. 2253-2259.

[3] BALANIS, C. A.; Antenna Theory: Analysis and Design, 3 Edition, Hoboken: J. Wiley & Sons, 2005, ISBN: 0-471-66782-X.

Termín zadání: 4.2.2019

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida Konzultant: Ing. Pavel Kopeček Termín odevzdání: 16.5.2019

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D. předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout anténní řadu pro systém určování pozice letadel na letišti. Systém využívá frekvence 1030 MHz a 1090 MHz. Anténu bude rovněž používat směroměrný systém DME/TACAN, který pracuje v pásmu 1025 MHz až 1150 MHz. Požadovaná impedanční šířka pásma anténní řady je tedy 125 MHz, tj. 1025 MHz až 1150 MHz. Teoretická část této práce analyzuje vlastnosti flíčkové antény z hlediska použití a rozebírá možnosti rozšíření impedančního pásma. Praktická část je zaměřena na vytvoření několika různých numerických modelů širokopásmové vrstvené antény. Dále jsou srovnány vlastnosti 3- a 4-prvkové anténní řady. V závěru jsou shrnuty výsledky práce.

Klíčová slova

Impedanční šířka pásma, obdélníková flíčková anténa, flíčková anténa ve tvaru E, vícevrstvá flíčková anténa.

Abstract

The project is aimed to design an antenna array for an aircraft positioning system at an airport. The system operates at frequencies 1030 MHz and 1090 MHz. The antenna is also used by the DME/TACAN system operating in frequency range from 1025 MHz to 1150 MHz. The required impedance bandwidth of the antenna array is 125 MHz, i.ee from 1025 MHz to 1150 MHz. The theoretical part of the thesis analyses properties of different patch antennas and discusses the possibility of extending the impedance bandwidth. The practical part is focused on the development of the numerical model of the broadband stacked patch antennas. In addition, properties of the 3-element and 4-element antenna array are compared. At the end, results of the thesis are summarized.

Keywords

Impedance bandwidth, rectangular patch antenna, E-shaped patch antenna, stacked patch antenna.

Bibliografická citace:

ZELENKA, Pavel. Anténní řada pro určování pozice letadel [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118466. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zbyněk Raida.

Prohlášení

"Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Anténní řada pro určování pozice letadel jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 16. května 2019

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyňkovi Raidovi a konzultantovi Ing. Pavlovi Kopečkovi za jejich metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 16. května 2019

••••••

podpis autora

Obsah

| Sez | znam sym | bolů a zkratek | |
|-----|-----------|--|----|
| Sez | znam obrá | ázků | 9 |
| Sez | znam tabu | ılek | |
| Úv | od | | 13 |
| 1 | Multilate | erace | 14 |
| 2 | Mikropá | skové antény | 17 |
| | 2.1 | Zvětšování impedanční šířky pásma flíčkových antén | 17 |
| 3 | Model an | ntény - simulace | |
| | 3.1 | Referenční model | |
| | 3.2 | Model na substrátu Rogers | |
| | 3.3 | Model na substrátu Arlon | |
| | 3.4 | Model na substrátu CuClad | |
| | 3.5 | Směrové vlastnosti a dosah | |
| 4 | Model an | ntény - realizace, měření | |
| 5 | Anténní | řada | |
| Zá | věr | | |
| Lit | eratura | | |

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| MSS | multi-sensor surveillance system | | |
|----------------|---|--|--|
| DME | distance measuring equipment | | |
| TACAN | tactical air navigation system | | |
| SSR | secondary surveillance radar | | |
| ADS-B | automatic dependent surveillance - broadcast | | |
| TDOA | time difference of arrival | | |
| IFF | identification friend foe | | |
| MLAT | multilateration | | |
| GNSS | global navigation satellite system | | |
| DPS | deska plošných spojů | | |
| Δf | změna frekvence | | |
| f_0 | střední frekvence | | |
| $f_{\rm H}$ | horní mezní frekvence | | |
| f_L | dolní mezní frekvence | | |
| ε _r | relativní permitivita | | |
| BW | šířka pásma | | |
| Qt | celkový činitel kvality | | |
| Qrad | činitel kvality v závislosti na ztrátách vyzařování prostorové vlny | | |
| Qc | vodivostní (ohmické) ztráty | | |
| Qd | dielektrické ztráty | | |
| Qsw | ztráty způsobené šířením povrchových vln | | |
| ecdsw | vyzařovací účinnost antény | | |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| Obrázek 1 Srovnání systémů MLAT a SSR, [5] | 15 |
|---|---------|
| Obrázek 2 Cena systému MLAT, [5] | 15 |
| Obrázek 3 Typická změna šířky pásma a účinnosti pro flíčkovou anténu v záv | islosti |
| na normované výšce substrátu pro dva různé substráty [7] | 19 |
| Obrázek 4 Struktura vrstvené mikropáskové antény na dvou typech substrátu s | s E- |
| flíčkem, parazitním flíčkem a podložkou [4] | 20 |
| Obrázek 5 Model referenční antény v CST Microwave Studio | 21 |
| Obrázek 6 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11 na vstupu reference | ční |
| antény. | 21 |
| Obrázek 7 Popis rozměrů antény | 22 |
| Obrázek 8 Model antény na substrátu Rogers | 23 |
| Obrázek 9 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu neoptimaliz | ované |
| antény. | 23 |
| Obrázek 10 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11 na vstupu | |
| optimalizované antény | 24 |
| Obrázek 11 Kmitočtový průběh zisku optimalizované antény | 25 |
| Obrázek 12 Kmitočtový průběh reálné a imaginární části vstupní impedance | |
| optimalizované antény | 25 |
| Obrázek 13 3D zobrazení velikosti realizovaného zisku antény | |
| Obrázek 14 Rozložení intenzity el. pole v dB na E-flíčku | 27 |
| Obrázek 15 Model antény na substrátu Arlon, distanční a zkratovací sloupky | |
| Obrázek 16 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11, Arlon | |
| Obrázek 17 Realizovaný zisk v závislosti na kmitočtu, Arlon | 29 |
| Obrázek 18 Kmitočtový průběh reálné a imaginární části vstupní impedance, A | Arlon |
| | 29 |
| Obrázek 19 3D zobrazení velikosti realizovaného zisku, Arlon | 30 |
| Obrázek 20 Model se substrátem CuClad, radom (nahoře), vnitřní konstrukce | (dole) |
| | 31 |
| Obrázek 21 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11, CuClad | 32 |
| Obrázek 22 Realizovaný zisk v závislosti na kmitočtu, CuClad | 32 |

| Obrázek 23 Kmitočtový průběh reálné a imaginární části vstupní impedance, | |
|--|--|
| CuClad | 33 |
| Obrázek 24 3D zobrazení velikosti realizovaného zisku, CuClad | 33 |
| Obrázek 25 Srovnání azimutálních vyzařovacích char. všech modelů | 34 |
| Obrázek 26 Srovnání elevačních vyzařovacích char. všech modelů | 34 |
| Obrázek 27 Části komunikačního řetězce, [13] | 35 |
| Obrázek 28 Azimutální a elevační dosah antény | 36 |
| Obrázek 29 Vyrobená anténa s radomem (nahoře), polystyrenová výplň (dole) | 37 |
| Obrázek 30 Horní substrát s parazitním flíčkem | 37 |
| Obrázek 31 Spodní substrát s E-flíčkem | 38 |
| Obrázek 32 Detail E-flíčku se stejnosměrnými zkratovacími sloupky a napájecí | |
| sondou | 38 |
| Obrázek 33 Detail ukotvení zkratovacích sloupků a napájecí sondy | 38 |
| Obrázek 34 Měřicí anténa ve stíněné komoře | 39 |
| Obrázek 35 Motor pro uchycení a napájení měřené antény a její rotaci | 39 |
| Obrázek 36 Montážní stojan pro měřenou anténu (vlevo), výpočetní technika | |
| | |
| (vpravo) | 40 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru | 40 40 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci | 40 40 41 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci | 40 40 41 41 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény | 40 40 41 41 42 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény | 40 40 41 41 42 43 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora | 40 40 41 41 42 43 44 |
| (vpravo) | 40 40 41 41 42 43 44 44 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková | 40 40 41 41 42 43 44 44 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková konfigurace (dole) | 40 40 41 41 42 43 44 44 |
| Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková konfigurace (dole) Obrázek 45 Srovnání směrových diagramů časového a frekvenčního řešiče | 40 40 41 41 42 43 44 44 |
| (vpravo) Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková konfigurace (dole) Obrázek 45 Srovnání směrových diagramů časového a frekvenčního řešiče (3-prvková konfigurace) | 40 40 41 42 43 43 44 45 45 |
| Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková konfigurace (dole) Obrázek 45 Srovnání směrových diagramů časového a frekvenčního řešiče (3-prvková konfigurace) Obrázek 46 Srovnání azimutálního pokrytí pro 3- a 4-prvkovou konfiguraci | 40 40 41 41 42 43 43 44 44 45 46 46 |
| (vpravo) | 40 41 41 42 43 43 44 44 45 46 46 47 |
| Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková konfigurace (dole) Obrázek 45 Srovnání směrových diagramů časového a frekvenčního řešiče (3-prvková konfigurace) Obrázek 46 Srovnání azimutálního pokrytí pro 3- a 4-prvkovou konfiguraci Obrázek 48 Anténa s reflektory | 40 41 41 42 43 43 44 44 45 46 46 47 48 |

| Obrázek 50 Azimutální dosah anténní řady | . 49 |
|--|------|
| Obrázek 51 Elevační dosah anténní řady | . 49 |

SEZNAM TABULEK

| Tabulka 1 Rozměry referenční a nové antény (mm) | 22 |
|--|----|
| Tabulka 2 Srovnání rozměrů anténního prvku před a po optimalizaci (mm) | 24 |
| Tabulka 3 Rozměry antény na substrátu Arlon (mm) | 28 |
| Tabulka 4 Rozměry antény na substrátu CuClad (mm) | 31 |
| Tabulka 5 Vstupní parametry komunikačního řetězce | 35 |

ÚVOD

Cílem této práce je analýza možného použití širokopásmových flíčkových antén pro sledování pohybu letadel v okolí letišť a na letištních plochách pro firmu ERA a. s. Aktuálním tématem v oblasti leteckého provozu je totiž přechod radiolokačních systémů na bázi primárních a sekundárních sledovacích radarů k levnějším produktům. Primární a sekundární radary jsou totiž velmi drahé jak na pořízení, tak i na údržbu. Navíc je tato technologie již zastaralá a neumožňuje použití v hornatých oblastech.

Anténa navrhovaná v této práci bude součástí multilateračního systému MSS, který je mnohonásobně levnější na pořízení i provoz. Je s ním také možno obsáhnout oblasti, které by radar nebyl schopný pokrýt. Systémy MSS a principy multilaterace jsou blíže popsány v kapitole 1.

Požadavkem je, aby flíčková anténa pracovala na frekvencích 1030 MHz a 1090 MHz, což jsou hlavní kmitočty sloužící pro komunikaci mezi letištěm a letadlem i v sekundárních radarových systémech. Je tedy zachována vzájemná kompatibilita. Anténa by dále měla být schopna pracovat se systém DME/TACAN, který využívá pásmo 1025 - 1150 MHz. Celková šířka pracovního pásma je tedy určena tímto rozsahem 125 MHz.

TACAN je neautonomní radiolokační systém blízké navigace, který je využíván především v armádní sféře, nicméně uplatňuje se i v civilním provozu. Zároveň se ve většině případů kombinuje s dalšími systémy, např. se zmíněným dálkoměrným systémem DME, který udává šikmou dálku mezi palubním dotazovačem a pozemním odpovídačem [1], [2].

Při návrhu antény budou zohledněny jak výrobní náklady, tak i nároky na použití antény ve venkovních prostorách, zejména odolnost vůči povětrnostním podmínkám. Výsledné anténní pole by mělo být všesměrové v horizontální rovině s vertikální polarizací.

Na začátku této práce jsou uvedeny základní úvahy s ohledem na použití antény. Dále jsou popsány vlastnosti mikropáskových antén a jsou zkoumány jejich modifikace, které napomůžou ke zvětšení šířky pásma na požadovaný rozsah. Poté se práce zabývá vytvořením modelu jednoho anténního elementu, jehož vlastnosti budou splňovat zadaná kritéria. Pro tento účel byla převzata anténa z [3], [4], která byla upravena pro práci na nižší frekvenci. Dalším krokem je optimalizace této antény v rámci tří modelů na různých substrátech spolu s porovnáním vlastností 3- a 4-prvkového systému.

V závěru této práce jsou zhodnoceny všechny dosažené výsledky.

1 Multilaterace

V dnešním světě je převážná většina veškerého monitoringu letového provozu prováděna sekundárními pozemními radary (SSR) a radarovými transpondéry umístěnými v letadlech. SSR používají nepřetržitě se otáčející anténu, která ozařuje okolní vzdušný prostor úzkým rádiovým paprskem, který vysílá "dotazovací" signály. Když paprsek dopadne na letadlo, resp. jeho přijímač, jeho odpovídač (transpondér) pošle zpět kódovanou odpověď, která obsahuje různé parametry jako identifikaci letadla, nadmořskou výšku a další kódované informace v závislosti na typu transpondéru. [5], [6]

Systémy sekundárního radaru za posledních 50 let zaznamenaly mnoho vylepšení, nicméně technologie jako taková se nemění a zůstává od dob druhé světové války neměnná. Mnozí se domnívají, že jeho další rozvoj je omezený, a vysoké náklady na pořízení, instalaci a údržbu jsou značné. Existují také značná omezení pokrytí a kapacity vyplývající z problémů souvisejících s terénem v důsledku překážek jako jsou vysoké hory a budovy. [5], [6]

Z tohoto důvodu se z těchto systémů přechází na novější systémy sledování leteckého provozu jako je MSS (multi-sensor surveillance system). Ten v sobě kombinuje principy multilaterace a ADS-B. Využívá se při letištním sledování, přesném přistávání, pro přesné měření výšky letadel a vytváření naváděcích oblastí a rozsáhlých sledovaných území. Navrhovaná anténa je určena pro použití v nové řadě systému MSS s názvem NEO. Jedná se o méně robustní řešení pro využití v místech s dobrou infrastrukturou, s nižšími náklady na pořízení i provoz, sloužící pro monitorování pohybu letadel na povrchu letiště a se systémy dalekého pokrytí. [5], [6]

Multilaterace je technologie, která byla z počátku vyvinuta pro vojenské účely, aby přesně lokalizovala letadla pomocí metody známé jako Time Difference of Arrival (TDOA). Tato metoda využívá rozdílného času příchodu signálu k jednotlivým přijímacím stanicím a princip hyperbolického určení místa příchodu signálu. Hyperbola je totiž množinou bodů v rovině s konstantním rozdílem vzdáleností od dvou pevných ohnisek (stanic), v praxi je však pro přesnější určení polohy využíváno více stanic. [5], [6]

Multilaterace využívá řadu pozemních stanic, které jsou strategicky rozmístěny v prostoru např. v okolí letiště, jeho terminálů nebo širší oblasti, která pokrývá větší okolní vzdušný prostor. Tyto jednotky zachytávají signály s "odpověďmi", typicky na dotazovací signály vysílané z lokální SSR nebo multilaterační stanice. Vzhledem k tomu, že jednotlivá letadla se nacházejí v různých vzdálenostech od každé z pozemních stanic, jejich odpovědi budou přijímány každou stanicí v odlišných časech. Při použití pokročilých metod počítačového zpracování tyto individuální časové rozdíly umožňují přesně vypočítat polohu letadla. [5], [6]

Multilaterace navíc nevyžaduje žádné další vybavení pro avioniku letadla, protože využívá odpovědí transpondérů módu A, C a S, stejně jako vojenské IFF a transpondéry ADS-B. Navíc i když se radarové a multilaterační "cíle" na obrazovce jeví jako identické, velmi vysoká rychlost aktualizace cílů (každou sekundu) získaných pomocí multilaterace vede k jejich rychlému rozpoznání a plynulému pohybu po obrazovce, ve srovnání se 4 - 12 sekundovými "skoky" radarových cílů. [5], [6]



Obrázek 1 Srovnání systémů MLAT a SSR, [5]

Díky tomu, že pozemní stanice multilateračního systému jsou rozmístěny v prostoru ve větším počtu, nejsou kladeny tak vysoké požadavky na jejich výkon a celkovou technologickou komplexnost ve srovnání se systémy sekundárního radaru, což má za následek mnohonásobně nižší cenu tohoto systému a nižší náklady na jeho údržbu (viz. obr. 2). Další výhodou je také fakt, že systémem pozemních stanic lze sledovat cíle i v oblastech, které by sekundární radar nebyl schopen pokrýt, např. prostor za horou, ve městech s vysokými budovami apod. [5], [6]



Obrázek 2 Cena systému MLAT, [5]

Druhým zmíněným systémem je ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast). Tento systém je závislý na globálním družicovém polohovém systému GNSS a vysílá automaticky data leteckým i pozemním přístrojům ke zpracování

pomocí S-módové zprávy. Ta je mimo jiné také vstupním signálem pro multilaterační systémy. [5], [6]

2 Mikropáskové antény

Mikropáskové antény se skládají z kovového flíčku na substrátu s vodivou zemní deskou. Flíček může mít mnoho různých konfigurací, nicméně obdélníkové a kruhové flíčky jsou nejoblíbenější díky jejich snadné analýze, výrobě a dobrým vyzařovacím vlastnostem. Mikropáskové antény jsou nízkoprofilové, přizpůsobitelné rovinným i zakřiveným povrchům, jsou jednoduché a nenákladné na výrobu (lze využít DPS technologie), jsou mechanicky robustní při montáži na pevné povrchy a velmi flexibilní z hlediska rezonanční frekvence, polarizace, vyzařovací charakteristiky a impedance. Tyto antény lze montovat např. na povrchy letadel, družic, balistických střel, automobilů a do mobilních telefonů.

Hlavní nevýhody mikropáskových antén jsou však jejich nízká účinnost, zatížitelnosti nízkým výkonem, vysoký činitel kvality Q, špatná čistota polarizace, parazitní vyzařování a také velmi úzké pásmo impedančního přizpůsobení, které bývá typicky jen několik procent [7].

2.1 Zvětšování impedanční šířky pásma flíčkových antén

V některých aplikacích jsou úzká impedanční pásma žádoucí, nicméně, pro širokopásmové aplikace je třeba impedanční pásmo rozšířit. Toho lze dosáhnou např. zvýšením výšky substrátu. Vyšším substrátem lze zvýšit účinnost (až na 90 %, pokud nebereme v úvahu povrchové vlny) a impedanční šířku pásma (až na 35 %). Nicméně, s rostoucí výškou substrátu vznikají povrchové vlny, které jsou nežádoucí, protože ubírají energii z celkové dostupné energie pro přímé záření. Povrchové vlny se pohybují uvnitř substrátu a degradují vyzařovací charakteristiky antény. Povrchové vlny však mohou být při zachování velké šířky pásma eliminovány dutinami. Pro zvýšení šířky pásma lze také použít i další metody, např. skládání více vrstev substrátů na sebe [7].

Činitel kvality, šířka pásma a účinnost jsou jedny z nejdůležitějších parametrů antény, které jsou vzájemně provázány a není úplně možné je samostatně optimalizovat, aniž by se navzájem neovlivňovaly. Proto je nutný vzájemný kompromis pro dosažení optimálního výkonu antény. [7]

Činitel jakosti představuje ztráty antény. Na celkových ztrátách, a tedy velikosti činitele jakosti Q_t , se obvykle podílejí ztráty vyzařování prostorové vlny Q_{rad} , vodivostní (ohmické) Q_c , dielektrické Q_d a ztráty způsobené šířením povrchových vln Q_{sw} . Činitel jakosti se pak spočítá dle vzorce [7]

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}}$$
(1)

U velmi tenkých substrátů jsou ztráty způsobené povrchovými vlnami velmi malé a můžou být zanedbány. Pro silnější substráty je však třeba je brát v úvahu [7].

Impedanční šířka pásma antény je nepřímo úměrná celkovému činiteli jakosti Q_t antény a je definována jako [7]

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \tag{2}$$

kde f_0 značí střední kmitočet.

Obecně lze říct, že šířka pásma BW je úměrná relativní permitivitě substrátu ε_r dle vzorce [7]

$$BW \sim \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3}$$

Typická změna šířky pásma pro flíčkovou anténu v závislosti na normované výšce substrátu pro dva substráty s různou relativní permitivitou ε_r je zobrazena na obrázku 1. Je zřejmé, že čím větší je výška substrátu, tím větší je i šířka pásma. Celkovou šířku pásma pak spočítáme podle vzorce [7]

$$BW[\%] = 100 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_0} \tag{4}$$

kde f_H je horní mezní kmitočet, f_L je dolní mezní kmitočet a f_0 je střední kmitočet [7].

Vyzařovací účinnost antény je definována jako poměr vyzářeného a vstupního výkonu. Může být také vyjádřena v závislosti na činiteli jakosti, a to [7]

$$e_{cdsw} = \frac{1/Q_{rad}}{1/Q_t} = \frac{Q_t}{Q_{rad}}$$
(5)

kde Q_t je celkový činitel jakosti a Q_{rad} je činitel jakosti v závislosti na ztrátách vyzařování prostorové vlny. Typická změna účinnosti jako funkce výšky substrátu pro flíčkovou anténu se dvěma různými substráty je zobrazena na obr. 3 [7].



Obrázek 3 Typická změna šířky pásma a účinnosti pro flíčkovou anténu v závislosti na normované výšce substrátu pro dva různé substráty [7]

3 Model antény - simulace

V rámci této práce byly vytvořeny celkem 4 numerické modely. První model je vytvořen z dat dostupných ve [3], [4] a slouží pro ověření správnosti dat uváděných v této literatuře, a také jako reference a výchozí bod pro návrh zbylých tří modelů. Každý model je iterací toho předchozího a zahrnuje řešení problémů, které se během návrhu anténní prvku vyskytly, a požadavků firmy.

Zvolená širokopásmová anténa je tvořena dvěma substráty. První substrát nese E-flíček, který zvětšuje frekvenční pásmo oproti běžné obdélníkové flíčkové anténě o zhruba 30 %. Druhý substrát obsahuje klasický obdélníkový flíček, jehož účelem je vybudit druhý rezonanční kmitočet v blízkosti rezonančního kmitočtu E-flíčku, díky kterému dochází k dalšímu rozšíření pásma o zhruba 5 %. Mezi těmito substráty a zemní deskou jsou pak dvě vzduchové mezery o velké šířce, které také pomáhají s rozšířením pásma, a zároveň minimalizují tvorbu povrchových vln, jak bylo řečeno v kapitole 2.1. O konečné navýšení šířky pásma se stará podložka (washer) na spodní straně horního substrátu, která kompenzuje parazitní indukčnost napájecí koaxiální sondy antény. Nákres výsledné struktury lze vidět na obr. 4 [4].



Obrázek 4 Struktura vrstvené mikropáskové antény na dvou typech substrátu s E-flíčkem, parazitním flíčkem a podložkou [4].

3.1 Referenční model

Jelikož pro návrh této antény nejsou k dispozici přesné návrhové vzorce, byly počáteční rozměry antény převzaty z [3]. Z nich byl vytvořen model antény v CST Microwave Studio (obr. 5). Vytvořený model sloužil k ověření a získání referenčních parametrů antény. Činitel odrazu na vstupu referenční antény lze vidět na obr. 6.



Obrázek 5 Model referenční antény v CST Microwave Studio.



Obrázek 6 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11 na vstupu referenční antény.

3.2 Model na substrátu Rogers

U toho modelu zůstal zachován původní substrát Rogers RO4725JXR [8] s ε_r = 2,55. Rozměry referenční antény byly přepočítány na násobky vlnové délky původní pracovní frekvence. Následně byly rozměry převedeny na vlnovou délku střední frekvence dle zadání. Popis rozměrů je uveden na obr. 7, srovnání původních a přepočítaných rozměrů lze vidět v tab. 1.



Obrázek 7 Popis rozměrů antény

| frekvence | 4,7 GHz | k·λ | 1,08 GHz |
|--------------|---------|-------|---------------|
| h1 | 0,51 | 0,008 | 2,22 |
| h2 | 5,74 | 0,090 | 24,98 |
| h3 | 2,65 | 0,042 | 11,53 |
| zemní plocha | 100x100 | 1,567 | 435,19x435,19 |
| А | 19,10 | 0,299 | 83,12 |
| В | 19,30 | 0,302 | 83,99 |
| С | 40,41 | 0,633 | 175,86 |
| D | 27,70 | 0,434 | 120,55 |
| Ε | 13,71 | 0,215 | 59,66 |
| F | 17,00 | 0,266 | 73,98 |
| G | 5,35 | 0,084 | 23,28 |
| Н | 12,35 | 0,193 | 53,75 |
| 1 | 2,47 | 0,039 | 10,75 |
| J | 1,50 | 0,024 | 6,53 |
| К | 16,21 | 0,254 | 70,54 |

Tabulka 1 Rozměry referenční a nové antény (mm)

Pro dosažení požadované šířky pásma na dané frekvenci byly zvoleny jiné rozměry substrátu, konkrétně tloušťka 1,542 mm s velikostí panelu 305 x 457 mm. Na obr. 8 je zobrazen model antény v programu CST. Počáteční činitel odrazu S₁₁ je na obr. 9. Z toho lze vidět, že anténa s takto přepočítanými rozměry nemá ideální vlastnosti, zejména není dostatečně přizpůsobena v daném kmitočtovém rozmezí. Proto byla provedena optimalizace antény. Na lepší přizpůsobení antény mají vliv zejména vzájemné vzdálenosti substrátů a zemnicí desky, dále poloha napájecí koaxiální sondy a šířky a délky flíčků. V rámci optimalizace byla délka a šířka udržována v poměru 1,4 - 1,5 pro nejlepší přizpůsobení [9]. Upravena byla také výpočetní síť modelu. Došlo k jejímu lokálnímu zjemnění uvnitř obou substrátů a dále nad oběma flíčky, aby řešič lépe postihnul šíření vlny v těchto kritických místech.



Obrázek 8 Model antény na substrátu Rogers



Obrázek 9 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu neoptimalizované antény.

Rozměry optimalizovaného modelu lze vidět v tab. 2, vlastnosti optimalizované antény (činitel odrazu, zisk a vstupní impedance) lze vidět na obr. 10-12.

| | předchozí | optimalizované | |
|--------------|---------------|----------------|--|
| h1 | 2,22 | 1,542 | |
| h2 | 24,98 | 9,74 | |
| h3 | 11,53 | 6,65 | |
| zemní plocha | 435,19x435,19 | 457x305 | |
| A | 83,12 | 96,58 | |
| В | 83,99 | 96,78 | |
| С | 175,86 | 177,90 | |
| D | 120,55 | 120,00 | |
| E | 59,66 | 64,57 | |
| F | 73,98 | 74,57 | |
| G | 23,28 | 19,60 | |
| Н | 53,75 | 57,81 | |
| <u> </u> | 10,75 | 19,10 | |
| J | 6,53 | 5,86 | |
| К | 70,54 | 65,01 | |

Tabulka 2 Srovnání rozměrů anténního prvku před a po optimalizaci (mm)



Obrázek 10 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11 na vstupu optimalizované antény.



Obrázek 11 Kmitočtový průběh zisku optimalizované antény



Obrázek 12 Kmitočtový průběh reálné a imaginární části vstupní impedance optimalizované antény

Z grafů činitele odrazu a vstupní impedance je vidět, že anténa je dobře přizpůsobena na 50 Ω v celé požadované šířce pásma. Dále byl splněn požadavek na velikost zisku jednoho anténního elementu, ta se pohybuje v celém pásmu okolo 9 dB.

Na obr. 13 lze pozorovat intenzitu vyzařování antény ve 3D prostoru.



Obrázek 13 3D zobrazení velikosti realizovaného zisku antény

3.3 Model na substrátu Arlon

Z dosavadních výsledků vzešel z firmy požadavek na výběr levnějšího a dostupnějšího substrátu. Proto byl zvolen substrát Arlon 25N s ε_r = 3,38, který je relativně levný, dostupný a nabízí dostačující přesnost parametrů garantovanou výrobcem [10]. Z důvodu obvyklé výrobní přesnosti antén 100 µm byly také dosavadní parametry antény zaokrouhleny na tuto hodnotu. Vzhledem k velikosti vlnové délky λ = 0,28 m při frekvenci f = 1,09 GHz ze zadaného rozsahu tento krok téměř neovlivní vlastnosti antény, navíc z důvodu změny substrátu je nutná nová optimalizace.

V tomto modelu byl také zohledněn vliv atmosférických jevů na samotnou anténu. Při umístění antény ve vzduchu ve výšce desítek metrů může docházet v atmosféře k vysokým přepětím, které jsou nebezpečné jak pro samotnou anténu, tak hlavně pro zařízení mnohonásobně dražší, ke kterým je anténa připojena. Proto je nutné v anténě realizovat stejnosměrný zkrat mezi zemnicí plochou a E-flíčkem. Ten je umístěn do oblasti s nejnižší intenzitou pole na E-flíčku tak, aby nedošlo k ovlivnění přizpůsobení antény. V tomto případě se místo nachází na obou stranách E-flíčku (viz. obr. 14) a je proto nutné vytvořit zkraty dva.



Obrázek 14 Rozložení intenzity el. pole v dB na E-flíčku

Dále je nutné brát v potaz vibrace samotných vrstev antény vlivem povětrnostních jevů. Pokud by totiž anténa byla přichycena pouze v rozích distančními sloupky, mohlo by při velikosti navrhované antény (téměř 0,5 m) dojít k rozkmitu ve středech jednotlivých substrátových vrstev až o jednotky mm a utržení napájecího vodiče. Z tohoto důvodu byla u modelu vyplněna vzduchová mezera polyuretanovou pěnou, která má podobné vlastnosti jako vzduch ($\varepsilon_r = 1,08$), nicméně dodá substrátům potřebnou fyzickou podporu. Spolu s PU pěnou napomáhá celkové pevnosti antény také stejnosměrný zkrat na okrajích E-flíčku. PU pěna dále napomáhá teplotní stabilizaci antény. Vytváří totiž tepelnou izolaci, která v chladném počasí částečně zabrání nežádoucímu smršťování jednotlivých prvků, a naopak při vystavení vysokým teplotám vlivem přímého vystavení slunci zabrání přehřívání antény, jelikož teploty uvnitř antény díky tomu mohou přesahovat i 100 °C a mohlo by dojít k jejímu celkovému zničení.

Výsledný model je vidět na obr. 15, rozměry antény pak v tab. 3. Výsledné parametry optimalizované antény jsou na obr. 16-18.



Obrázek 15 Model antény na substrátu Arlon, distanční a zkratovací sloupky

| h1 | 1,542 | G | 19,6 |
|--------------|---------|--------------------|------|
| h2 | 9,74 | Н | 57,8 |
| h3 | 6,65 | 1 | 19,1 |
| zemní plocha | 457x305 | J | 5,9 |
| А | 120 | К | 61 |
| В | 80 | E r arlon | 3,38 |
| С | 174 | E r PU pěna | 1,08 |
| D | 116 | Ø podložky | 5,16 |
| Ε | 64,6 | Ø ss zkrat | 6 |
| F | 74,6 | Ø dist, sloupek | 6 |

Tabulka 3 Rozměry antény na substrátu Arlon (mm)



Obrázek 16 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11, Arlon



Obrázek 17 Realizovaný zisk v závislosti na kmitočtu, Arlon





Z grafů činitele odrazu a vstupní impedance lze vidět, že bylo dosaženo velice dobrého přizpůsobení, lepšího než v případě dražšího substrátu Rogers. Důvodem je lepší optimalizace využívající poznatky z předchozího modelu, a také výplň vzduchových mezer pěnou, která napomáhá k rozšíření pracovního pásma antény (viz. kapitola 2.1).



Obrázek 19 3D zobrazení velikosti realizovaného zisku, Arlon

3.4 Model na substrátu CuClad

Tento model je další iterací vývoje anténního prvku výsledné anténní řady. Na žádost firmy byl prototyp zhotoven na substrátech CuClad 217G s $\varepsilon_r = 2,17$ a CuClad 250GX s $\varepsilon_r = 2,5$ [11], které byly v rámci firmy k dispozici. Zohledněna zde byla zejména mechanická odolnost antény při nasazení v provozu.

Zemní ploše, která je zároveň hlavním konstrukčním prvkem antény, byly zdviženy její okraje. Tato úprava plní dvě funkce. První je výrazné zvýšení tuhosti prvku, druhou funkcí je zlepšení elektrických vlastností antény a dotvarování vyzařovací charakteristiky.

Dále byl z laminátu zkonstruován kryt antény (radom) sloužící k ochraně před povětrnostními vlivy, k přitlačení vnitřní pěnové výplně k anténě a k finálnímu stažení celého anténního prvku. Umístění radomu má velký vliv na celkové přizpůsobení antény, proto je velmi důležitá jeho vzdálenost od aktivních prvků antény. Optimalizací bylo dosaženo nejlepších parametrů antény při rozměrech v tab. 4. Výsledný model je zobrazen na obr. 20. Dosažené parametry optimalizované antény jsou na obr. 21-23.



Obrázek 20 Model se substrátem CuClad, radom (nahoře), vnitřní konstrukce (dole)

| h1 _{217G} | 1,542 | К | 63 |
|---------------------|---------|-----------------------------|------------|
| h2 _{250GX} | 1,14 | radom | 476x324x73 |
| h2 | 25 | t _{radom} | 1,542 |
| h3 | 12 | t _{Al vana} | 1,5 |
| zemní plocha | 476x324 | E r217G | 2,17 |
| A | 122 | E r250GX | 2,50 |
| В | 84 | Ø podložky | 5,16 |
| С | 180 | Ø ss zkrat | 6 |
| D | 121 | Ø dist, sloupek | 6 |

Tabulka 4 Rozměry antény na substrátu CuClad (mm)



Obrázek 21 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu S11, CuClad



Obrázek 22 Realizovaný zisk v závislosti na kmitočtu, CuClad



Obrázek 23 Kmitočtový průběh reálné a imaginární části vstupní impedance, CuClad

V tomto modelu již nebylo dosaženo tak dobrého přizpůsobení, jako v případě substrátu Arlon, nicméně to je způsobeno reálnými požadavky na výrobu antén, v tomto případě útlumem samotné pěnové výplně, a také laminátového krytu antény, jejichž použití je nutné z hlediska pevnosti a odolnosti antény. Přesto bylo dosaženo dostatečného zisku v celém pracovním pásmu nad 8 dB



Obrázek 24 3D zobrazení velikosti realizovaného zisku, CuClad

3.5 Směrové vlastnosti a dosah

Směrové vlastnosti již byly naznačeny v rámci každého modelu ve 3D směrovém diagramu. Pro všechny substráty byl dosažen téměř totožný tvar pole, čemuž odpovídají také grafy na obr. 25 a 26, kde jsou srovnány všechny tři anténní elementy. S pomocí těchto grafů lze také vyhodnotit dosah anténního elementu a jeho azimutální a elevační pokrytí prostoru.



Obrázek 25 Srovnání azimutálních vyzařovacích char. všech modelů



Obrázek 26 Srovnání elevačních vyzařovacích char. všech modelů

Pro výpočet realizovatelného azimutálního pokrytí je využita radiolokační rovnice pro dosah sekundárního radaru [12]:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{P_{txret}}{P'_{rxmin} \cdot L_{frx}} \cdot \frac{G_{Arx} \cdot \lambda_{ret}^2}{(4\pi)^2}}$$
(6)

kde P_{txret} - výst. výkon transpondéru, P'_{rxmin} - citlivost přijímače, L_{frx} - ztráty na kabelech, G_{Arx} - zisk přijímací antény, λ_{ret} - vlnová délka retranslační trasy.

Vstupními parametry jsou tedy vlastnosti transpondéru v letadle (výst. výkon), dále vlastnosti navrhované antény (zisk) a vlastnosti přijímače (citlivost), ke kterému je připojena. Nákres komunikačního řetězce je na obr. 27, jednotlivé vstupní parametry pak v tab. 5.



Obrázek 27 Části komunikačního řetězce, [13]

| P _{txret} | 125 W | |
|-----------------------------|------------|--|
| P ´ _{rxmin} | -90 dBm | |
| L _{frx} | 3 W | |
| G _{Arx} | obr. 25-27 | |
| λ_{ret} | 0,28 m | |

Tabulka 5 Vstupní parametry komunikačního řetězce

Z těchto údajů je tedy možné vypočítat azimutální a elevační dosah antény. Po dosazení hodnot do rovnice 6 je pro anténu na substrátu CuClad výsledný azimutální a elevační dosah zobrazen na obr. 28. Z toho lze vidět, že ve směru hlavního laloku je dosah roven 500 km. Azimutální pokrytí v 90° rádiusu ve směru hlavního laloku je dosaženo pro oblasti vzdálené méně než 300 km. Z elevační křivky lze konstatovat, že anténa je schopna zaznamenat letadla letící přímo nad ní (90°) ve výšce 20 km, požadavek byl 15 km, ten se tedy pro jeden element podařilo splnit.



Obrázek 28 Azimutální a elevační dosah antény

4 Model antény - realizace, měření

Z časových, technických i cenových důvodů byl zrealizován pouze jeden anténní element. Fotografie realizované antény lze vidět na obr. 29 - 33. Při výrobě antény bylo kvůli vysoké ceně výroby výlisku zemnicí plochy a krycího radomu nutné tyto vytvořit ručně. Hliníková vana byla vytvarována pomocí ohýbačky, radom byl slepen z jednotlivých desek laminátu FR4. Jako výplň pak byla použita polystyrenová izolace místo polyuretanové pěny.



Obrázek 29 Vyrobená anténa s radomem (nahoře), polystyrenová výplň (dole)



Obrázek 30 Horní substrát s parazitním flíčkem



Obrázek 31 Spodní substrát s E-flíčkem



Obrázek 32 Detail E-flíčku se stejnosměrnými zkratovacími sloupky a napájecí sondou



Obrázek 33 Detail ukotvení zkratovacích sloupků a napájecí sondy

Měření realizované antény probíhalo v EMC komoře v Eře v Pardubicích. Fotografie celého měřicího systému lze vidět na obr. 34-37.



Obrázek 34 Měřicí anténa ve stíněné komoře



Obrázek 35 Motor pro uchycení a napájení měřené antény a její rotaci



Obrázek 36 Montážní stojan pro měřenou anténu (vlevo), výpočetní technika (vpravo)



Obrázek 37 Anténa na montážním stojanu připevněná k motoru

Měřením byly získány hodnoty činitele odrazu S11. Srovnání simulovaných a naměřených dat je na obr. 38.



Obrázek 38 Srovnání S11 pro měření a simulaci

Z tohoto grafu lze vidět, že vlivem ruční výroby antény došlo k mírným nepřesnostem, zejména rozměrů hliníkové zemnicí plochy a vzájemných vzdáleností substrátových desek vlivem výrobních tolerancí distančních a zkratovacích sloupků což má za následek zhoršení přizpůsobení a posunutí pracovního pásma směrem k vyšším kmitočtům. V celém pásmu však bylo dosaženo dostatečného přizpůsobení -15 dB. Pro kmitočet 1,09 GHz, sloužící pro hlavní komunikaci s letadlem, bylo dosaženo přizpůsobení -21 dB.

Měření zisku bylo provedeno na kritických kmitočtech 1,025; 1,03; 1.09 a 1,15 GHz. Srovnání naměřených a simulovaných hodnot lze vidět na obr. 39.



Obrázek 39 Srovnání zisku pro měření a simulaci

Z grafu lze vidět, že u realizované antény bylo dosaženo vyššího zisku oproti simulaci na všech kmitočtech. To může být opět způsobeno nepřesnostmi výroby a dále také vlivem síťování simulovaného modelu. Použitá síť mohla být nedostatečně jemná v okolí volného šíření vlny mimo substrát a mohla tedy negativně ovlivnit výsledný zisk simulované antény.

Na obr. 40 lze vidět směrové diagramy pro azimutální a elevační pokrytí. Zde lze vidět kromě již zmiňovaného lepšího dosaženého zisku a relativně shodného tvaru vyzařovací char. ve směru hlavního laloku také velmi vysoké zpětné záření. To může být způsobeno nedokonalým návrhem zemnicí vany, nepřesnostmi při její výrobě, či nedokonalým spojením E-flíčku s podložkou na protější straně substrátu, které může vést ke vzniku parazitních rezonancí. Ty mohou být způsobeny také nepřesným vymezením vzdáleností mezi substráty distančními sloupky a také tloušťkou použitého polystyrenu.



Obrázek 40 Azimutální a elevační vyzařovací char. měřené antény

Vyzařovací char. vyrobené antény tedy není optimální a je za potřebí anténu lépe navrhnout jak z hlediska snadnější technologické výroby, např. snadnější propojení Epatche s podložkou, příp. její odstranění, zmenšení velikosti antény, tak i z hlediska omezení vlivu výrobních tolerancí na výsledné anténní parametry.

Na obr. 41 lze vidět, že azimutálního 90° pokrytí je dosaženo do vzdálenosti 400 km, elevační měření je v tomto případě zatíženo velkou chybou a výsledek je tedy neprůkazný.



Obrázek 41 Azimutální a elevační dosah měřené antény

5 Anténní řada

Dle požadavků firmy byly zkoumány vyzařovací parametry 3- a 4-prvkové anténní soustavy z důvodu všesměrového záření výsledné antény v horizontální rovině. Ty jsou od středu soustavy vzdáleny 0,5 m. Kvůli systému vyhodnocujícímu úhel příjmu bylo také nutné všechny antény provozovat s nulovým fázovým posuvem. Obě konfigurace lze vidět na obr. 42. Každý anténní element má vlastní napájecí vstupní port a není tedy nutné navrhovat společnou napájecí síť.



Obrázek 42 3-prvková (vlevo) a 4-prvková (vpravo) soustava shora

Anténní řady byly zkoumány jak ve frekvenční, tak i časové oblasti, aby byla ověřena správná funkčnost obou řešičů a dosaženo korespondujících výsledků. Při použití časového řešiče bylo také nutné kvůli hexahedrální síti modelu upravit koaxiální vedení 3-prvkové antény jeho ohnutím u dvou elementů tak, aby budicí porty byly na síť kolmé (viz. obr. 43) a prodloužením třetího vedení o stejnou délku, aby nedošlo ke změně fáze budicího signálu.



Obrázek 43 Ohyb koaxiálního vedení

Výsledný 3D vyzařovací diagram anténní řady pro obě konfigurace lze vidět na obr. 44. Srovnání vyzařovacích diagramů v kartézských souřadnicích pro frekvenční a časový řešič je vidět na obr. 45.



Obrázek 44 3D zobrazení realizovaného zisku, 3-prvková (nahoře) a 4-prvková konfigurace (dole)



Obrázek 45 Srovnání směrových diagramů časového a frekvenčního řešiče (3-prvková konfigurace)

Z výsledků 3-prvkové konfigurace v případě obou řešičů dostáváme téměř totožné výsledky, jemné odchylky jsou způsobeny zejména použitím rozdílných sítí řešičů (hexahedrální a tetrahedrální). Tímto byla tedy ověřena jejich správná funkčnost. Na obr. 46 a 47 je srovnání pokrytí obou anténních řad ve frekvenčním řešiči.



Obrázek 46 Srovnání azimutálního pokrytí pro 3- a 4-prvkovou konfiguraci



Obrázek 47 Srovnání elevačního pokrytí pro 3- a 4-prvkovou konfiguraci

Z grafu azimutálního pokrytí lze vidět, že bylo dosaženo polovičního zisku ve směrech hlavních laloků jednotlivých anténních elementů. To souvisí také s tím, že mezi anténami vznikají vazby vlivem použití stejné fáze buzení všech elementů. Tyto vazby dále zhoršují celkové azimutální krytí pro obě anténní konfigurace. Místo celistvých vyzařovacích laloků vznikají ve vyzařovací char. opakující se místa minim a maxim a dochází tedy k nerovnoměrnému pokrytí prostoru.

Z grafu elevačního pokrytí lze také vidět, že bylo dosaženo jen polovičního zisku ve směru hlavního laloku oproti jednomu simulovanému elementu. To je opět důsledkem vzájemných vazeb mezi prvky antény.

Pro potlačení vlivu vzájemných vazeb byl ke každému elementu vložen pravoúhlý reflektor (viz obr. 48). Vliv těchto reflektorů lze vidět na obr. 49, kde je srovnáno azimutální krytí 3 prvkové anténní řady. Z toho grafu je zřejmé, že reflektor nijak nenapomáhá k vyrušení vazeb mezi prvky antény.



Obrázek 48 Anténa s reflektory





Na následujících obr. 50 a 51 jsou zobrazeny dosahy obou variant antén pro azimutální i elevační krytí. Anténa dosahuje v maximech azimutálního pokrytí do vzdálenosti 325 km, avšak v minimech se dosah propadá až na 125 km. U elevačního pokrytí je v maximu dosaženo také 325 km, ve srovnání s jedním prvkem antény však není dosaženo tak dobrého pokrytí přímo nad anténou (v 90°), zde se dosah blíží nule.



Obrázek 50 Azimutální dosah anténní řady



Obrázek 51 Elevační dosah anténní řady

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl experimentální návrh víceprvkové anténní řady, sloužící pro monitorování provozu letadel na letišti.

Pro realizaci jednoho elementu této řady byla převzata anténa z [4], [5]. Tato anténa byla namodelována v programu CST Microwave Studio a její parametry byly upraveny tak, aby splnila požadavky zadání, tedy fungovala v impedanční šířce pásma 1025-1150 MHz. Toho bylo dosaženo transformací parametrů vzhledem k vlnové délce dané frekvence. Výsledný činitel odrazu této antény však ještě přesně neodpovídal požadavkům, a proto byla nutná optimalizace celé antény.

Dle požadavků byly v rámci optimalizace vytvořeny 3 modely na různých substrátech a s různými konstrukčními prvky požadovaných z hlediska výroby a využití antény ve vnějších prostorách. Z těchto modelů vyšly nejlépe materiály CuClad a Arlon.

Pro konečnou realizaci byl zvolen substrát CuClad z hlediska dostupnosti v rámci firmy, a tedy i nižší pořizovací ceně. V anténě byly realizovány zkratovací sloupky, sloužící k ochraně před atmosférickým přepětím, dále byla také zohledněna pevnost celého anténního elementu, kterou napomáhají zvyšovat jak zmíněné zkratovací, tak i distanční sloupky, pěnová výplň antény, která brání vibracím substrátů a možnému utržení koaxiálního vodiče, hliníková zemnicí vana se zvednutými okraji a v neposlední řadě také krycí radom z laminátu. Výplň antény zároveň zabraňuje přílišným teplotním výkyvům uvnitř antény (přehřívání na přímém slunci).

V podkapitole 3.5 bylo provedeno vyhodnocení směrových vlastností modelované antény. Azimutálního pokrytí v rádiusu 90° bylo dosaženo do vzdálenosti 300 km, elevačního pokrytí přímo nad anténou je dosaženo do výšky 20 km. Byly tedy splněny požadavky na zisk a pokrytí jedním anténním elementem.

Při výrobě toho prvku bylo nutné provést určité kompromisy v použitých materiálech. Místo PU pěny byly použity dostupnější polystyrenové desky a radom spolu s hliníkovou vanou byly vyráběny ručně, nikoliv odléváním a lisováním, jak bylo při návrhu zamýšleno, a to zejména kvůli ceně prototypové výroby tímto způsobem. V důsledku toho mohlo dojít při výrobě k různým nepřesnostem jako rozdílné permitivitě laminátu a polystyrenu oproti modelovaným materiálům, dále nepřesným rozměrům zemnicí vany a nepřesnými vzdálenostmi mezi substráty vlivem výrobních tolerancí distančních sloupků

V kapitole 4 je ukázáno, že se tyto nepřesnosti sice příliš neprojevily v rámci přizpůsobení antény, nicméně velmi negativně ovlivnily zpětnou vyzařovací charakteristiku antény. Při výrobě bylo také zjištěno, že propojení E-flíčku s podložkou na protější straně substrátu a jejich připojení ke koaxiálnímu vodiči je značně problematické a mohlo dojít k nekvalitnímu spojení. To mohlo být také jednou z příčin

velkého zpětného vyzařování antény. Ve směru hlavního vyzařovacího laloku bylo nicméně dosaženo lepšího zisku než v případě simulované antény. Příčinou překvapivě nižších hodnot zisku získaných z CST může být nedostatečná diskretizace sítě použitého řešiče. Ta mohla být v určitých místech příliš hrubá na to, aby postihla vlastnosti a rozměry materiálu, které pozitivně ovlivňující přizpůsobení a zisk antény. Dále je možný také pozitivní vliv odchylky permitivity radomu a polystyrenové výplně na parametry realizované antény. Teoretický realizovatelný dosah je tedy ve směru hlavního laloku vyšší než v případě simulované antény, pro azimutální 90° pokrytí je dosah antény 400 km pro elevační jsou výsledky neprůkazné.

V 5. kapitole byly srovnány vlastnosti anténních řad s různým počtem elementů, v tomto případě tří a čtyř. Jelikož bylo nutné nejdříve ověřit správnou funkčnost jednoho vyrobeného anténního prvku, bylo toto srovnání provedeno pouze v rámci simulace. Aby byla ověřena správnost těchto simulací, byly výsledky řady porovnány pro časový a frekvenční řešič. Tyto výsledky spolu po srovnání korespondují a je tedy možné předpokládat správnost výsledků. Dále byly srovnány samotné vyzařovací vlastnosti antén pro obě víceprvkové verze. Zde bylo dosaženo nižších zisků antén vlivem vzájemných vazeb mezi jednotlivými elementy, které jsou způsobeny buzením antén se stejnou fází, což je vyžadováno kvůli vyhodnocovacímu zařízení, připojenému k navrhované anténě. Snahou o omezení těchto vazeb bylo umístění pravoúhlého reflektoru ke každému prvku antény nicméně se ukázalo, že na vyzařovací vlastnosti řady nemá zásadní vliv. Další možností eliminace vazeb by mohlo být oddálení jednotlivých elementů, to by však vedlo k velkým rozměrům celé anténní řady což by ztížilo montáž na stožár a anténa by na něm zabírala příliš mnoho místa. Tuto možnost tedy nelze uvažovat.

Z vyhodnocení dosahů obou anténních řad je vidět, že přidáním jednoho elementu oproti 3-prvkové konfiguraci není dosaženo příliš velkého zlepšení azimutálního a elevačního pokrytí, což je ale způsobeno nedostatečnou eliminací vazeb mezi anténami. Celkově je tedy v rámci azimutálního krytí dosah v rozmezí 120 - 320 km v celém rádiusu. Elevační pokrytí obou verzí je téměř totožné, nicméně nelze pokrýt oblast přímo nad anténou.

V rámci další práce bude nutné lépe navrhnout anténní element tak, aby nedocházelo k rozladění antény vlivem výrobních nepřesností. Dále bude nutné zjednodušit výrobní proces antény, zejména nahrazení podložky na druhé straně E-flíčku jiným způsobem eliminace parazitní indukčnosti koaxiální sondy. Z hlediska snazší reálné montáže na stožáru bude nutné zmenšit rozměry a váhu celé antény, která se momentálně pohybuje okolo 3kg na jeden prvek.

LITERATURA

- [1] Letecká navigace: TACAN. Letecká navigace [online]. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: http://airnav.eu/index.php?stranka=tacan
- [2] Letecká navigace: DME. *Letecká navigace* [online]. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: http://airnav.eu/index.php?stranka=DME
- [3] WOLANSKÝ, David. Širokopásmová stacked patch anténa, Výzkumná zpráva projektu MPO č. FR-TI2/039, 2011.
- [4] BAN-LEONG OOI, SHEN QIN a MOOK-SENG LEONG. Novel design of broad-band stacked patch antenna. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2002, **50**(10), s. 1391-1395. DOI: 10.1109/TAP.2002.802087. ISSN 0018-926X. Dostupné také z: http://ieeexplore.ieee.org/document/1137534/
- [5] NOVOZÁMSKÝ, Adam. ERA, A. S. Pasivní radiolokace: Využití multilaterace v civilních a vojenských aplikacích. Brno, 2016, 106 s. Dostupné také z: https://docplayer.cz/37747270-Pasivni-radiolokace-vyuziti-multilaterace-vcivilnich-a-vojenskych-aplikacich-prednaska-vut-fekt-brno.html. Prezentace.
- [6] Multilateration: Executive Reference Guide [online]. Creativerge, 2008 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: http://www.multilateration.com/downloads/MLAT-ADS-B-Reference-Guide.pdf
- [7] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 04-716-6782-X.
- [8] RO4725JXRTM RO4730JXRTM& RO4730G3TM: Antenna Grade Laminates. #92-168. Chandler: Rogers Corporation, 2008, 2 s. Dostupné také z: https://www.rogerscorp.com/documents/1414/acs/RO4725JXR-RO4730JXR-RO4730G3-Antenna-Grade-Laminates-Data-Sheet.pdf. Datasheet
- [9] TRIVEDI, Rushit D. a Vedvyas DWIVEDI. Stacked Microstrip Patch Antenna: Gain and Bandwidth Improvement, Effect of Patch Rotation. 2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies [online].
 IEEE, 2012, 2012, 45-48 [cit. 2019-05-04]. DOI: 10.1109/CSNT.2012.19. ISBN 978-1-4673-1538-8. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/document/6200586/
- [10] ARLON. 25N/25FR: High Frequency, Low Loss Thermoset Laminates and Prepreg for Double Sided, Multilayer and Mixed Dielectric Printed Circuit Boards. Rev C. 2005. Dostupné také z: https://www.cirexx.com/wpcontent/uploads/25N25FR.pdf. Datasheet.
- [11] ROGERS CORPORATION. *CuClad Series: PTFE/Woven Fiberglass Laminates Microwave Printed Circuit Board Substrates.* 4 s. Dostupné také z:

https://www.rogerscorp.com/documents/3270/acs/CuClad-Laminates-Data-Sheet.pdf. Datasheet.

- [12] ŠEBESTA, Jiří. Radiolokace a radionavigace přednášky [online]. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2004 [cit. 2019-05-12]. ISBN 978-80-214-2482-6. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/RAR/literatura/Radiolokace_a_radionavig ace_2004.pdf. Skriptum.
- [13] ŠEBESTA, Jiří. Radiolokační cíle, radiolokační rovnice, detekce radiolokačních cílů, šíření elamg. vlny, antény radarů, metody snímání prostoru [online]. In: .
 2018 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~sebestaj/MRAR/MRAR_P_CZ02.ppt. Prezentace.