

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**  
**FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY**

**ZÍSKAVANIE ENERGIE Z RÁDIOVÉHO SIGNÁLU**

**Diplomová práca**

**Bc. Michal Kochláš**

**Získavanie energie z rádiového signálu**

**Vedúci DP: doc. Ing. Juraj Miček, PhD.**

**Reg. č. 359/2011**

**Jún 2012**

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**  
**FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY**

**ZÍSKAVANIE ENERGIE Z RÁDIOVÉHO SIGNÁLU**

**Diplomová práca**

Študijný program: Počítačové inžinierstvo  
Študijný odbor: 9.2.4. počítačové inžinierstvo  
Školiace pracovisko: Katedra technickej kybernetiky  
Vedúci DP: doc. Ing. Juraj Miček, PhD.  
Registračné číslo: 359/2011

**Žilina 2012**  
**Bc. Michal Kochláš**

ZADANIE TÉMY DIPLOMOVEJ PRÁCE.

Študijný program : Počítačové inžinierstvo

Meno a priezvisko

Michal Kochláš

Osobné číslo

552785

Názov práce v slovenskom aj anglickom jazyku

Získavanie energie z rádiového signálu

Radio Signal Energy Harvesting

Zadanie úlohy, ciele, pokyny pre vypracovanie

(Ak je málo miesta, použite opačnú stranu)

**Cieľ diplomovej práce:**

Rozebírka možností a techník získavania energie z okolia. Návrh a realizácia zariadenia na získavanie energie a experimentálne overenie funkčnosti.

**Obsah:**

- analýza problému získavania energie
- návrh zariadenia získavajúceho energiu z rádiového signálu
- experimentálne overenie funkčnosti zariadenia
- porovnanie efektivity premeny energie v závislosti od rôznych parametrov (vzdialenosť od vysielača, typ antény, atď.)
- vyhodnotenie získaných výsledkov

Témy z predmetov študijného zamerania

5SI035: 2, 3, 6

Meno a pracovisko vedúceho DP:

doc.Ing. Juraj Miček, PhD., K'TK, ŽU

Meno a pracovisko tútora DP:

27.10

vedúci DP

(dátum a podpis)

tútor

(dátum a podpis)

27.10

vedúci katedry

(dátum a podpis)

garant

(dátum a podpis)

Zadanie zaregistrované dňa 27. 10. 2011 pod číslom 359/2011 podpis

## **POĎAKOVANIE**

Týmto sa chcem poďakovať vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Jurajovi Mičekovi, PhD za odborné rady v oblasti elektroniky a odporúčania vhodných literárnych zdrojov, ďalej chcem poďakovať pracovníkom Katedry technickej kybernetiky za vedomosti poskytnuté počas štúdia. Ďakujem mojej rodine a priateľom za pomoc a podporu.

## ABSTRAKT

KOCHLÁŇ, Michal: *Získavanie energie z rádiového signálu* [diplomová práca] – Žilinská univerzita v Žiline. Fakulta riadenia a informatiky; Katedra technickej kybernetiky – Školiteľ: doc. Ing. Juraj Miček, PhD. – Stupeň odbornej kvalifikácie: Inžinier v odbore Počítačové inžinierstvo. Žilina: FRI ŽU v Žiline, 2012. – 52 s.

Cieľom predloženej diplomovej práce je návrh a realizácia zariadenia na získavanie energie z rádiového signálu. Obsah práce je rozdelený do štyroch častí. Prvá sa zaoberá oboznámením čitateľa s teoretickými poznatkami v predmetnej oblasti. Nasledujúce dve kapitoly pojednávajú o návrhu a fyzickej realizácii zariadenia na získavanie energie z rádiového signálu. Posledná kapitola sa zaoberá experimentálnymi meraniami navrhnutých obvodov. Na záver je zhrnutá výsledná práca a sú načrtnuté možné úpravy či vylepšenia do budúcnosti.

Kľúčové slová: energia, rádiový signál, získavanie energie, alternatívne zdroje, anténa, usmerňovací obvod, vyrovnávací obvod

## ABSTRACT

KOCHLÁŇ, Michal: *Radio signal energy harvesting* [Master thesis] – The University of Žilina, Faculty of Management Science and Information Technologies. Technical Cybernetics Department. Tutor: doc. Ing. Juraj Miček, PhD. – Qualification level: Master of Computer Engineering. Žilina: FRI ŽU in Žilina, 2012. – 52 s.

The aim of this master work is the energy harvesting device design and realization. The content of this work is divided into four parts. The first deals with notifying the reader about the theoretical knowledge in this field of study. The following two chapters discuss the design and physical realisation of the radio signal energy harvesting device. The last chapter focuses on experimental measurements of the proposed circuits. Finally, the resulting work is summarized and possible adjustments or improvements are outlined.

Key words: energy, radio signal, energy harvesting, alternative sources, antenna, rectifying circuit, matching circuit

# ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že diplomovú prácu *Získavanie energie z rádiového signálu* som vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Juraja Mičeka, PhD. Uviedol som všetky literárne pramene, publikácie a iné zdroje, z ktorých som čerpal.

V Žiline, 27. apríla 2012

.....

# OBSAH

ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK .....	10
ÚVOD .....	13
1 ANALÝZA PROBLÉMU .....	16
1.1 Anténa .....	18
1.1.1 Parametre antén .....	19
1.1.2 Typy antén .....	27
1.1.3 Mikropásikové antény .....	34
1.2 Usmerňovací obvod .....	40
1.2.1 Jednocestný usmerňovač .....	41
1.2.2 Dvojcestný usmerňovač.....	42
1.2.3 Mostíkový usmerňovač – Graetzov mostík .....	42
1.2.4 Symetrický usmerňovač .....	43
1.3 Vyrovnávací obvod .....	43
1.3.1 Sériový induktor .....	44
1.3.2 Sériový kondenzátor .....	45
2 NÁVRH RIEŠENIA MODULU ZBERU ENERGIE .....	47
2.1 Návrh antény .....	47
2.1.1 Návrh konvenčnej mikropásikovej antény .....	48
2.1.2 Návrh mikropásikovej antény s použitím fraktálového vzoru .....	51
2.2 Návrh usmerňovacieho a vyrovnávacieho obvodu .....	52
2.2.1 Schematické zapojenie .....	52
2.2.2 Implementácia schematického zapojenia .....	54
3 REALIZÁCIA NAVRHNUTÉHO RIEŠENIA.....	56
4 MERANIA.....	60



ZÁVER .....	64
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....	66
PRÍLOHA A - Predloha priesvitnej fólie antén (70% pôvodnej veľkosti) .....	70
PRÍLOHA B - Predloha priesvitnej fólie usmerňovacieho obvodu (100% veľkosť).....	71
PRÍLOHA C - Osvit dosiek plošných spojov .....	72
PRÍLOHA D - Osvit dosiek plošných spojov (druhá várka) .....	73
PRÍLOHA E - Kúpeľ DPS v roztoku vývojky .....	74
PRÍLOHA F - Kúpeľ DPS v roztoku vývojky (druhá várka).....	75
PRÍLOHA G - Leptanie DPS chloridom železitým.....	76
PRÍLOHA H - Hotové DPS s konektormi a súčiastkami .....	77
PRÍLOHA I - Meranie spektrálnym analyzátorom R&H FSH8.....	78
PRÍLOHA J - Meraná úroveň signálu štandardnej WIFI antény.....	79
PRÍLOHA K - Meraná úroveň signálu obdĺžnikovej antény .....	80
PRÍLOHA L - Meraná úroveň signálu obdĺžnikovej antény so zárezom .....	81
PRÍLOHA M - Meraná úroveň signálu štvorcovej antény $\lambda_4$ .....	82
PRÍLOHA N - Meraná úroveň signálu štvorcovej antény $\lambda_4$ so zárezom .....	83
PRÍLOHA O - Meraná úroveň signálu štvorcovej antény $\lambda_2$ .....	84
PRÍLOHA P - Meraná úroveň signálu fraktálovej antény $\lambda_4$ .....	85
PRÍLOHA Q - Meraná úroveň signálu fraktálovej antény $\lambda_2$ .....	86
PRÍLOHA R - Meraná úroveň signálu antény fraktálového poľa.....	87
PRÍLOHA S - Namerané frekvenčné pásmo 8. kanála WIFI spektrálnym analyzátorom R&H FSH8 .....	88
PRÍLOHA T - Namerané frekvenčné pásmo GSM 1900 MHz spektrálnym analyzátorom R&H FSH8 .....	89
PRÍLOHA U - Modul zberu energie napájajúci LED diódu .....	90
PRÍLOHA V - Schéma usmerňovacieho a vyrovnávacieho obvodu.....	91

## ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK

- AM** – *Amplitude Modulation [amplitúdová modulácia]*: modulačná technika používaná v komunikačnej elektronike, ktorá mení amplitúdu nosného signálu v závislosti na zmene modulačného signálu
- BP** – *British Petroleum*: britská energetická spoločnosť zaoberajúca sa hlavne ťažbou ropy
- CAD** – *Computer-Aided Design [počítačom podporovaný návrh]*: programové vybavenie pre geometrické a matematické modelovanie súčiastok a ich vlastností
- DVB-S** – *Digital Video Broadcasting - Sattelite [digitálne satelitné vysielanie]*: sada štandardov definujúca fyzickú a linkovú vrstvu satelitného distribučného systému televíznych a rádiových kanálov
- DPS** – *Doska Plošných Spojov*: nosný a konštrukčný prvok elektronických obvodov tvorený nevodivým substrátom a tenkou vrstvou (vrstvami) elektricky vodivého materiálu (najčastejšie meď)
- EH** – *Energy Harvesting*: proces získavania energie z okolitého prostredia (forma alternatívneho zdroja energie)
- EHF** – *Extremely High Frequency [extrémne vysoká frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 30 – 300 GHz
- ELF** – *Extremely Low Frequency [extrémne nízka frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 3 – 30 Hz
- EM** – *Elektromagnetické (žiarenie / energia)*: periodický dej, pri ktorom dochádza k priestorovej a časovej zmene vektora intenzity elektrického poľa a súčasne vektora magnetickej indukcie
- FBW** – *Fractal Bandwidth [čiastková šírka pásma]*: predstavuje celkovú šírku pásma predelenú strednou frekvenciou tohto pásma; udáva sa zvyčajne v percentách

- FR-4** – kompozitný materiál zložený z tkaného skleneného vlákna spojený nehorľavou epoxidovou živicom tvoriaci dielektrický substrát dosiek plošných spojov
- GPS** – *Global Positioning System [globálny pozičný systém]*: satelitný navigačný systém poskytujúci informácie o mieste a čase v každom počasí kdekoľvek na Zemi alebo v jej blízkosti
- GSM** – *Global System for Mobile Communications [globálny systém pre mobilnú komunikáciu]*: štandard popisujúci technológie druhej (2G), tretej (3G, 3,5G) a štvrtej (4G) generácie digitálnych mobilných sietí
- HF** – *High frequency [vysoká frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 3 – 30 MHz
- LF** – *Low Frequency [nízka frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 30 – 300 kHz
- LHCP** – *Left Hand Circularly Polarized [polarizácia podľa pravidla ľavej ruky]*: kruhová polarizácia v smere hodinových ručičiek
- MF** – *Medium Frequency [stredná frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 300 – 3 000 kHz
- RF** – *Radio Frequency [rádiová frekvencia]*: predstavuje rýchlosť kmitania v rozsahu 3kHz až 300GHz, čo zodpovedá frekvencii rádiových vĺn a striedavých prúdov, ktoré prenášajú rádiové signály
- RFID** – *Radio-Frequency Identification [rádiová identifikácia]*: bezdrôtová a bezkontaktná technológia používajúca elektromagnetické pole na identifikáciu objektov
- RHCP** – *Right Hand Circularly Polarized [polarizácia podľa pravidla pravej ruky]*: kruhová polarizácia proti smeru hodinových ručičiek
- SHF** – *Super High Frequency [super vysoká frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 3 – 30 GHz
- SLF** – *Super Low Frequency [super nízka frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 30 – 300 Hz
- SLL** – *SideLobe Level [úroveň bočného laloka]*: charakterizuje maximálnu hodnotu úrovne bočného laloka radiačného diagramu antény

- TOE** – *Tons of Oil Equivalent [ekvivalent tony ropy]*: jednotka energie predstavujúca množstvo energie uvoľnenej pri horení jednej tony surovej ropy; predstavuje energiu asi 42 GJ (Giga Joule)
- UHF** – *Ultra High Frequency [ultra vysoká frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 300 – 3 000 MHz
- ULF** – *Ultra Low Frequency [ultra nízka frekvencia]*: frekvenčné pásmo s rozsahom 300 – 3 000 Hz
- VSWR** – *Voltage Standing Wave Ratio*: predstavuje pomer maximálneho a minimálneho napätia signálu
- WIFI** – *Wireless-Fidelity*: sada štandardov pre bezdrôtové lokálne počítačové siete
- WSN** – *Wireless Sensor Network [bezdrôtová senzorová sieť]*: sieť pozostávajúca z priestorovo rozptýlených autonómnych senzorov monitorujúcich teplotu, hluk, vlhkosť a pod.

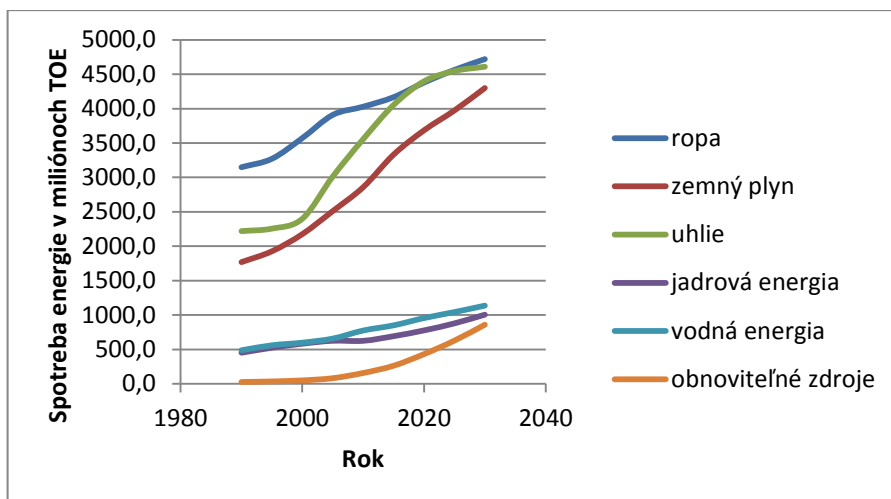
# ÚVOD

Dnešný svet charakterizuje energia. Je v rôznych podobách všade okolo nás. Najväčší podiel celkových energetických zdrojov využívaných ľudstvom stále predstavujú fosílna palivá. Tieto zdroje sú však obmedzené, nedoplňajú sa, a ich zásoby sa rýchlo mieniajú. Existujú ale aj „neobmedzené“ zdroje, ktorých energetický potenciál je vysoký a získavajú si stále väčší podiel z celkového využitia energetických zdrojov využívaných spoločnosťou. Tieto zdroje sa nazývajú obnoviteľné, resp. alternatívne zdroje energie. Patria medzi ne: biomasa, slnečná energia, veterná energia, vodná energia a geotermálna energia. (1)

Obnoviteľné zdroje energie sú považované za zdroje budúcnosti. Ich využitie v súčasnosti získava na význame. Prinášajú skutočnú alternatívu fosílnym palivám, ktorých zásoby sú obmedzené. Ich využívanie je schopné zabezpečiť trvalo udržateľný rozvoj. Ide o rozvoj, ktorý svojou energetickou náročnosťou, využívaním zdrojov našej planéty a celkovým svojím charakterom neobmedzí existenciu a nároky ďalších generácií. Napriek množstvu výhod je využívanie obnoviteľných zdrojov energie vo svete stále nízke. (1)

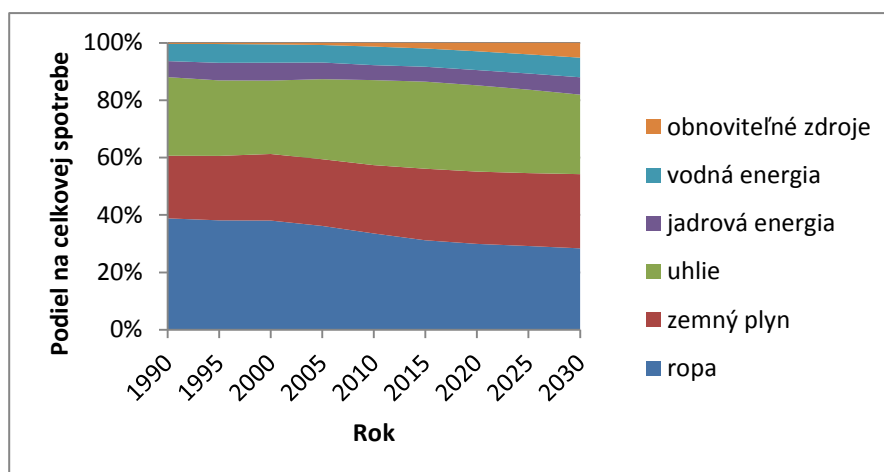
Spotreba energie vo svete neustále rastie a prekračuje možnosti našej planéty. Z hľadiska ekologickej stopy (vyjadrenie nárokov populácie ľudí na energiu a život prepočítané na plochu) by sme pri dnešnej spotrebe pre jej dlhodobé udržanie potrebovali 1,5 až dve Zeme. Neustále rastúci počet obyvateľov a neudržateľný životný štýl smerujú k ďalšiemu rastu spotreby energií. Pri obmedzených zásobách fosílnych palív je treba hľadať a začať využívať vhodné alternatívy čo najskôr, aby sme boli v budúcnosti pripravení úplne nahradiť fosílna zdroje. Napriek tvrdeniam, že alternatívne zdroje nie sú schopné pokryť súčasný dopyt, je potrebné do nich investovať, aby sa technológie ich využitia mohli zlepšovať a dosahovať stále vyššiu efektívnosť. (1)

Energetická spoločnosť British Petroleum (BP) každoročne zverejňuje prognózy spotreby energie do budúcnosti. Podľa najnovšej prognózy z roku 2011 (referencia (2)) sa spotreba obnoviteľných zdrojov v priebehu najbližších dvadsiatich rokov zvýši takmer päťnásobne.



Obr. 1 Predpokladaný nárast spotreby energie podľa spoločnosti British Petroleum

Na obr. 1 je graficky znázornená prognóza spotreby energetických zdrojov do roku 2030. Celkový podiel obnoviteľných zdrojov energie sa podľa spoločnosti BP zvýši na rozdiel od podielu ropy, ktorý sa naopak zníži (vid' obr. 2).



Obr. 2 Podiel jednotlivých zdrojov energie na celkovej spotrebe

Medzi alternatívne zdroje energie patrí aj zber elektromagnetickej (EM) energie z okolia. Efektívne využitie takto získanej energie by mohlo hrať významnú úlohu pri rozširovaní alternatívnych zdrojov energie. Aplikácie na zber energie z okolia sú pomerne nové a ich komerčné nasadenie si ešte vyžaduje rozsiahly výskum.

Jednou z perspektívnych oblastí je využitie zberu EM energie v bezdrôtových senzorových sieťach (WSN) ako doplnkový zdroj k primárnemu zdroju.

Cieľom predloženej diplomovej práce je popis a rozbor problematiky zberu energie z okolitého prostredia zameranej na EM žiarenie. Koncepcia riešenia predstavuje analýzu teoretických východísk, experimentálne odskúšanie navrhnutej antény i obvodu a vyvodenie záverov.

V prvej kapitole sa venujem analýze problému, teórii antén, ich dizajnu, typom a vlastnostiam. Táto kapitola ďalej rozoberá možnosti usmernenia rádiového signálu rôznymi usmerňovacími obvodmi. V prípade prenášania signálu, hlavne s malým výkonom je potrebné v záujme najefektívnejšieho prenosu energie impedančne vyrovnať vysielací/prijímací obvod s prenosovým vedením od antény. Tejto problematike sa z teoretického hľadiska v poslednej časti tejto kapitoly.

V druhej kapitole oboznamujem s návrhom tvaru a veľkostí antén použitých na zber energie z rádiového signálu a výberom usmerňovacieho obvodu spolu s výberom elektronických súčiastok. Najzložitejšou časťou je dosiahnutie súladu antény a usmerňovacieho obvodu za účelom prenášania maximálneho možného množstva energie – impedančný vyrovnávací obvod. Často sa jedná o proces pokus-omyl, keďže zmenou jedného parametra vyrovnávacieho obvodu vynútime zmenu všetkých ostatných, ak chceme zachovať pôvodné vlastnosti.

Tretia kapitola pojednáva o fyzickej realizácii navrhnutých obvodov a antén. Opisuje postup výroby plošných spojov s anténami, usmerňovacím a vyrovnávacím obvodom.

Posledná kapitola je venovaná meraniam navrhnutých obvodov pomocou počítačových prostriedkov a spektrálneho analyzátora.

# 1 ANALÝZA PROBLÉMU

**Zber energie** alebo „energy harvesting“ (EH) je **proces zachytávania, akumulovania a ukladania malého množstva energie** z rôznych zdrojov (napr. solárna, veterná, termálna, kinetická, elektromagnetická, a pod.). EH modul je elektronické zariadenie, ktoré vykonáva všetky tieto funkcie pre napájanie rôznych bezdrôtových zariadení, senzorov a kontrolných obvodov nevyžadujúcich spojitý charakter napájania, resp. nevyžadujú vysoký výkon. Takéto zariadenia sa používajú napríklad v bezdrôtových senzorových sieťach (WSN) alebo v čoraz perspektívnejšej oblasti „obliekateľnej“ elektroniky – napr. senzory zakomponované v látkach alebo mikročipy v topánkach. (3)

Technologický pokrok zvýšil efektivitu zariadení na získavanie elektrickej energie z okolitého prostredia. Zdokonalenie výroby mikroprocesorov zvýšilo nielen ich výkon, ale zlepšilo aj energetickú efektivitu a znížilo spotrebu. Práve tento pokrok naštartoval záujem vedeckého výskumu a následne vývoja aplikácií, ktoré používajú EH modul ako zdroj elektrickej energie. (3)

Získavanie energie z prírodných zdrojov, ktoré sú prakticky nevyčerpatel'ne, je stále atraktívnejšou alternatívou k drahým batériám a „nepohodlným“ elektrickým zásuvkám. Je to bezplatný zdroj energie, a keď je správne navrhnutý, je aj bezúdržbový a dostupný po celú dobu životnosti aplikácie. Tieto systémy môžu byť spoľahlivejšie ako batérie alebo elektrické zásuvky. Navyše EH modul je využiteľný ako náhradný zdroj energie na podporu primárneho zdroja a na zvýšenie spoľahlivosti celého systému. (3)

Mnoho aplikácií reálneho života využíva systém zberu energie. Bezdrôtové senzorové siete založené napr. na ZigBee komunikačnej technológii, často používajú EH zdroje energie. Napríklad, keď je bezdrôtový uzol nasadený na vzdialenom mieste, kde nie je prístup k elektrickej sieti alebo batérii, alebo zdroj energie je nespoľahlivý, EH môže rozšíriť alebo nahradiť tento zdroj energie. Existuje niekoľko druhov energie, z ktorých je možné zbierať energiu (3):

- mechanická energia – zo zdrojov vibrácií, mechanického napätia a tlaku (3),
- termálna energia – odpadová energia z pecí, ohrievačov a trecích zdrojov (3),



- svetelná energia – získaná zo slnečného žiarenia alebo izbového svetla cez fotosenzory, fotodiódy alebo solárne panely (3),
- elektromagnetická energia – získaná z induktorov, cievok, transformátorov a televízneho či rádiového vysielania (3),
- prírodná energia – z prostredia ako vietor, vodný tok, oceánske prúdy alebo slnečná energia (3),
- ľudské telo – kombinácia mechanickej a termálnej energie prirodzene generovanej bio-organizmami alebo cez činnosti (napr. chôdza) (3),
- iná energia – chemické biologické zdroje (3).

EH systém všeobecne pozostáva z energetického zdroja ako vibrácie, teplo, svetlo, tok vzduchu či elektromagnetická energia a z troch kľúčových komponentov (3):

- zariadenie na konverziu energie napr. solárny článok, ktorý mení slnečnú energiu na elektrickú (3),
- EH modul, ktorý zachytáva, ukladá a spravuje energiu (3),
- koncová aplikácia, ako napr. ZigBee bezdrôtový senzor alebo monitorovací obvod (3).

Zdroje okolitého žiarenia sú možné zdroje energie pochádzajúce zo všadeprítomných rádiových vysieláčov. Na získanie použiteľných hodnôt energie je potrebná buď veľká zberná plocha, alebo krátka vzdialenosť od zdroja radiácie. Jedno z navrhovaných riešení, uvádzaných v literatúre, je „nantenna“ alebo „rectenna“, ktorá tieto obmedzenia prekonáva využitím bohatého prirodzeného žiarenia. Príkladom takého riešenia je zámerné vysielanie rádiovkej (RF) energie a napájanie prenosného zariadenia touto energiou. Toto sa bežne používa v pasívnych RFID systémoch, ale pre bezpečnosť je nutné limitovať maximálny výkon, ktorý môže byť vysielaný touto cestou pre civilné účely. Pre komerčné účely je, v európskych krajinách, odporúčaná maximálna hodnota 100mW. Každá krajina tieto hodnoty reguluje sama. (4)

Energiu získanú zberom z okolitého prostredia možno dočasne uskladniť v kondenzátoroch, superkondenzátoroch alebo batériách. Kondenzátory, najmä superkondenzátory, sa používajú v aplikáciách, kde sa očakávajú dočasné veľké prúdové špičky. Batérie sa naopak používajú, keď treba poskytnúť stály a stabilný tok energie. (4)

Tab. 1 Porovnanie parametrov superkondenzátora a lítium-ion batérie

FUNKCIA	SUPERKONDENZÁTOR	LÍTIUM-ION BATÉRIA (všeobecná)
Nabíjací čas	1 – 10 sekúnd	10 – 60 minút
Počet nabíjacích cyklov	1 milión alebo 30 000 h	500 a viac
Napätie jednej bunky	2.30 – 2.75V	3.6 – 3.7V
Typická energia	5 Wh / kg	100 – 200 Wh / kg
Typický výkon	do 10 kW / kg	1 – 3 kW / kg
Priemerná cena za Wh	15 €	1,50 €
Životnosť	10 – 15 rokov	5 – 10 rokov
Nabíjacia teplota	-40°C – 65°C	0°C – 45°C
Vybíjacia teplota	-40°C – 65°C	-20°C – 60°C

Súčasný záujem o nízkovýkonové získavanie energie nahráva vývoju nezávislých WSN. V týchto aplikáciách napájacia schéma pozostáva zo superkondenzátora, prípadne môže byť doplnená aj o batériu. Superkondenzátory majú prakticky neobmedzený počet nabíjacích cyklov a ich životnosť je výrazne vyššia ako životnosť batérií. (4)

## 1.1 Anténa

Anténa je elektrické zariadenie, ktoré prevádza elektrický prúd na rádiový signál a naopak. Pri vysielaní do antény prúdi oscilujúci prúd s určitou frekvenciou a anténa vyžaruje energiu prúdu ako elektromagnetické vlnenie (rádiový signál). Pri prijímaní, anténa zachytáva určitú časť energie rádiového signálu a mení ju na elektrický prúd pri nízkom napätí. (5)

Anténa obyčajne pozostáva z usporiadaných, elektricky prepojených kovových vodičov (elementov). Oscilujúci tok elektrónov vyvolá magnetické pole okolo elementov antény. Náboj elektrónov vytvorí elektrické pole okolo týchto elementov. Tieto časovo premenné polia vyžarujú do priestoru elektromagnetické žiarenie. Pri prijímaní oscilujúce elektrické a magnetické pole pôsobí na elektróny v elementoch antény a prinúti ich pohybovať sa sem a tam, čo vytvorí elektrický prúd v anténe. (5)

Základnou vlastnosťou antén je, že ich elektrické charakteristiky ako zisk, impedancia, šírka pásma, polarizácia a pod. sú rovnaké ako pri vysielaní, tak aj pri prijímaní. Je to dôsledok elektromagnetického teorému reciprocity. Nie je dôležité, či ide o vysielaciu alebo prijímaciu anténu. Nutnou podmienkou platnosti reciprocity je, že materiály, z ktorých je anténa vytvorená, majú rovnakú odozvu, resp. správanie na elektrický prúd alebo magnetické pole ako v jednom smere, tak aj v druhom. Väčšina materiálov tieto podmienky spĺňa. (5)

V ďalšom texte sú prijímacia aj vysielacia anténa považované za ekvivalentné z pohľadu ich vlastností.

### 1.1.1 Parametre antén

Pochopenie teórie antén, ich konštrukciu a fungovanie, nie je možné bez poznania parametrov. V ďalšom texte sa venujem základným parametrom antén.

Tab. 2 Prehľad základných frekvenčných pásiem a ich aplikácie

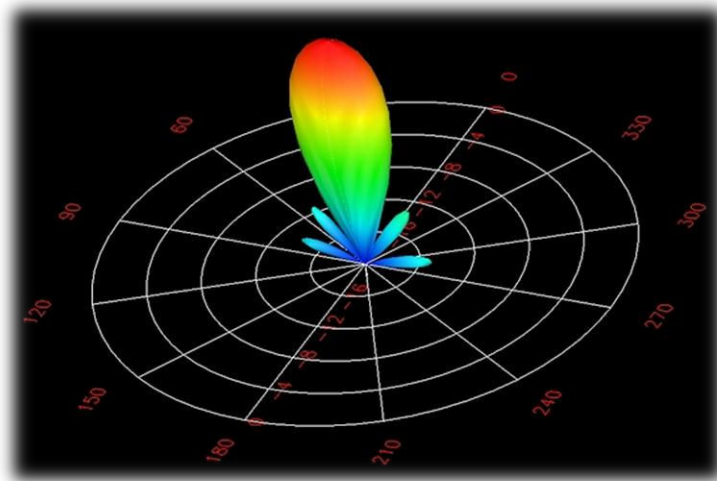
NÁZOV PÁSMSA	ROZSAH FREKVenciÍ	VLNOVÁ DĹŽKA	APLIKÁCIA
Extrémne nízke frekvencie ( <i>ELF</i> )	3 – 30 Hz	10 000 – 100 000 km	Podmorská komunikácia
Super nízke frekvencie ( <i>SLF</i> )	30 – 300 Hz	1 000 – 10 000 km	AC elektronika
Ultra nízke frekvencie ( <i>ULF</i> )	300 – 3 000 Hz	100 – 1 000 km	Pozemné vojenské komunikačné systémy
Veľmi nízke frekvencie ( <i>VLf</i> )	3 – 30 kHz	10 – 100 km	Navigačné majáky
Nízke frekvencie ( <i>LF</i> )	30 – 300 kHz	1 – 10 km	AM rádio
Stredné frekvencie ( <i>MF</i> )	300 – 3 000 kHz	100 – 1 000 m	Letectvo a AM rádio
Vysoké frekvencie ( <i>HF</i> )	3 – 30 MHz	10 – 100 m	Krátkovlnné rádio
Veľmi vysoké frekvencie ( <i>VHF</i> )	30 – 300 MHz	1 – 10 m	FM rádio
Ultra vysoké frekvencie ( <i>UHF</i> )	300 – 3 000 MHz	10 – 100 cm	Televízia, mobilné telefóny, GPS, WIFI
Super vysoké frekvencie ( <i>SHF</i> )	3 – 30 GHz	1 – 10 cm	Satelitné linky, WIFI, bezdrôtová komunikácia
Extrémne vysoké frekvencie ( <i>EHF</i> )	30 – 300 GHz	1 – 10 mm	Astronómia, vzdialené pozorovanie objektov vo vesmíre
Viditeľné spektrum	400 – 790 THz	380 – 750 nm	Ľudské oko

## Frekvenčné pásmo

Množina všetkých možných frekvencií sa nazýva spektrum. Toto spektrum je rozdelené na frekvenčné pásma. Frekvenčné pásmo je pojem označujúci interval frekvencií, v ktorom má anténa fungovať, resp. má zadané vlastnosti. Je dané dolnou a hornou hranicou frekvencie. Prehľad základných frekvenčných pásiem a ich aplikácií je uvedený v tab. 2. (6)

## Radiačný diagram

Radiačný diagram definuje rozloženie energie vyžarovanej anténou ako funkciu smeru žiarenia od antény. Tieto diagramy dokážu generovať sofistikované komerčné programy špeciálne určené na dizajn antén. Na obr. 3 je zobrazený priestorový radiačný diagram striktne smerovej antény. (7)



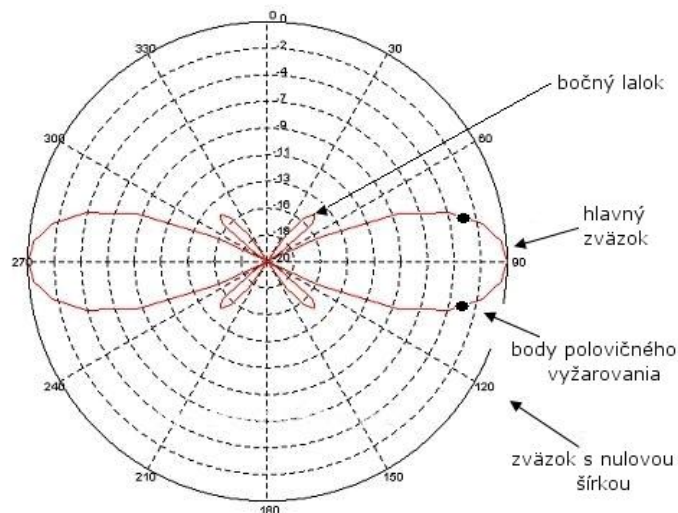
Obr. 3 Priestorový radiačný diagram smerovej antény

## Hlavný zväzok a vedľajšie laloky radiačného diagramu

Hlavný zväzok, alebo hlavný lalok, je časť radiačného diagramu pozdĺž smeru maximálnej radiácie. Na obr. 4 je hlavný zväzok centrovaný okolo 90 stupňov. (8)

Vedľajšie laloky sú malé zväzky žiarenia nepatriace do hlavného zväzku žiarenia. Tieto laloky sú zvyčajne žiarenia v nežiadúcich smeroch, ktoré nemožno nikdy úplne vylúčiť. Na obr. 4 sa vedľajšie laloky vyskytujú približne na 45 a 135 stupňoch. (8)

Uhol polovičného vyžarovania je uhol, ktorý zvierajú body reprezentujúce pokles vyžarovanej energie o 50 percent (-3dB) od vrcholu hlavného zväzku. Na obr. 4 je to  $77^\circ$  a  $102^\circ$ . Uhol polovičného vyžarovania je teda  $25^\circ$  ( $102^\circ - 77^\circ$ ). (8)



Obr. 4 Polárny radiačný diagram

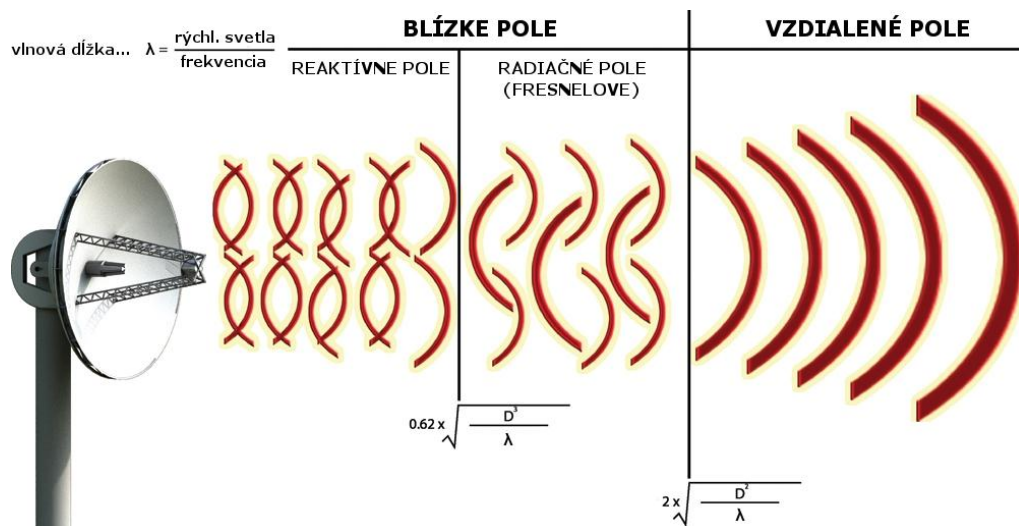
Úroveň vedľajších lalokov je ďalší dôležitý parameter radiačného diagramu. Táto úroveň reprezentuje maximálnu hodnotu vedľajšieho laloka a označuje sa SLL (SideLobe Level). Na obr. 4 je SLL rovné približne  $-14,5\text{dB}$ . (8)

### Radiačné polia

Polia obklopujúce anténu je možné rozdeliť podľa referencie (9) do troch regiónov:

- reaktívne blízke pole,
- radiačné blízke pole (Fresnelov región),
- vzdialené pole (Fraunhoferov región).

Reaktívne blízke pole sa nachádza v bezprostrednej blízkosti antény. V tejto časti je veľmi ťažké predvídať vzťah medzi E (elektrickým) a B (magnetickým) poľom. Dominovať môže ktorýkoľvek komponent poľa, elektrický alebo magnetický. Tento fakt sťažuje zistenie skutočnej hustoty vyžarovanej energie. Elektromagnetická vlna nie je len vyžarovaná, ale obsahuje aj reaktívnu zložku, čo znamená, že povaha poľa okolo antény je citlivá a reaguje na EM útlm v tejto oblasti. Určité množstvo energie sa vracia späť do antény a ostáva v bezprostrednej blízkosti jej povrchu. Táto energia kmitá od antény do poľa sem a tam. (9)



**Obr. 5** Radiačné polia antény ( $D$  predstavuje maximálny lineárny rozmer antény)

Radiačné pole sa nachádza medzi reaktívnym a vzdialeným poľom. Toto pole už neobsahuje reaktívne zložky, pretože je dostatočne ďaleko od antény. Napriek tomu, že energia je v tomto poli čisto radiačná, elektromagnetické pole je stále odlišné od vzdialeného poľa. Vzťah medzi magnetickou a elektrickou zložkou je viac predvídateľný ako v reaktívnom poli, no stále existuje potenciál nepredvídateľných a neočakávaných nepriaznivých elementov. (9)

Vzdialené pole, ako názov napovedá, sa nachádza ďaleko od antény vzhľadom na jej rozmery. Radiačný diagram je ustálený a so vzdialenosťou sa už nemení. (9)

### Smerovosť

Smerovosť antény je jeden z jej fundamentálnych parametrov. Je meradlom toho, ako smerový je vyžarovací diagram antény. Ak anténa rovnomerne vyžaruje vo všetkých smeroch, jej skutočná smerovosť je rovná jednej (0dB). (10)

Smerovosť je daná nasledovným vzťahom:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \delta)|^2 \sin\theta \, d\theta \, d\delta} \quad (1.1)$$

$F(\theta, \delta)$  je funkcia sférických súradníc reprezentujúca normalizovaný radiačný diagram. (10)

Čitateľ vzťahu (1.1) reprezentuje maximálnu hodnotu  $F$  a menovateľ predstavuje priemerný výkon vyžarovaný všetkými smermi. (10)

Antény pre mobilné telefóny by mali mať nízku smerovosť, pretože signál môže prísť z ktoréhokoľvek smeru. Naopak, satelitné antény by mali mať veľmi vysokú smerovosť, pretože prijímajú signál z fixného bodu (ak hovoríme o geostacionárnych družiciach). V tab. 3 je prehľad smerovostí niektorých typov antén. (10)

**Tab. 3** Prehľad smerovostí niektorých typov antén

TYP ANTÉNY	TYPICKÁ SMEROVOSŤ	SMEROVOSŤ v dB
Krátka dipólová anténa	1,5	1,76
Polvlnná dipólová anténa	1,64	2,15
Mikropásiková anténa	3,2 – 6,3	5 – 8
Lieviková anténa	10 – 100	10 – 20
Parabolická anténa	10 – 10 000	10 – 40

Typmi antén sa zaoberá časť 1.1.2.

### Účinnosť

Účinnosť antény sa týka energie prijatej na vstupe, vyžiarenej energie a rozptýlenej energie. Anténa s vysokou účinnosťou má množstvo vyžiarenej energie blízke množstvu energie na vstupe. Anténa s nízkou účinnosťou väčšinu energie absorbuje alebo vyžiari mimo, kvôli impedančnej nerovnosti antény a napájacieho obvodu. Straty antény sú zvyčajne spôsobené stratami vodičov – konečnou vodivosťou antény a dielektrickým stratám. Účinnosť je pomer vyžiarenej energie a energie na vstupe antény. Vyjadruje sa najčastejšie v percentách, ale toto číslo patrí vždy do uzavretého intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . (11)

Účinnosť antény je daná nasledovným vzťahom:

$$\varepsilon_R = \frac{P_{\text{vyžiarený}}}{P_{\text{vstupný}}} \quad (1.2)$$

Účinnosť parabolických antén, mikrovlnných WIFI antén, antén v spotrebnej elektronike (napr. mobilné telefóny) je bežne 20 až 70 percent (-7 až -1.5 dB). Na druhej strane, rádiové AM antény majú účinnosť iba okolo 1 percenta (-20dB). Je to spôsobené tým, že antény sú omnoho menšie ako polovica vlnovej dĺžky (vlnová dĺžka má veľkosť 1 až 10 km). Prijem je zabezpečený vysokým vysielačím výkonom AM vysielačov. (11)

## Zisk antény

Pojem zisk antény vyjadruje koľko energie je prenášanej v smere maximálneho žiarenia z homogénneho zdroja. Zisk antény sa používa pri praktickom určovaní kvality antén, pretože zohľadňuje aj skutočné straty, ktoré nastanú. Anténa so ziskom 3 dB znamená, že prijatá energia antény je o 3 dB vyššia (dvojnásobná), ako by prijala bezstratová izotropná anténa s rovnakou vstupnou energiou. (11)

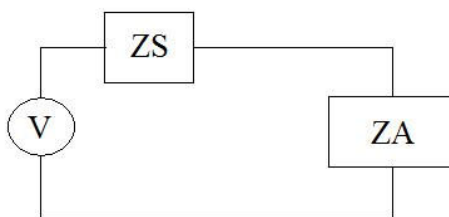
Zisk antény je súčin účinnosti antény a jej smerovosti a je definovaný nasledovným vzťahom:

$$G = \varepsilon_R D \quad (1.3)$$

Zisk reálnej antény môže byť aj 40 až 50 dB (parabolické antény), teoreticky však nemôže byť menší ako nula. (11)

## Impedancia antény

Impedancia antény vyjadruje závislosť prúdu na napätí na vstupe antény. Ak je impedancia reálne číslo, prúd je vo fáze s napätím – prúd nezaostáva za napätím. Takejto anténe hovoríme rezonančná. Reálna časť impedancie antény predstavuje energiu vyžiarenú alebo absorbovanú anténou. Imaginárna časť predstavuje energiu, ktorá sa nachádza v blízkom reaktívnom poli antény. (12)



Obr. 6 Model antény spojenej s napätovým zdrojom

Ak sa jedná o anténu pre aplikáciu nízkych frekvencií, prenosové vedenie k alebo od antény je krátke. Je relatívne krátke vzhľadom na vlnovú dĺžku príslušnej nízkej frekvencie. Ak je dĺžka prenosového vedenia kratšia ako desatina vlnovej dĺžky, toto vedenie je považované za krátke. Pri zapojení znázornenom na obr. 6 by na dosiahnutie maximálneho prenosu energie z/do antény, je ideálna hodnota impedancie: (12)

$$Z_A = Z_S^* \quad (1.4)$$

kde znak \* reprezentuje komplexne združené číslo.



Ak sa jedná o vysokofrekvenčnú aplikáciu antény, všetko sa mení. Dĺžka prenosového vedenia predstavuje významnú časť vlnovej dĺžky použitej frekvencie. Napríklad, ak má vysielací obvod nulovú impedanciu, na konci prenosového vedenia s dĺžkou jednej štvrtiny vlnovej dĺžky frekvencie, sa impedancia javí ako nekonečná aj napriek tomu, že vysielací obvod je vodivo spojený s anténou. Všeobecne platí, že prenosové vedenie transformuje impedanciu antény, takže je ťažké prenášať energiu ak nie je prenosové vedenie impedančne vyvážené s impedanciou antény. Ak dôjde k impedančnej nerovnosti, prenos energie je neefektívny a energia sa stráca v odrazoch od antény alebo vysielacieho obvodu. (12)

Vyváženosť impedancie antény s vysielacím/prijímacím obvodom charakterizuje hodnota VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Je to reálne číslo, vždy väčšie alebo rovné jednej. Hodnota VSWR rovná 1 určuje impedančnú rovnosť, všetky hodnoty väčšie ako jedna hovoria o impedančnej nerovnosti. Napríklad,  $VSWR = 3,0$  predstavuje 75% z celkovej energie doručenej do antény.  $VSWR = 7,0$  predstavuje už iba 44% z celkovej energie doručenej do antény. Hodnoty VSWR vyššie ako 6.0 sú považované za vysoké a obyčajne si vyžadujú zmenu návrhu antény alebo lepší návrh impedančného vyrovnávacieho obvodu. (12)

### **Šírka pásma**

Šírka pásma je ďalším dôležitým parametrom antény. Opisuje rozsah kmitočtov, nad ktorými anténa správne vyžaruje alebo prijíma energiu. Je často jedným z kľúčových parametrov pri výbere antény. Šírka pásma je obyčajne kótovaná vzhľadom na VSWR. Napríklad, anténa môže pracovať na frekvenciách 100 až 400 MHz pri  $VSWR < 1,5$ . To znamená, že koeficient odrazu je menší ako 0.2 v celom frekvenčnom rozsahu a iba 4% z celkovej energie sa odrazia späť do vysielacieho/prijímacieho obvodu. Treba však poznamenať, že to neznamená, že zvyšných 96% sa vyžiarí ako elektromagnetické vlnenie – treba počítať so stratami. (13)

Šírka pásma je často špecifikovaná aj pomocou zlomkovej šírky pásma (FBW). Je to rozdiel maximálnej a minimálnej frekvencie frekvenčného rozsahu podelený strednou frekvenciou. V tab. 4 je uvedený prehľad šírky pásma niektorých druhov antén. (13)

Tab. 4 Prehľad šírky pásma niektorých typov antén

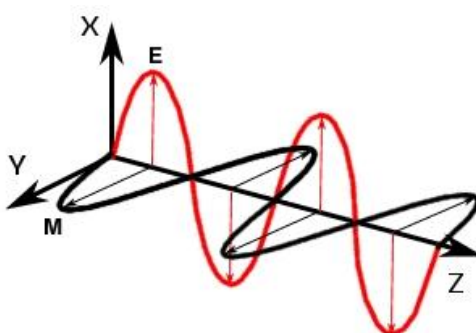
TYP ANTÉNY	STREDNÁ FREKV.	FREKV. ROZSAH	FBW	PERCENTUÁLNE VYJADRENIE ŠÍRKY PÁSMO
Mikropásiková	1000MHz	985 – 1015 MHz	0.03	3%
Dipólová	1000MHz	960 – 1040 MHz	0.08	8%
Lieviková	1000MHz	154 – 1848 MHz	1.694	169,4%
Špirálová	1000MHz	95 – 1900 MHz	1.805	180,5%

Z vyššie uvedenej tabuľky vyplýva, že mikropásiková anténa je veľmi úzkopásmová, na rozdiel od špirálovej, ktorá je naopak veľmi širokopásmová.

### Polarizácia

Polarizácia antény predstavuje polarizáciu EM poľa vyžiareného anténou a patrí medzi dôležité vlastnosti antény. Poznáme lineárnu, kruhovú a elipsovú polarizáciu. (14)

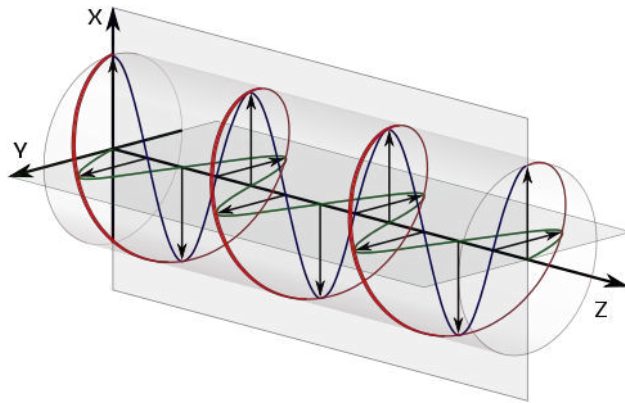
Pri lineárnej polarizácii EM vlna cestuje v jednom smere. Elektrické pole (E) a magnetické pole (M) sú kolmé na seba a na rovinu, v ktorej cestujú. Predstavme si elektromagnetické pole cestujúce v smere osi z. Elektrické pole orientované v osi x a magnetické pole v osi y. Vzhľadom na to, že elektrické pole osciluje okolo jednej priamky, hovoríme že toto pole je lineárne polarizované. (14)



Obr. 7 Lineárne polarizovaná elektromagnetická vlna

Ak os x je paralelná so zemou, elektrické pole možno označiť ako horizontálne polarizované. Ak je kolmé na zem, hovoríme o vertikálne polarizovanom poli. Poznamenajme, že lineárne polarizované pole nemusí byť vyslovene oscilujúce podľa osi, ale môže s ňou zvierat uhol, musí však oscilovať v jednej rovine. (14)

Pri kruhovej polarizácii elektromagnetické pole rotuje okolo osi  $z$ . Na to, aby EM pole bolo kruhovo polarizované, musia mať dve na seba kolmé polvlny elektrického poľa rovnakú amplitúdu a musia byť navzájom fázovo posunuté o  $90^\circ$ . Ak EM pole rotuje v smere hodinových ručičiek, jedná sa o ľavotočivú kruhovú polarizáciu LHCP (Left Hand Circular Polarisation), ak rotuje v protismere hodinových ručičiek, jedná sa o pravotočivú kruhovú polarizáciu RHCP (Right Hand Circular Polarisation). (14)



**Obr. 8** Pravotočivá kruhová polarizácia

Eliptická polarizácia je modifikácia kruhovej. EM pole má takisto dve na seba kolmé polvlny navzájom fázovo posunuté o  $90^\circ$ , ale ich amplitúdy sú rôzne veľké. Eliptická polarizácia môže byť tiež pravotočivá alebo ľavotočivá. (14)

Existujú aj ďalšie parametre, ktoré súvisia s anténami, nepatria však medzi základné. V odbornej literatúre sa uvádzajú parametre ako teplota antény (popisuje koľko šumu produkuje anténa v danom prostredí), či účinná plocha antény. S teóriou antén takisto súvisí aj Friisova prenosová funkcia, avšak to už nie je vlastnosť antény – popisuje straty preneseného signálu vplyvom okolitého prostredia.

### 1.1.2 Typy antén

Každá zložitejšia anténa je kombináciou základných typov antén uvedených v tejto časti. Existuje mnoho kritérií, na základe ktorých je možné rozdeliť antény. V nasledujúcom texte sú uvedené len niektoré druhy antén. (15)

#### Základné kategórie

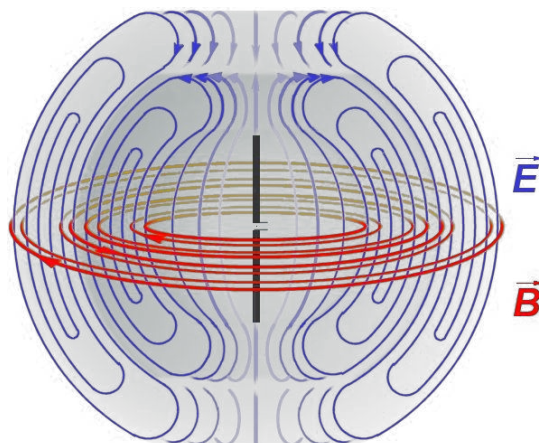
- Prútové antény
- Odrazové antény

- Štrbinové antény
- Antény s postupujúcou vlnou
- Mikropásikové antény
- Iné

### Prútové antény

Medzi prútové antény patria dipólové antény (klasické, krátke, polvlnné, uzavreté), monopólová anténa, anténa s malou uzavretou slučkou a iné.

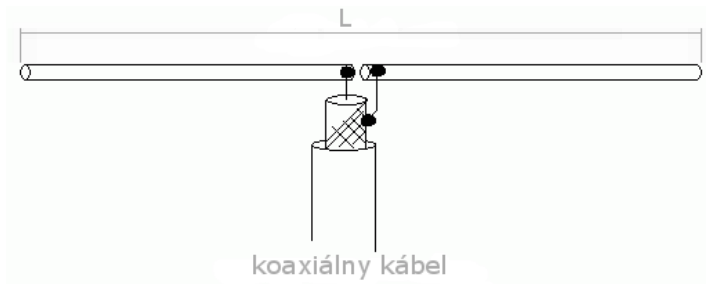
Dipólová anténa sa skladá z dvoch paralelne orientovaných vodičov v jednej línii s malým priestorom medzi nimi. Oscilujúce napätie pôsobí v centre antény medzi dvoma vodičmi. Z teoretického hľadiska sú tieto antény najjednoduchšie. Dipólové antény vynašiel nemecký fyzik Heinrich Hertz okolo roku 1886 v rámci svojich experimentov s rádiovými vlnami. (16)



**Obr. 9** Elektromagnetické pole v okolí dipólovej antény ( $E$  – elektrické pole;  $B$  – magnetické pole)

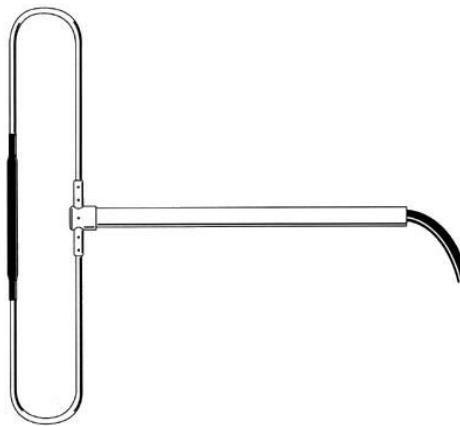
Krátka dipólová anténa je modifikácia klasickej dipólovej antény. Význam slova „krátka“ alebo „malý“ sa v teórii antén odvodzuje od vlnovej dĺžky. Nezáleží na absolútnej veľkosti antény. Záleží na relatívnej veľkosti vodiča, z ktorého je anténa vyrobená, vzhľadom k vlnovej dĺžke pracovnej frekvencie antény. Dipólová anténa je krátka, ak jej dĺžka je menšia ako desatina vlnovej dĺžky frekvencie. (15)

Polvlnná dipólová anténa je opäť modifikácia klasickej dipólovej antény. „Polvlnná“ znamená, že dĺžka vodiča, z ktorého je anténa vyrobená, je rovná polovici vlnovej dĺžky pracovnej frekvencie antény. (15)



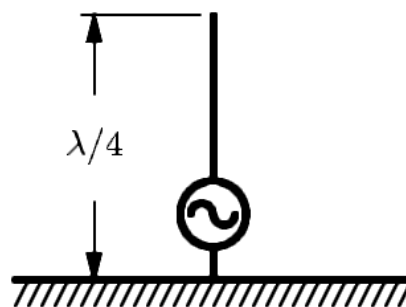
**Obr. 10** Dipólová anténa – krátka ak  $L < \lambda/10$ ; polvlnná ak  $L = \lambda/2$  ( $\lambda$  – vlnová dĺžka)

Uzavretá dipólová anténa má konce dipólu navzájom prepojené tak, že formujú uzavretú slučku. Šírka slučky je omnoho menšia ako jej dĺžka. (15)



**Obr. 11** Uzavretá dipólová anténa (na príjem terestriálneho televízneho vysielania v pásme VHF)

Monopólová anténa je polovičná dipólová anténa takmer vždy postavená nad vodivou rovinou predstavujúcou zem. EM pole nad vodivou rovinou zeme je ekvivalentné elektromagnetickému poľu generovanému klasickou dipólovou anténou. (15)

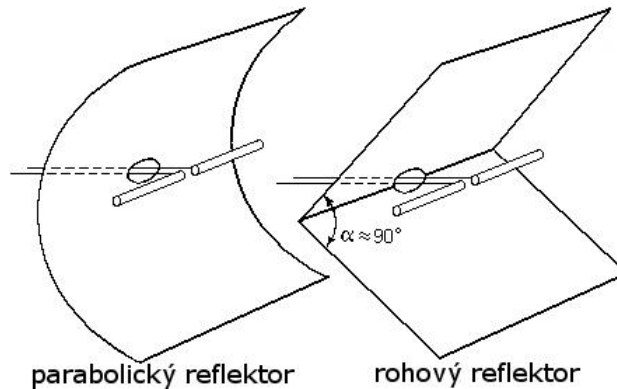


**Obr. 12** Schematický náčrt monopólovej antény (ekvivalent dipólovej antény s dĺžkou  $L=\lambda/2$ )

### Odrazové antény

Prútové antény sú všesmerové t.j. vyžarujú rádiový signál všetkými smermi. Zvýšiť smerovosť antény je možné intuitívnym riešením, a to pridaním odrazovej plochy tzv.

reflektora za anténu. Reflektor je vodivá plocha, ktorá môže byť rovná, môže pozostávať z dvoch rovných plôch zvierajúcich nejaký uhol (najčastejšie tupý uhol), prípadne reflektor môže byť aj parabolický. (15)

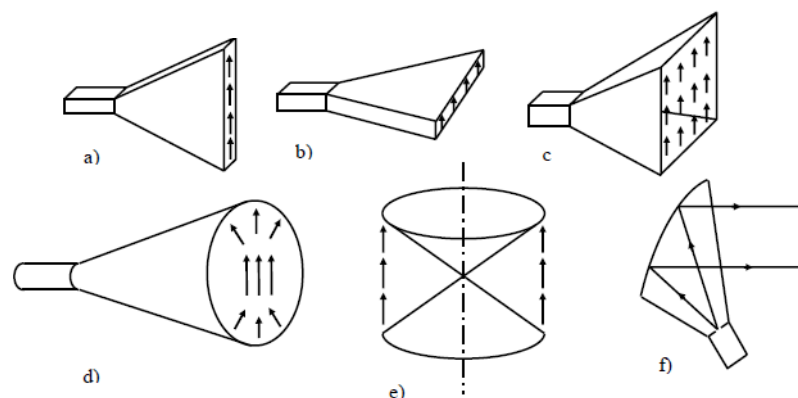


Obr. 13 Ukážka jednotlivých reflektorov

Najznámejším typom odrazovej antény je parabolická odrazová anténa taktiež známa ako satelitná anténa, resp. satelitný tanier. Tento typ antén má veľmi vysoký zisk, preto sa používajú napríklad na príjem satelitného televízneho vysielania DVB-S.

### Štrbinové antény

Štrbinové antény sa používajú v mnohých aplikáciách pracujúcich na frekvenciách v rozmedzí od 300 MHz do 24 GHz, najmä v mikrovlnnej technike. Tento druh antén je veľmi populárny, pretože môže byť vystrihnutý z akéhokoľvek vodivého materiálu. Najjednoduchšiu štrbinovú anténu predstavuje nekonečne veľká vodivá platňa s vyrezanou štrbinou resp. vyrezaným otvorom tvaru obdĺžnika so šírkou omnoho menšou ako dĺžka. Štrbinové antény sú všesmerové. Vlastnosti ako veľkosť, tvar či pozadie štrbiny určujú výkon antény. (15)



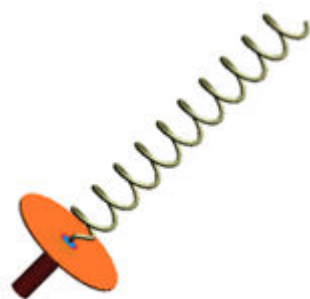
Obr. 14 Typy lieviových antén: (a) – typ E; (b) – typ H; (c) – ihlanová; (d) – kužeľová; (e) – dvojkužeľová; (f) – lieviko-parabolická

Praktické aplikácie štrbinových antén sú lievnikové antény. Často sa používajú v UHF. Ich žiarenie je smerové a majú vysoký zisk. Niektoré základné tvary lievnikových antén sú na obr. 14. (15)

### Antény s postupujúcou vlnou

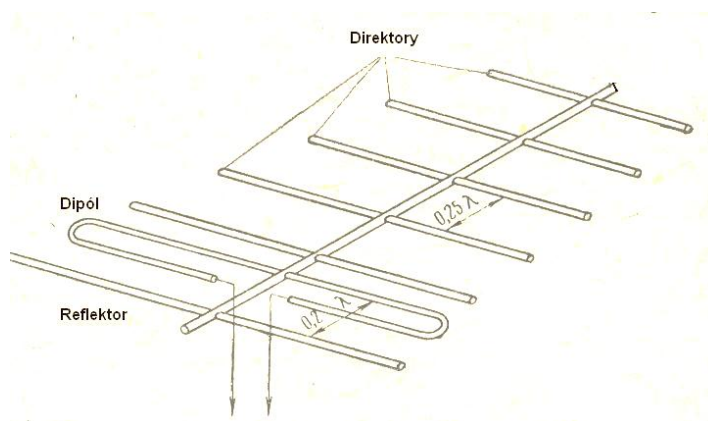
Medzi antény s postupujúcou vlnou patria helixové antény, Yagi-Uda antény a špirálové antény. Prúd v nich prúdi pozdĺž antény a fáza sa medzitým neustále mení. (15)

Helixové antény majú nápadný tvar, ako je možné vidieť na obr. 15. Je v podobe skrutkovice, pričom žiarenie sa vytvára pozdĺž jej osi. Tento druh antén má veľkú šírku pásma, je ľahko konštruovateľný, má reálnu vstupnú impedanciu a produkuje kruhovo polarizované EM žiarenie. (15)



Obr. 15 Helixová anténa

Yagi-Uda anténa, alebo iba Yagi anténa, je jedna z najdômyselnejšie skontštruovaných antén. Dá sa ľahko postaviť, má vysoký zisk (viac ako 10 dB) a obvykle pracuje v UHF alebo HF frekvenčnom pásme. Šírka pásma takejto antény zvyčajne malá – veľmi malé pásmo okolo strednej frekvencie. Bola vynájdená v Japonsku, kde ju prvýkrát publikoval Šintaro Uda, v angličtine ju prezentoval jeho kolega Yagi.



Obr. 16 Yagi-Uda anténa

Táto anténa sa skladá z jedného zdroja, resp. prijímača/vysielača, typicky dipólu alebo uzavretého dipólu. Tento dipól je prakticky jediný budený signálom a nachádza sa takmer vždy na predposlednom mieste. Ostatné prvky sú parazitné – odrážajú alebo pomáhajú prenášať/prijímať energiu v určitom smere a nazývajú sa direktory. Posledný element antény je reflektor. (15)

Špirálové antény sú frekvenčne nezávislé, čo znamená, že majú veľmi veľkú šírku pásma. Frakčná šírka pásma môže byť až 30:1 – ak je najnižšia frekvencia šírky pásma antény 1 GHz, anténa môže stále prijímať signály aj z frekvencie 30 GHz a každú frekvenciu medzi tým. Špirálové antény sú zvyčajne kruhovo polarizované. Vyžarovacia schéma je obvykle kolmá na rovinu špirály a vyžiarený lúč má 70 až 90 stupňov. Tieto antény sú často využívané v oblasti obranného priemyslu, kde sú potrebné širokopásmové antény nezaberajúce veľa miesta. Polia špirálových antén sa používajú vo vojenských lietadlách na frekvenciách od 1 GHz do 18 GHz. Ďalšie aplikácie zahŕňajú napríklad špirálové GPS antény, kde je výhodné mať pravotočivo kruhovo polarizované antény. (15)



**Obr. 17** Plošná špirálová anténa

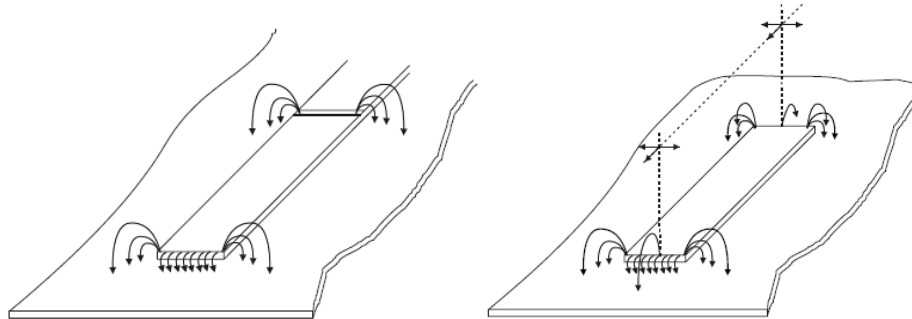
Plošná špirálová anténa na obr. 17 má maximálne žiarenie v prednej a zadnej časti roviny antény. Vyžaruje pravotočivo kruhovo polarizované pole smerom k čitateľovi a ľavotočivo kruhovo polarizované pole smerom od čitateľa. Na zistenie smeru kruhovej polarizácie sa používa pravidlo pravej alebo ľavej ruky. (15)

### **Mikropásikové antény**

Myšlienka použiť mikropásikové antény vznikla v päťdesiatych rokoch minulého storočia, ale viac sa uplatnili až v rokoch sedemdesiatych. Umožnil to pokrok v kvalite a technológii výroby substrátov – dielektrických podložiek, na ktorých sú mikropásikové antény realizované. Ďalšími faktormi ich rozmachu boli nízke náklady, jednoduchosť, zlučiteľnosť s integrovanými obvodmi a schopnosť tvarovo sa prispôbiť zakriveným povrchom rôznych telies. (17)



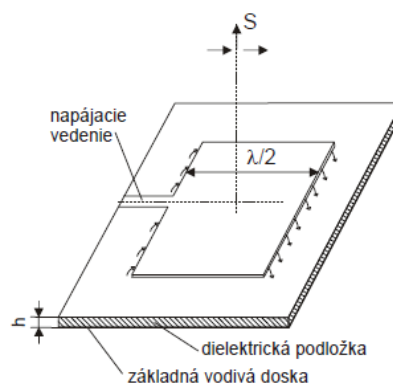
Vyžarovanie (resp. príjem) elektromagnetických vln mikropásikovej antény je demonštrovaný na rozložení siločiar elektrického poľa v oblasti okolo mikropásikového vedenia znázornenom na Obr. 18. (17)



**Obr. 18** Rozloženie siločiar elektrického poľa dlhého mikropásika (vľavo) a krátkeho mikropásika (vpravo)

Súmerné rozloženie siločiar po oboch stranách vedenia spôsobuje, že zložky elektrického poľa pôsobia proti sebe a nevzniká žiadne podstatné vyžarovanie elektromagnetickej energie. K vyžarovaniu energie nedochádza ani vtedy, ak sa jedná o kratší kus mikropásikového vedenia (obr. 18 vpravo). Je to preto, že elektrické zložky elektromagnetického poľa v priestore sú v protifáze. (17)

Iná situácia nastane, ak bude pozdĺžny smer mikropásiku rovný polovici vlnovej dĺžky (obr. 19). Elektrické zložky elektromagnetického poľa na oboch koncoch mikropásika budú vo fáze v dôsledku sínusového rozloženia poľa pozdĺž vedenia a nastane vyžarovanie energie v kolmom smere (S) k rovine mikropásikového vedenia. (17)



**Obr. 19** Orientácia siločiar mikropásikovej antény s dĺžkou  $\lambda/2$

Mikropásikovým anténam sa vzhľadom na ich využitie pri experimentálnych meraniach, bližšie venujem v nasledujúcej časti.

### 1.1.3 Mikropásikové antény

Mikropásiková anténa v jej najjednoduchšom prevedení pozostáva z vyžarujúceho plátku (patch) na jednej strane dielektrického substrátu a vodivej roviny na druhej strane substrátu. Tento plátok tvorený zlatom alebo meďou môže nadobúdať prakticky ľubovoľný plošný tvar, ale používajú sa hlavne regulárne tvary pre zjednodušenie analýzy a určenie charakteristík. Ideálna dielektrická konštanta substrátu je veľmi malá ( $\epsilon_r < 2,5$ ) kvôli zväčšeniu okrajových polí, ktoré sú zodpovedné za vyžarovanie. Niektoré substráty majú flexibilné (ohybné) vlastnosti, ktoré ich robia vhodnými pre montáž na rôzne tvarované objekty. (17)

#### Výhody a nevýhody mikropásikových antén

V porovnaní s tradičnými mikrovlnnými anténami, mikropásikové antény majú niekoľko výhod. Mnohé aplikácie pokrývajú frekvenčné pásmo od 100 MHz do 100 GHz. Principiálne výhody mikropásikových antén oproti tradičným anténam podľa (17) sú:

- nízka hmotnosť, malé rozmery, nízky profil,
- nízke výrobné náklady, možnosť hromadnej výroby,
- lineárna a kruhová polarizácia s jednoduchým napájaním,
- ľahko sa dajú vyrobiť duálne-frekvenčné a duálne-polarizované antény,
- dutinová výstuž nie je požadovaná,
- môže byť ľahko včlenená do mikrovlnných integrovaných obvodov,
- napájacie vedenia a prispôsobovacie prvky môžu byť vyrobené súčasne s anténou štruktúrou.

Mikropásikové antény majú aj niekoľko nevýhod v porovnaní s tradičnými mikrovlnnými anténami podľa (17):

- úzka šírka pásma a tolerančné problémy,
- nízky zisk (približne 6 dB),
- značné ohmické straty v napájacej štruktúre poľa,
- väčšinou vyžarujú do polpriestoru,
- zložité napájacie štruktúry sú požadované pre vysoko-výkonné polia,
- je zložité dosiahnuť polarizačnú čistotu,
- parazitné vyžarovanie z napájacej sústavy a kontaktov,

- schopnosť nižšej výkonovej spracovateľnosti (približne 100 W),
- znížený zisk a účinnosť, ako aj neakceptovateľne vysoké úrovne krížovej polarizácie a vzájomná väzba v priestore tela antény pri vysokých frekvenciách,
- vybudzovanie povrchových vln,
- mikropásikové antény vyrobené so substrátom s veľkou dielektrickou konštantou sú veľmi uprednostňované pre ľahkú integráciu s predradnou technikou obvodov, hoci použitie veľkej dielektrickej konštanty substrátu vedie k slabej účinnosti a úzkej šírke pásma.

Napriek spomenutým nevýhodám, ktoré znejú závažne, existujú spôsoby ako minimalizovať vplyv niektorých z nich. Napríklad, je možné zväčšiť šírku pásma aj o viac ako 60% použitím špeciálnych techník návrhu, obmedzenia nižšej výkonovej spracovateľnosti môžu byť prekonané inou konfiguráciou mikropásikového poľa. Obmedzenia spojené s povrchovými vlnami ako slabá účinnosť, zvýšená vzájomná väzba, znížený zisk či degradovaná smerová charakteristika môžu byť zmiernené použitím fotónických charakteristických štruktúr. (17)

Podrobný výklad o technikách eliminácie týchto nedostatkov je uvedený v (17). Uvedený zdroj tiež popisuje mechanizmu vyžarovania mikropásikovej antény, matematické modely, metódy analýzy mikropásikových antén, spôsoby napájania a iné.

### **Konfigurácie mikropásikových antén**

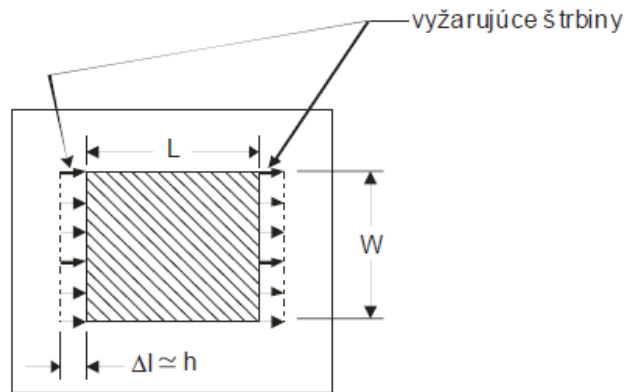
Základné rozdelenie podľa (17):

- mikropásikové patch antény,
- mikropásikový dipól,
- mikropásikové štrbinové antény,
- mikropásikové antény s postupujúcou vlnou.

V ďalšom texte sa zaoberám vybranými vlastnosťami a rozdielnosťami týchto antén.

## Mikropásikové patch antény

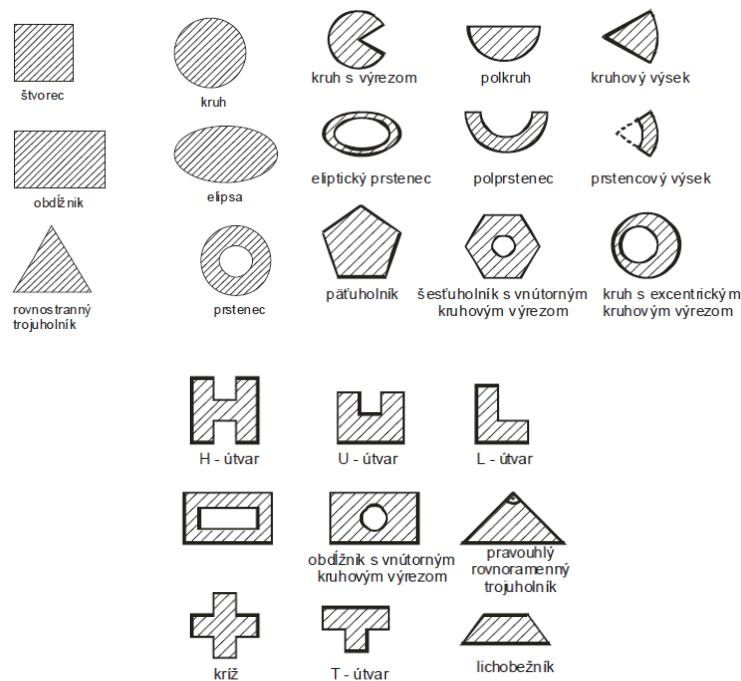
Základná reprezentácia mikropásikovej patch antény s najčastejšie používaným tvarom – obdĺžnik, je zobrazená na obr. 20.



Obr. 20 Pravouhlá mikropásiková anténa

Vlastnosti podľa (17):

- najpoužívanejšie tvary sú pravouhlé,
- typický zisk 5 až 6 dB,
- šírka hlavného laloka je 70 až 90 stupňov,
- vodivá základňa pod pásikmi resp. plátkami (patchmi) vyžaruje len do polpriestoru,
- šírka vyžarujúcej štrbiny  $\Delta l$  je približne rovná hrúbke substrátu  $h$ ,
- výška dielektrického substrátu  $h$  je v rozmedzí  $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$ , kde  $\lambda_0$  je vlnová dĺžka vo voľnom priestore,
- dĺžka  $L$  plátku je zvyčajne  $0,333\lambda_0 < L < 0,5\lambda_0$ ,
- šírka  $W$  plátku je približne  $W \approx 0,5\lambda_0$ ,
- dielektrická konštanta substrátu je v rámci intervalu  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$



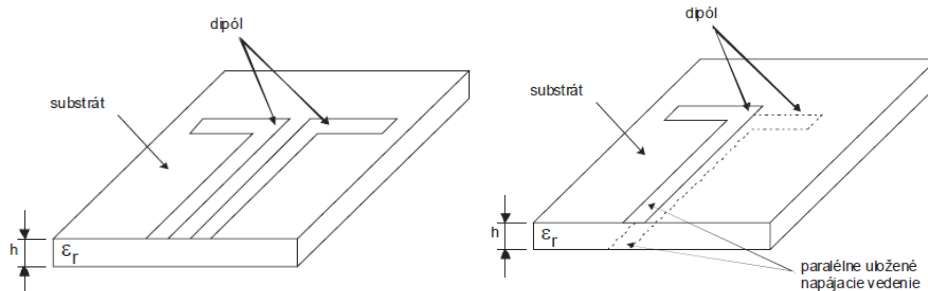
Obr. 21 Základné tvary mikropásikových antén

Základné tvary mikropásikových patch antén, ktorých kombináciou vznikajú nové antény niekedy s lepšími vlastnosťami ako mikropásikové antény základných tvarov, sú zobrazené na obr. 21.

### Mikropásikový dipól

Poznáme niekoľko rozdielnych konfigurácií mikropásikového dipólu. Medzi základné patria (17):

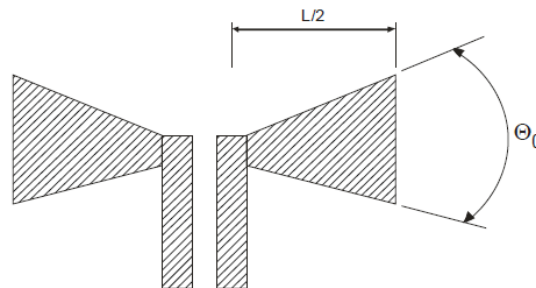
- sústredne napájaný jednostranný a obojstranný dipól s pravouhlými mikropásikmi obr. 22,
- Sústredne napájaný jednostranný (obr. 23) a obojstranný dipól s trojuholníkovými mikropásikmi, označovaný ako motýlik.



Obr. 22 Sústredne napájaný dipól s pravouhlými mikropásikmi; jednostranný vľavo a obojstranný vpravo

Vlastnosti podľa (17):

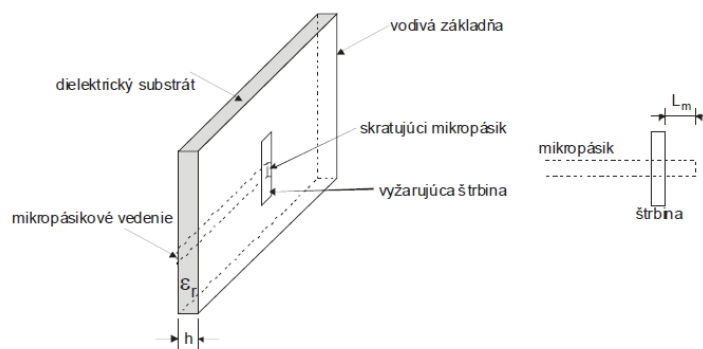
- je to mikropásikový plátok, ktorého šírku  $W$  považujeme za približne nulovú – bežne menšiu než  $0,05\lambda$ , kde  $\lambda$  je vlnová dĺžka vyžarovaného signálu,
- má rozdielne napájacie štruktúry,
- môže byť s alebo bez vodivej základne.



Obr. 23 Sústredne napájaný jednostranný dipól s trojuholníkovými mikropásikmi (nazývaný motílik)

### Mikropásikové štrbinové antény

Základná reprezentácia mikropásikovej štrbinovej antény je uvedená na obr. 24.



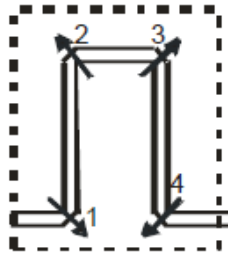
Obr. 24 Základná reprezentácia mikropásikovej štrbinovej antény

Vlastnosti podľa (17):

- sú to komplementárne štruktúry k mikropásikovým patch anténam,
- obvykle obojsmerne vyžarujúce, t.j. vyžarujú do celého priestoru,
- na jednej strane substrátu je vodivá základňa so štrbinou. Ak pridáme reflektor (odrazovú platňu) na opačnú stranu substrátu vytvoríme rezonátor (dutinu). Tým dosiahneme jednosmerné vyžarovanie (t.j. vyžarovanie do polpriestoru), ale zredukujeme pracovnú šírku pásma antény.

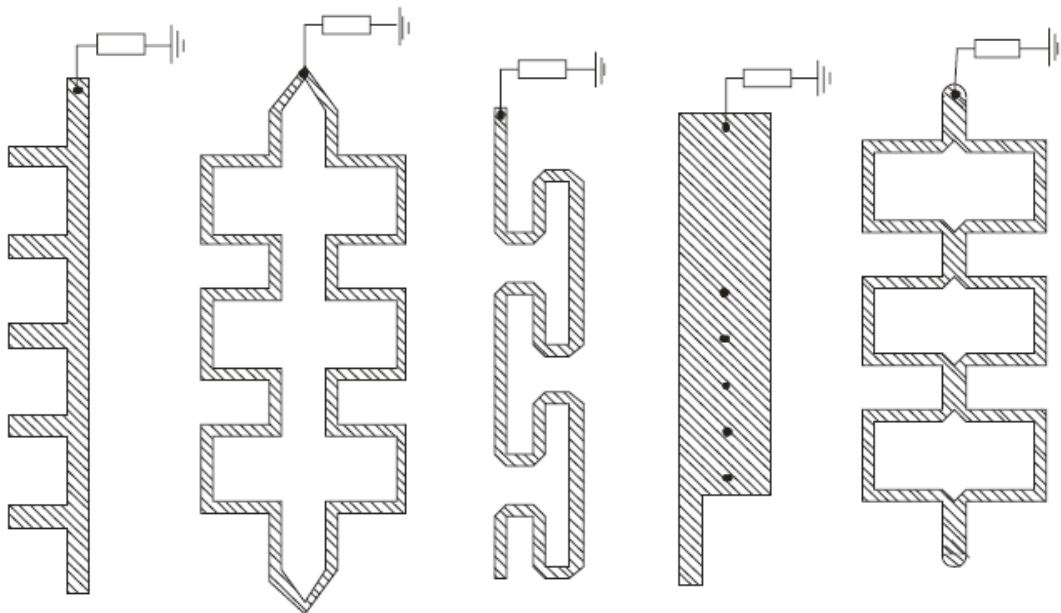
## Mikropásikové antény s postupujúcou vlnou

Tieto antény sú tvorené reťazcom periodických štruktúr, ktorých otvorený koniec je zakončený prispôbenou odporovou záťažou. Vyžarujúce prvky týchto antén sú vlastne diskontinuity na mikropásikovom vedení. Mikropásikové diskontinuity sú napríklad ohyby vedenia alebo rôzne spojenia vedení (T-spojenie). Na každej strane rovného mikropásikového vedenia je elektrické pole rovnaké a opačného smeru. Polia sa vyrušia a k vyžarovaniu nedôjde. Pri ohybe, je elektrická prúdová hustota vyššia na vnútornej strane ohybu než na vonkajšej strane. Polia pri ohyboch nebudú rovnaké a preto dôjde k vyžarovaniu energie (detail miest, kde dochádza k vyžarovaniu, je zobrazený na obr. 25). (17)



Obr. 25 Detail miest, kde dochádza k vyžarovaniu

Rôzne typy periodických štruktúr mikropásikových antén s postupujúcou vlnou sú zobrazené na obr. 26.



Obr. 26 Typy periodických štruktúr mikropásikových antén s postupujúcou vlnou

## Porovnanie jednotlivých typov mikropásikových antén

Tab. 5 Prehľad jednotlivých typov mikropásikových antén

VLASTNOSŤ	MIKROPÁSIKOVÁ ANTÉNA		
	KLASICKÁ	ŠTRBINOVÁ	DIPÓLOVÁ
Profil	tenký	tenký	tenký
Výroba	veľmi jednoduchá	jednoduchá	jednoduchá
Polarizácia	lineárna aj kruhová	lineárna aj kruhová	lineárna
Možnosti útvarov	ľubovoľný útvar	pravouhlé a kruhové	pravouhlé a trojuholníkové
Parazitné vyžarovanie	prítomné	prítomné	prítomné
Šírka pásma	2 až 50%	5 až 30%	okolo 30%

### 1.2 Usmerňovací obvod

Usmerňovacie obvody slúžia k usmerneniu striedavých prúdov na prúdy jednosmerné. Na samotné usmernenie sa používajú diódy. Fyzicky môžu mať niekoľko foriem, vrátane vákuovej diódy (elektrónky – dnes používanej zriedkavo), ortuťovej diódy (dnes zriedkavo používanej), či polovodičovej diódy. (18) Polovodičová dióda sa skladá z dvoch polovodičov s prímiesami. Jeden polovodič je typu N (katóda) a druhý je typu P (anóda). Na rozhraní polovodičov vznikne prechod P-N (hradlová vrstva), ktorý v ideálnom prípade prepúšťa prúd len jedným smerom. Základom polovodičovej diódy býva doštička z kremíka alebo germánia, z jednej strany obohatená o prvok s tromi valenčnými elektrónmi (fosfor, arzén) a z druhej strany o prvok s piatimi valenčnými elektrónmi (bór, hliník, gálium, indium). Vzájomným silovým pôsobením medzi časticami sa na prechode P-N vytvorí vnútorné elektrické pole. (19)

Základné parametre polovodičovej diódy podľa (19):

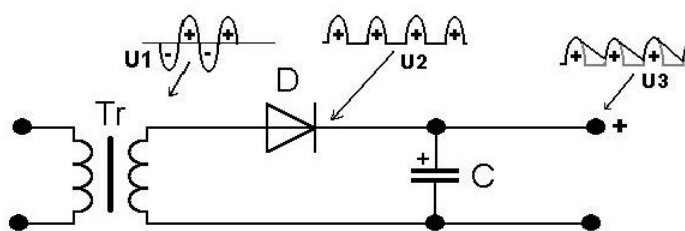
- prahové/priepusté napätie – elektrické napätie, pri ktorom dochádza k otvoreniu P-N prechodu diódy,
- prierazné napätie – elektrické napätie, ktoré spôsobí pri zapojení v závernom smere zničenie prechodu P-N,
- dynamický odpor – veľkosť odporu otvorenej diódy pre malý striedavý prúd



- VA charakteristika – závislosť prúdu pretekajúceho diódou na napätí medzi vývodmi,
- parazitná kapacita – kapacita prejavujúca sa pri vyšších frekvenciách,
- maximálne zaťaženie – najvyšší možný výkon elektrického prúdu nepoškodzujúci diódu,
- maximálny prúd – najväčší prúd, ktorý môže prechádzať diódou,
- teplotné rozmedzie – rozmedzie teplôt, pri ktorých môže dióda pracovať.

Veľmi zaujímavý druh polovodičovej diódy je Shottkyho dióda, ktorá využíva usmerňovacie vlastnosti priechodu kov – polovodič. Má menší úbytok napätia v priepustnom smere ako obyčajné usmerňovacie diódy, ale sú schopné odolávať menším napätiam v závernom smere. Shottkyho diódy sú veľmi rýchle. Obe vlastnosti ich predurčujú k tomu, aby sa uplatnili v obvodoch s vysokými frekvenciami a nízkym výkonom. (20)

### 1.2.1 Jednocestný usmerňovač

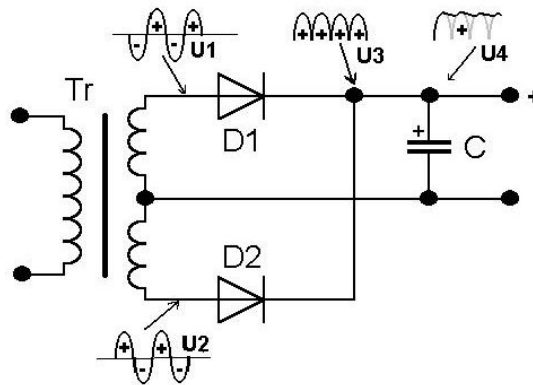


Obr. 27 Jednocestný usmerňovač

Na obr. 27 vidíme konkrétne zapojenie jednocestného usmerňovača. Napätie za diódou je pulzujúce – usmerňovaná je len jedna polvlna napätia. Na krivke U2 je vidieť značné oneskorenie medzi jednotlivými kladnými polvlnami. Táto skutočnosť jednoduchý usmerňovač znevýhodňuje, pretože k tomu, aby sa výstupné napätie vyhladilo je potrebný kondenzátor veľkej kapacity. Kondenzátor slúži práve na vyhladenie, pretože jeho náboj dodáva do záťaže prúd práve v čase, kedy je napätie za diódou nulové. Všeobecne sa dá povedať, že tento typ usmerňovača sa používa pre získanie pomocného napätia tam, kde nie sú veľké nároky na zvlnenie výstupného napätia. (21)

Jednocestný usmerňovač nie je vhodný pre usmernenie rádiového signálu za účelom jeho spätnej konverzie na elektrickú energiu.

### 1.2.2 Dvojcestný usmerňovač



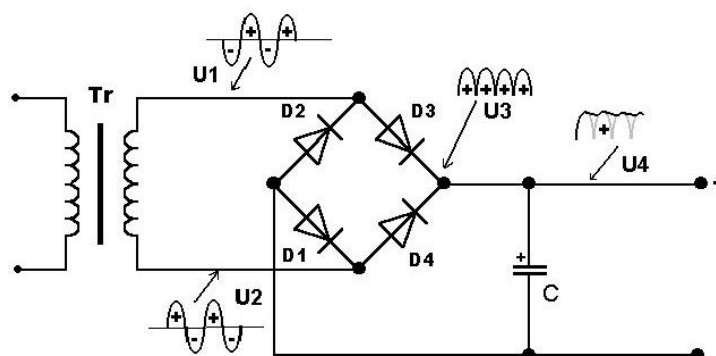
Obr. 28 Dvojcestný usmerňovač

Dvojcestný usmerňovač na obr. 28 poskytuje na výstupe omnoho menšie zvlnenie jednosmerného napätia, pretože sú usmerňované obidve polvlny striedavého napätia. Každá polvlna je fázovo posunutá vzhľadom na predošlú práve tak, že zaplňuje medzeru na krivke U3. Napätie aj v tomto prípade klesá až k nule, avšak na rozdiel od jednocestného usmerňovača, dvojcestný nevykazuje žiadne oneskorenie medzi jednotlivými polvlnami na krivke U3. (21)

V obidvoch prípadoch, jednocestného aj dvojcestného usmerňovača, preteká vinutím transformátora jednosmerný prúd, ktorý sýti jeho jadro a zvyšuje straty transformátora. (21)

Výhodou dvojcestného usmerňovača je to, že môžeme použiť vyhladzovací kondenzátor s menšou kapacitou pri rovnakom zvlnení, pretože sa nabíja dvakrát častejšie ako pri jednocestnom usmerňovači. Ďalšou výhodou je polovičné prúdové namáhanie diód. Nevýhodou je naopak sýtenie transformátora. (21)

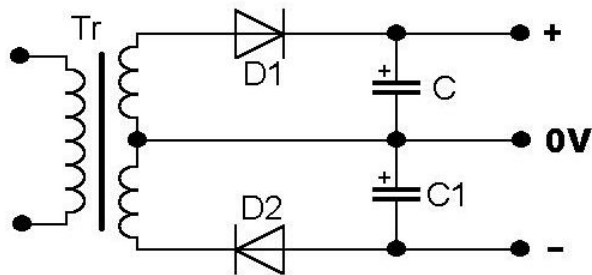
### 1.2.3 Mostíkový usmerňovač – Graetzov mostík



Obr. 29 Mostíkový usmerňovač

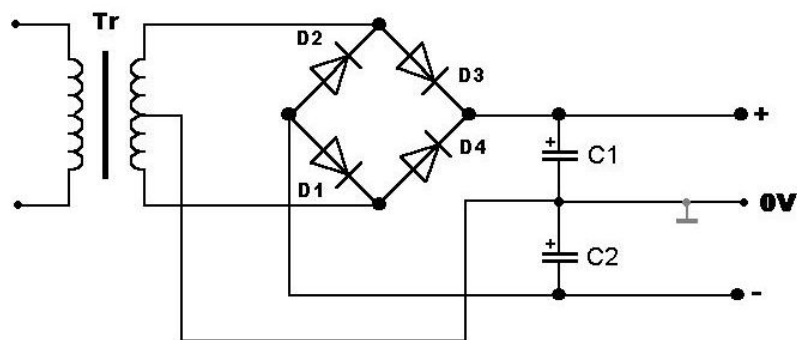
Tento dvojcestný mostíkový usmerňovač na obr. 29 je veľmi rozšírený a realizuje sa prakticky vždy polovodičovými prvkami. Jeho vlastnosti v zmysle usmernenia sú najlepšie v porovnaní s vyššie uvedenými, nepotrebuje dvojité vinutie a transformátor nie je zaťažovaný jednosmerným sýtením. (21)

### 1.2.4 Symetrický usmerňovač



Obr. 30 Symetrický usmerňovač

Na obr. 30 a obr. 31 sú znázornené symetrické usmerňovače, ktoré na výstupe dávajú ako kladné napätie, tak aj záporné voči nule. Existujú ako v jednocestnom, tak aj dvojcestnom prevedení. (21)



Obr. 31 Mostíkový symetrický usmerňovač

## 1.3 Vyrovnávací obvod

V elektronike, rozumieme impedančné vyrovnávanie ako spôsob maximalizovať prenos energie alebo minimalizovať odrazy od záťaže. Dosahuje sa prispôbením vstupnej impedancie obvodu impedancii zodpovedajúceho zdroja signálu. Ako už bolo spomenuté pri popise impedancie antény, ideálny prenos energie nastane vtedy, keď impedancie sa rovnajú. To však platí, ak je impedancia reálne číslo. Ak je impedancia

komplexné číslo, impedancia zdroja sa musí rovnať komplexne združenej impedancii príslušného obvodu, alebo naopak. (22)

Impedancia predstavuje odpor kladený toku energie zo zdroja. Pre konštantné signály (stále signály), môže byť impedancia tiež konštantná. Avšak, pre premenlivé signály sa impedancia zvyčajne mení s frekvenciou. Elektrická impedancia, rovnako ako odpor sa meria v  $\Omega$  (Ohm). Vo všeobecnosti má komplexnú hodnotu, ktorej reálna zložka vyjadruje rezistívny komponent impedancie a imaginárna časť vyjadruje reaktívny komponent. (22)

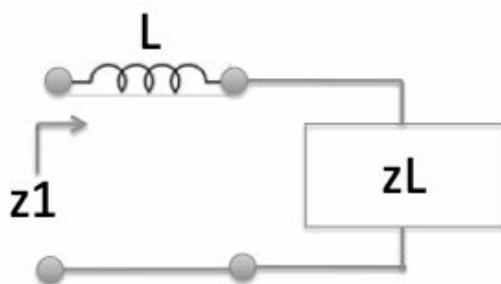
V ďalšej časti sú predstavené niektoré z možností impedančných vyrovnávacích obvodov.

### 1.3.1 Sériový induktor

Induktor, resp. cievka má normalizovanú impedanciu danú vzťahom:

$$z_{ind} = \frac{i2\pi fL}{Z_0} \quad (1.5)$$

kde,  $f$  predstavuje frekvenciu v Hz,  $L$  predstavuje indukčnosť v H (Henry) a  $Z_0$  je impedancia prenosového vedenia (napájacej štruktúry). Otázkou zostáva, ako sa prejaví vplyv sériového induktora na výslednej impedancii obvodu (znázorneného na obr. 32). (23)



Obr. 32 Modelový obvod vyrovnávania impedancie so sériovým induktorom

Matematicky, sériový induktor zmení impedanciu nasledovne:

$$z_L = R + iX \quad (1.6)$$

$$z_1 = z_L + z_{ind} = R + i \left( X + \frac{2\pi fL}{Z_0} \right) \quad (1.7)$$

Z rovnice (1.7) vyplýva, že ak reaktívna zložka  $X$  impedancie záťaže  $Z_L$  je záporná, sériový induktor je možné použiť na jej elimináciu a vytvoriť tak čisto reálnu vstupnú impedanciu celého obvodu. (23)

Ako príklad zoberme  $z_L = 1 - 2i$  pri frekvencii  $f = 1$  GHz a impedanciu napájacej štruktúry  $50 \Omega$ . Reaktívnu zložku impedancie môžeme eliminovať pridaním sériového induktora s indukčnosťou vypočítanou podľa vzťahu (1.7) nasledovne:

$$z_1 = z_L + z_{ind} = 1 + i \left( -2 + \frac{2\pi f L}{Z_0} \right) = 0 \quad (1.8)$$

$$0 = -2 + \frac{2\pi 10^9 L}{50} \rightarrow L = 15,9 \cdot 10^{-9} H = \underline{15,9 \text{ nH}} \quad (1.9)$$

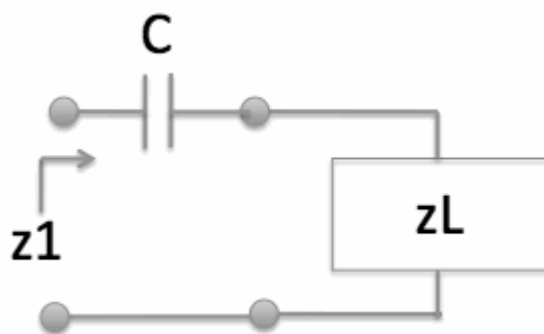
Rovnica (1.9) hovorí, že pridaním sériového induktora s indukčnosťou 15,9 nH sa eliminujú účinky reaktívnej zložky impedancie zdroja z príkladu.

### 1.3.2 Sériový kondenzátor

Kondenzátor má normalizovanú impedanciu danú vzťahom:

$$z_C = \frac{1}{iZ_0 2\pi f C} = \frac{-i}{Z_0 2\pi f C} \quad (1.10)$$

kde,  $f$  predstavuje frekvenciu v Hz,  $C$  predstavuje kapacitanciu vo  $F$  (Farad) a  $Z_0$  je impedancia prenosového vedenia (napájacej štruktúry). Vplyv sériového kondenzátora na výslednú impedanciu obvodu (znázorneného na obr. 33) je uvedený nižšie. (23)



Obr. 33 Modelový obvod vyrovnávania impedancie so sériovým kondenzátorom

Matematicky, sériový kondenzátor zmení impedanciu nasledovne (vzťah (1.6) je stále platný):

$$z_1 = z_L + z_C = R + i \left( X - \frac{1}{Z_0 2\pi f C} \right) \quad (1.11)$$

Z rovnice (1.11) vyplýva, že ak reaktívna zložka  $X$  impedancie záťaže  $Z_L$  je kladná, sériový kondenzátor je možné použiť na jej elimináciu a vytvoriť tak čisto reálnu vstupnú impedanciu celého obvodu. (23)

Ako príklad zoberme  $z_L = 0,3 + i$  pri frekvencii  $f = 500$  MHz a impedanciou prenosového vedenia  $50 \Omega$ . Reaktívnu zložku impedancie môžeme eliminovať pridaním sériového kondenzátora s kapacitou vypočítanou podľa vzťahu (1.11) nasledovne:

$$z_1 = z_L + z_C = 0,3 + i \left( 1 - \frac{1}{z_0 2\pi f C} \right) = 0 \quad (1.12)$$

$$0 = 1 - \frac{1}{50 \cdot 2\pi 500 \cdot 10^6 C} \rightarrow C = 6,4 \cdot 10^{-12} F = \underline{6,4 \text{ pF}} \quad (1.13)$$

Rovnica (1.13) hovorí, že pridaním sériového kondenzátora s kapacitou 6,4 pF sa eliminujú účinky reaktívnej zložky impedancie zdroja z príkladu.

Sériovým a paralelným kombinovaním induktorov a kondenzátorov je možné impedančne vyrovnať akúkoľvek impedančnú nerovnosť. V (23) sú uvedené pokročilé techniky vyrovnávania spolu s použitím Smithových diagramov a modifikovaním dĺžky prenosového vedenia.

## 2 NÁVRH RIEŠENIA MODULU ZBERU ENERGIE

Cieľom tejto kapitoly je navrhnutie antény so správnymi parametrami za účelom maximalizácie zachytenej energie. Cieľom je tiež navrhnutie usmerňovacieho obvodu vhodného pre príslušný výkon s výberom vhodných súčiastok.

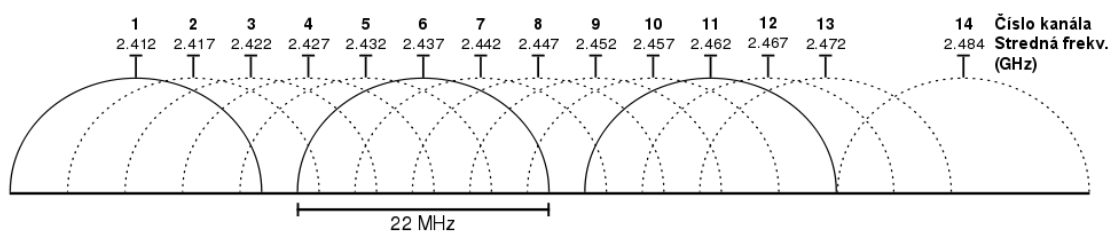
Koncepcia návrhu antény zahŕňa výber vhodného materiálu, tvaru, konfigurácie antény, jej veľkosti, atď. a to všetko s ohľadom na zamýšľané vlastnosti.

V ďalšom postupe je potrebné zvoliť vhodný usmerňovací obvod prípadne k nemu vyhovujúci vyrovnávací obvod, aby prenos energie bol čo najefektívnejší a nedochádzalo k stratám.

### 2.1 Návrh antény

Jednou z najdôležitejších častí modulu zberu energie je anténa. Jej návrh je kľúčový pre správnu funkčnosť celého systému.

V prvom rade je potrebné zadefinovať frekvenčné pásmo, v ktorom bude anténa pracovať. Zvolil som mikrovlnné pásmo 2,4 GHz štandardne používané WIFI zariadeniami. Z praktických dôvodov je toto pásmo rozdelené na 14 kanálov so šírkou 22 MHz (pozri obr. 34). (24)



Obr. 34 Kanály 2,4 GHz frekvenčného pásma WIFI

Pre navrhovanú aplikáciu som zvolil centrovanú frekvenciu kanála číslo 8, teda 2,447 GHz. Následne bolo možné jednoducho vypočítať jej vlnovú dĺžku a jej celočíselné zlomky. Z obr. 5 v časti 1.1.1 vyplýva, že vlnová dĺžka sa vypočíta ako:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

kde  $c$  – rýchlosť šírenia svetla (vo vzduchu pri 15° je to 299 700 150 m·s<sup>-1</sup> (25))  
 $f$  – frekvencia hľadanej vlnovej dĺžky

Po dosadení príslušných hodnôt do vzťahu (2.1) je zrejmé, že:

$$\lambda_0 = 122,477 \text{ mm},$$

$$\lambda_2 = 61,238 \text{ mm},$$

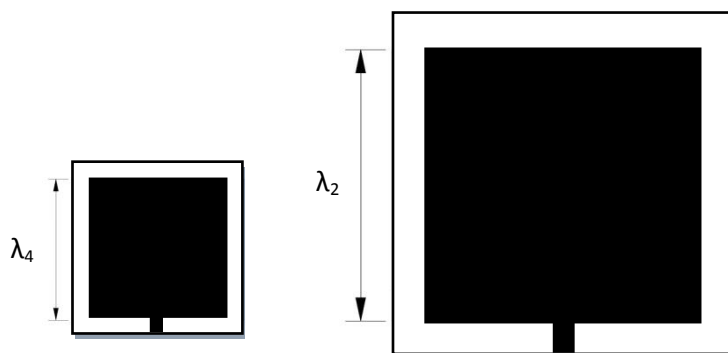
$$\lambda_4 = 30,619 \text{ mm},$$

kde  $\lambda_0$  predstavuje vlnovú dĺžku frekvencie 2,447 GHz,  $\lambda_2$  je polovica vlnovej dĺžky a  $\lambda_4$  je štvrtina vlnovej dĺžky. Tieto hodnoty sú pri návrhu najčastejšie používané, preto sú uvedené explicitne.

Ďalšou dôležitou hodnotou je dielektrická konštanta  $\epsilon_r$ , ktorej ideálna hodnota pre mikropásikové antény by mala byť 2,2. Avšak materiál, ktorý je dostupný, a z ktorého sa vyrábajú dosky plošných spojov (DPS) je prevažne FR-4, ktorý má dielektrickú konštantu rovnú 4,4 (26). Hrúbka dielektrického substrátu  $h$  je taktiež konštanta, a to  $h = 1,66$  mm. V ďalšom texte sa veličiny  $\epsilon_r$  a  $h$  považujú za známe hodnoty, aj keď explicitne nie sú vyjadrené.

### 2.1.1 Návrh konvenčnej mikropásikovej antény

Pod pojmom konvenčná mikropásiková anténa rozumieme anténu s pravidelným pravouhlým tvarom obyčajne štvorca alebo obdĺžnika. Najjednoduchšia verzia antény preto bude štvorec s dĺžkou strany  $\lambda_2$  a  $\lambda_4$ .



Obr. 35 Navrhované konvenčné mikropásikové antény



Štvorec alebo obdĺžnik sa však dá navrhnuť aj exaktnejšou metódou ako len použitím vlnovej dĺžky. Podľa (26) existujú nasledovné vzťahy, ktoré určujú rozmery pravidelnej pravouhlníkovej antény.

Výpočet šírky antény  $W$ :

$$W = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.2)$$

kde  $c$  – rýchlosť šírenia svetla

$f_r$  – operačná frekvencia antény

$\epsilon_r$  – dielektrická konštanta nevodivého substrátu

Výpočet efektívnej hodnoty dielektrickej konštanty:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-0,5} \quad (2.3)$$

kde  $W$  – šírka mikropásikovej antény

$h$  – výška dielektrického substrátu

$\epsilon_r$  – dielektrická konštanta nevodivého substrátu

Efektívna dĺžka antény  $L_{eff}$ :

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.4)$$

kde  $c$  – rýchlosť šírenia svetla

$f_r$  – operačná frekvencia antény

$\epsilon_{eff}$  – efektívna hodnota dielektrickej konštanty

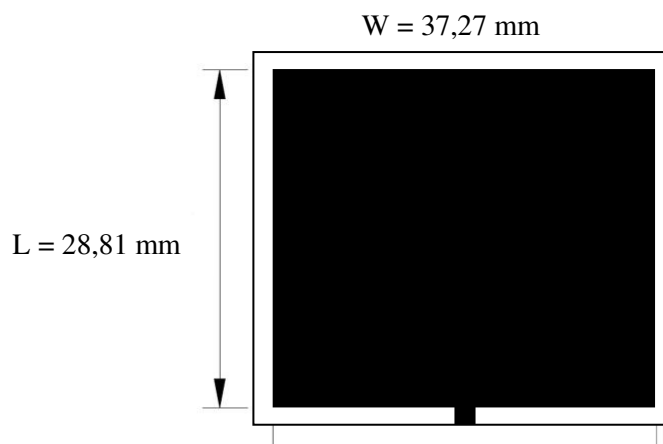
Presah vodivej platne zeme oproti dĺžke mikropásika  $\Delta L$ :

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{eff}+0,3)\left(\frac{W}{h}+0,264\right)}{(\epsilon_{eff}-0,258)\left(\frac{W}{h}+0,8\right)} \quad (2.5)$$

Dĺžka mikropásika antény  $L$ :

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.6)$$

Dosadením do vzťahov (2.2) až (2.6) získame hodnoty  $W = 37,27$  mm a  $L = 28,81$  mm. Ďalším navrhnutým tvarom je obdĺžniková anténa zobrazená na obr. 36.

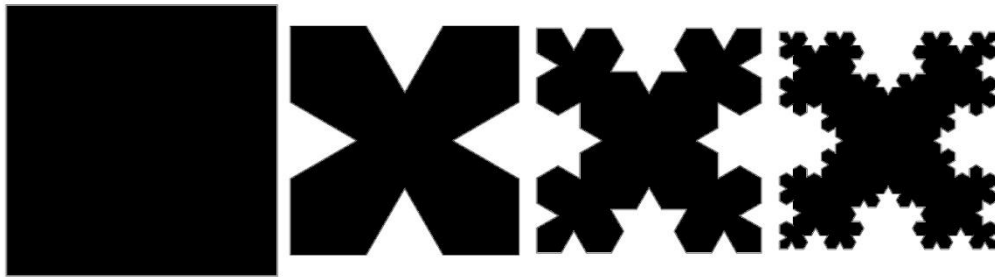


**Obr. 36** Navrhnutá obdĺžniková anténa

Odborná literatúra z oblasti návrhu mikropásikových antén uvádza rozličné rozmery štvorca alebo obdĺžnika. V (27) sú navrhnuté štvorcové antény s rozmerom jednej strany 28,2 mm, 23,23 mm a 22,5 mm. V (26) zase autor navrhuje obdĺžnikové antény ( $W \times L$ ) s rozmermi, 37,7 x 28,6 mm, 18,8 x 14,6 mm a 12,8 x 10,2 mm. Je potrebné uviesť, že posledné dve obdĺžnikové antény sú napájané špeciálnymi technikami, preto je možné ich rozmery zredukovať. Vzhľadom na fakt, že frekvenčné pásmo okolo 2,4 GHz má až 14 kanálov, všetky antény môžu pracovať s veľmi dobrým ziskom aj napriek ich rôznym rozmerom.

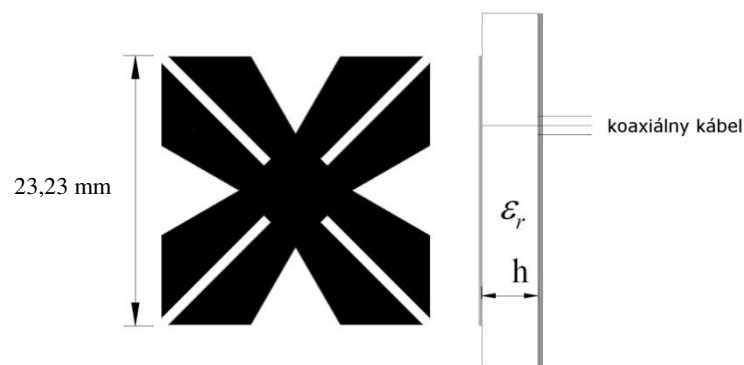
## 2.1.2 Návrh mikropásikovej antény s použitím fraktálového vzoru

Fraktál je geometrický objekt vytvorený pomocou rekurzie. Ide o pravidelný alebo nepravidelný geometrický útvar, ktorý môže byť rozdelený na časti, z ktorých je každá aspoň približne podobná alebo je zmenšená kópia celého geometrického útvaru. Táto vlastnosť sa tiež nazýva sebepodobnosť. (28)



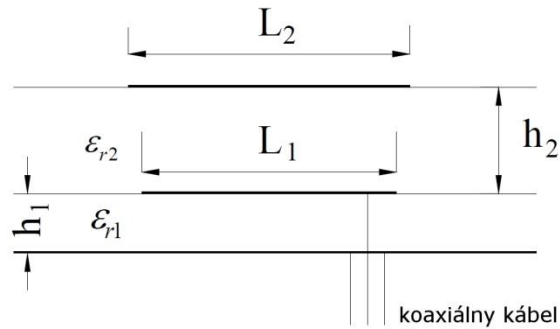
Obr. 37 Príklad vývoja fraktálu

V (27) je predstavená fraktálová anténa s tvarom, aký je zobrazený na obr. 37 úplne vpravo. Vzhľadom na jeho zložitosť a nemožnosť zaručiť presný tvar pri výrobe, ako základ bol použitý fraktálový vzor prvého rádu (obr. 37 druhý zľava). Pozdĺž štyroch radiačných elementov sú uhlopriečne drážky, ktorých význam spočíva v predĺžení efektívnej radiačnej dĺžky antény (27). Výsledný tvar navrhovanej antény je na obr. 38.



Obr. 38 Výsledný tvar navrhovanej fraktálovej antény štvorcového charakteru s ukázkou napájania

Zisk všetkých navrhnutých antén je možné zvýšiť ich ukladaním nad seba do poschodovej antény podľa obr. 39.



Obr. 39 Príklad poschodovej mikropásikovej antény

## 2.2 Návrh usmerňovacieho a vyrovnávacieho obvodu

Usmerňovací a vyrovnávací obvod sú navzájom na sebe závislé. Za účelom maximalizácie prenosu energie je nevyhnutné, aby obidva obvody impedančne ladili nielen vzájomne, ale aj s anténou. V tejto kapitole sa zaoberám návrhom oboch obvodov.

V dostupnej odbornej literatúre sa na aplikácie zberu energie používajú mostíkové usmerňovače aj symetrické usmerňovače. Obidva typy usmerňujú kladnú aj zápornú polvlnu sínusového signálu. Nevýhodou mostíkového zapojenia je, že pre každú polvlnu má sériovo zapojené dve diódy, čo zvyšuje minimálne priepustné napätie na dvojnásobok. Použitie WIFI pásma 2,4 GHz vo väčšine krajín nevyžaduje licenciu za predpokladu, že vysielací výkon zostane pod limitom 100 mW a používateľ akceptuje rušenie z iných zdrojov vrátane rušenia, ktoré zapríčini znefunkčnenie používateľových zariadení. (29) V aplikáciách ako je zber energie, kde sa výkon pohybuje rádovo v desiatkach až stovkách miliwattov, môže vysoké minimálne priepustné napätie diódy spôsobiť neúčinnosť celého procesu transformácie energie.

Návrh obidvoch obvodov je realizovaný podľa usmerňovacieho obvodu použitého v (30). Vyrovnávací obvod je veľmi komplikovaná záležitosť a vyžaduje si profesionálne simulačné nástroje a skúsenosti návrhára.

### 2.2.1 Schematické zapojenie

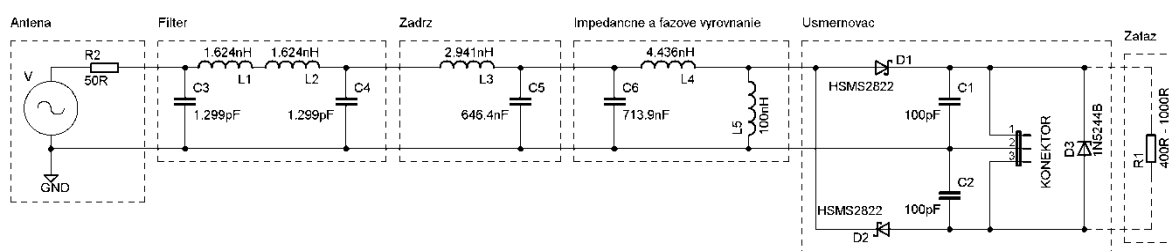
Pre navrhnutú aplikáciu prichádzajú do úvahy RF rýchle Shottkyho diódy: Avago Technologies HSMS2822/HSMS282B, NXP BAT54S/BAT754S alebo NXP 1PS76SB10.

V navrhnutom symetrickom zapojení usmerňovača bola použitá Shottkyho dióda BAT754S s priepustným napätím okolo 260 mV a kapacitou P-N prechodu 10 pF. Maximálne prierazné napätie zvolenej diódy v závernom smere je 30 V. Veľmi dobrú hodnotu parazitnej kapacity má dióda HSMS2822, avšak jej priepustné napätie je podstatne vyššie ako zvolená Shottkyho dióda. Pracovný výkon všetkých diód je aspoň 200 mW, čo bohato stačí navrhnutému obvodu.

Tab. 6 Prehľad vlastností vybraných prípustných Shottkyho diód

DIÓDA	PRIEPUSTNÉ NAPÄTIE ( $V_F$ )	PARAZITNÁ KAPACITA ( $C_P$ )	PRIERAZNÉ NAPÄTIE ( $V_R$ )	PUZDRO
HSMS282B	340 mV	1 pF	15 V	SOT-323
HSMS2822	340 mV	1 pF	15 V	SOT-23
BAT54S	320 mV	10 pF	30 V	SOT-23
BAT754S	260 mV	10 pF	30 V	SOT-23
1PS76SB10	320 mV	10 pF	30 V	SOD-323

Zdroj energie, teda anténa, je reprezentovaný výkonom 100 mW s vnútorným odporom 50  $\Omega$ . Vnútorný odpor 50  $\Omega$  predstavuje bežnú hodnotu odporu antén používaných vo WIFI frekvenčnom pásme.



Obr. 40 Schéma dvojcestného usmerňovača s vyrovnávacím obvodom

Opis navrhnutej schémy je uskutočnený v smere prúdenia energie – zľava doprava. Ako bolo v úvode tejto podkapitoly spomenuté, anténu s prenosovým vedením reprezentuje frekvenčný zdroj s vnútornou impedanciou 50  $\Omega$ . Ďalej nasleduje dolnopriepustný filter eliminujúci vysokofrekvenčné zložky (druhá, tretia harmonická frekvencia, atď.), ktoré negatívne ovplyvňujú efektívnosť prenosu energie. Filter pozostáva z kondenzátorov C3 a C4 a induktorov L1 a L2. Zároveň upravuje impedanciu z 50  $\Omega$  na

vstupe na  $166,8 \Omega$  na jeho výstupe (30). Za dolnopriepustným filtrom nasleduje pásmová zádrž druhej harmonickej frekvencie pozostávajúca z kondenzátora C5 a induktora L3. Kombinácia C6 a L4 v tvare „T“ impedančne vyrovnáva výstupnú impedanciu z dolnopriepustného filtra a zádrže druhej harmonickej frekvencie tak, aby sa blížila k vstupnej impedancii použitých diód s ohľadom na ich vnútornú parazitnú kapacitu. L4 zároveň upravuje fázu prúdu tak, aby bola vo fáze so vstupným napätím. Cievka L5 poskytuje spiatočnú cestu pre jednosmerný prúd z diódy. Má dostatočne vysokú indukčnosť, takže má malý vplyv na RF signál. Ďalej nasledujú usmerňovacie diódy D1 a D2 a filtračné kondenzátory C1 a C2, ktoré filtrujú pulzujúce napätie na výstupe príslušnej diódy pre získanie hladkého výstupu. Na výstupe je odporová záťaž, ktorej veľkosť v rozmedzí  $400$  až  $1000 \Omega$  dáva najväčšiu účinnosť celého systému. Keďže diódy majú prierazné reverzné maximálne napätie  $30$  V, na výstupe usmerňovacieho obvodu je zapojená  $14$  V Zenerova dióda, aby rýchle usmerňovacie diódy chránila ak je usmerňovač bez záťaže. V takom prípade má výstupné napätie tendenciu rásť, až kým nedosiahne reverzné prierazné napätie Shottkyho diód. D3 udrží napätie na maximálnej hodnote  $14$  V. Dané napätie bolo zvolené, aby bolo možné použiť aj alternatívne diódy HSMS282x, ktorých maximálne prierazné napätie je  $15$  V.

Z obrázku obr. 40 vyplýva, že hodnoty kondenzátorov aj cievok sú veľmi nízke a v praxi sú takéto komponenty len veľmi ťažko dostupné. Riešením je implementácia týchto obvodových komponentov transformáciou na prenosové vedenie (prenosové cesty vo forme mikropásikov).

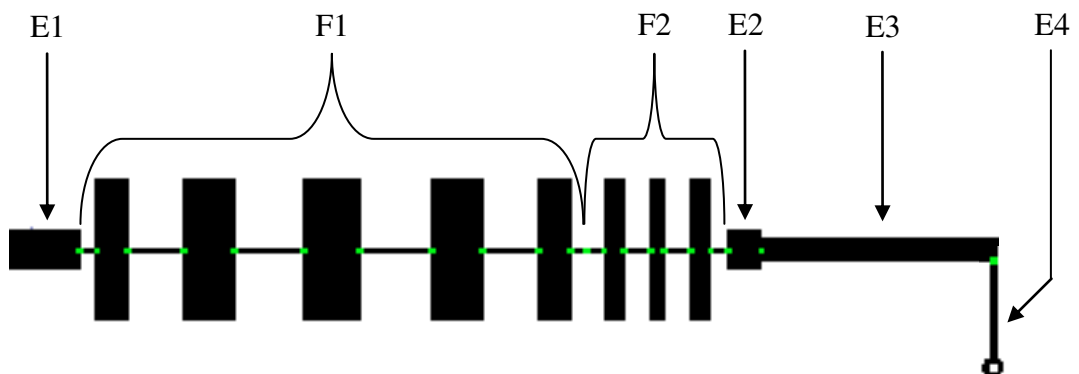
## 2.2.2 Implementácia schematického zapojenia

Návrh predošlého obvodu predpokladal cievky aj kondenzátory s ideálnymi vlastnosťami. Je obtiažne vyrobiť kondenzátory a cievky s vhodnou presnosťou pre mikrovlnné aplikácie. Kondenzátory majú sériovú parazitnú indukčnosť aj parazitný odpor. Cievky majú sériový parazitný odpor a paralelnú kapacitu, ktorá sa prejavuje so zvyšujúcou sa frekvenciou. (30) Kvôli týmto problémom mikrovlnné obvody často používajú transformáciu diskretných komponentov ako rezistory, kondenzátory a induktory na mikropásiky prenosového vedenia. Existuje niekoľko možností takejto transformácie – pomocou koaxiálneho kábla, vlnovodu či mikropásika. (30) Práve posledne zmieneny druh je z pohľadu realizácie najjednoduchší. Transformácia pomocou mikropásikov spočíva v umiestňovaní metalických vodičov na povrchu nevodivého

materiálu (dielektrika) na jednej strane a tenkej jednoliatej platne zeme na druhej strane dielektrika. Takéto obvody je možné vyrobiť s pomerne veľkou presnosťou a ak je použitý vhodný dielektrický materiál, tak aj s veľmi dobrými vlastnosťami. Najčastejšie používaný materiál je FR-4, spomenutý v časti 2.1. Spôsobuje pomerne malé straty pri frekvenciách okolo 2,4 GHz.

So známou hrúbkou dielektrického substrátu a jeho dielektrickou konštantou je možné určiť charakteristickú impedanciu, ktorá je závislá na šírke a dĺžke mikropásika. Spojenia jednotlivých elementov rôznej šírky nemajú ideálne vlastnosti, ich charakteristiky sú veľmi zložité a je nutné robiť počítačové simulácie napríklad v programe Genesis od spoločnosti Agilent. Takéto elementy môžu byť použité na vytvorenie podobných charakteristík ako majú diskrétny súčiastky induktor alebo kondenzátor pri určitých frekvenciách. Širokofrekvenčné aplikácie nie je možné takýmto spôsobom vytvárať. Podrobný popis simulácii a návrhu je uvedený v (30).

Napriek tomu, že obvod na obr. 40 vyzerá komplikovane, všetky komponenty až na diódy a filtračné kondenzátory sú metalické (medené) tvary nakreslené na DPS. Vyrovnávací obvod má tri individuálne časti plus vstupné a výstupné obvody.

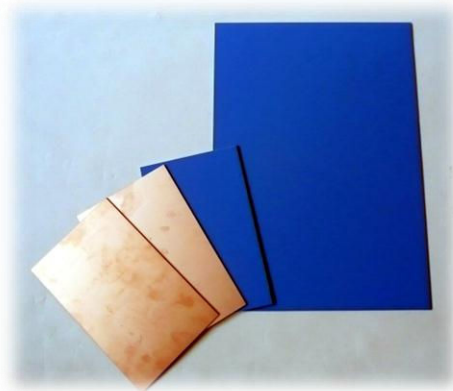


Obr. 41 Detail vyrovnávacieho obvodu

Element E1 (obr. 41) spája konektor antény s vyrovnávacím obvodom. Dĺžka tohto prvku nemá kritický význam na funkcionality celkového obvodu a môže byť ľubovoľná. Časť F1 predstavuje dolnopriepustný filter druhej až piatej harmonickej frekvencie a sekcia F2 predstavuje dolnopriepustný filter piatej až desiatej harmonickej frekvencie. Elementy E2, E3 a E4 implementujú impedančný menič na vyrovnanie impedancie filtrov kvôli rezonancii s diódami. Ďalej už nasleduje usmerňovací obvod.

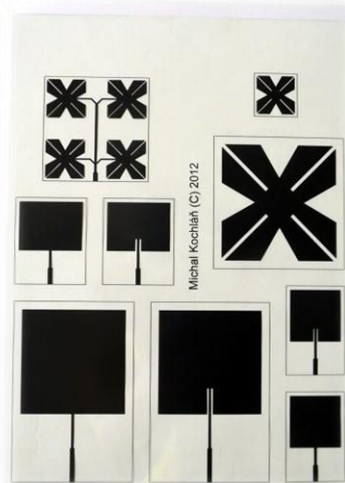
### 3 REALIZÁCIA NAVRHNUTÉHO RIEŠENIA

Táto kapitola pojednáva o fyzickej realizácii navrhnutých obvodov. Všetky boli vyrobené substraktívnou formou – leptaním dosiek plošných spojov chloridom železitým.



Obr. 42 Dosky plošných spojov

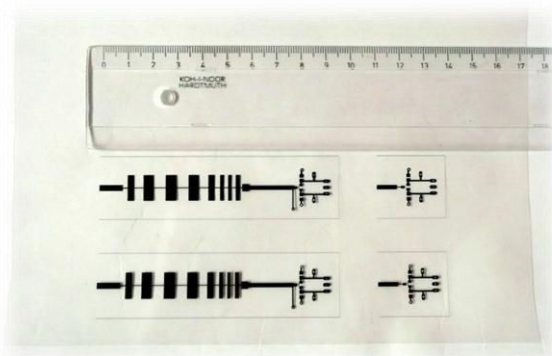
Navrhnuté antény boli skonštruované v CAD programe kvôli preneseniu navrhnutých vzorov na fóliu v čo najväčšej kvalite a presnosti. Fólia je zobrazená na obr. 43. Vo zväčšenom formáte sa nachádza v prílohe A. Ako je možné vidieť oproti pôvodnému návrhu boli pridané variácie antén, keďže ostal dostatok priestoru. Jedná sa o modifikácie regulárnych antén s posunutým napájaním viac k stredu aktívnej plochy antény. Fraktálová anténa má tri variácie – pôvodnú veľkosť, veľkosť polovice vlnovej dĺžky a ešte je uvedená konfigurácia štyroch navzájom prepojených fraktálových antén.



Obr. 43 Priehľadná fólia so vzorom antén



Usmerňovací obvod bol navrhnutý v študentskej verzii programu Eagle a vyrovnávací blok obvodu bol prenesený z (30). Výsledná predloha na potlač DPS s vyrovnávacím obvodom aj bez neho je znázornená na obr. 44. V prílohe B sa táto predloha nachádza v mierke 1:1.



**Obr. 44** Fólia potlače DPS usmerňovacieho obvodu spolu s vyrovnávacím

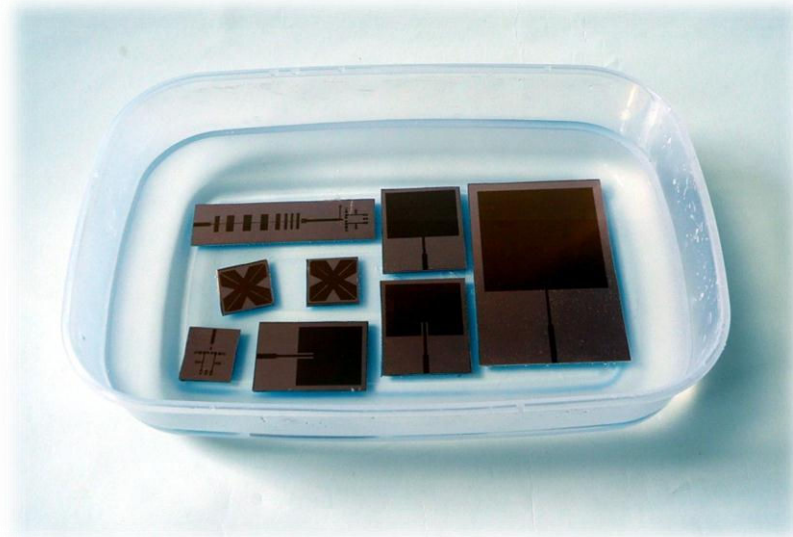
Nasledoval osvit dosiek plošných spojov horským slnkom po dobu 5 minút. Doska sa exponovala kolmo na zdroj ultrafialového žiarenia vo vzdialenosti 30 cm. Ultrafialové žiarenie obsiahnuté vo svetle horského slnka „vypáli“ obrazec predlohy na dosku plošných spojov, ktorá sa následne vloží do vývojky.



**Obr. 45** Osvit DPS horským slnkom (UV žiarením)

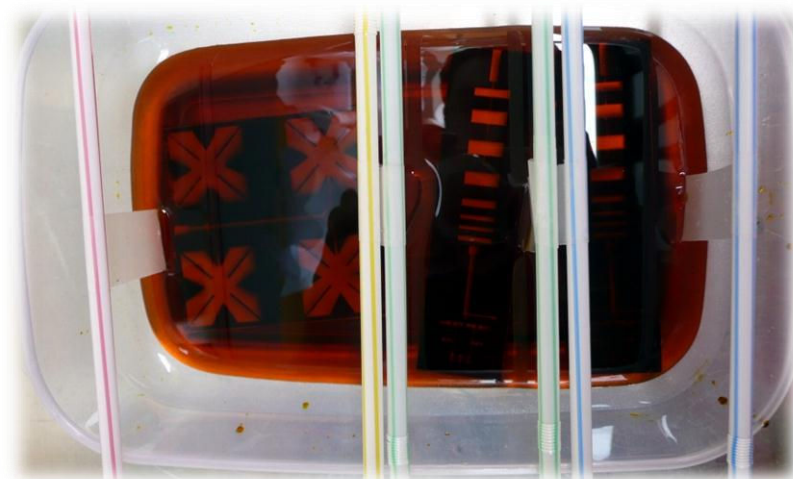
Vývojka je nízko koncentrovaný roztok hydroxidú sodného. Tento roztok odstráni nepotrebnú časť fotocitlivej vrstvy a ostane len ochranná časť v tvare predlohy DPS.

Vyvolávanie vo vývojke trvá tak dlho, kým nezmiznú na osvetlených miestach stopy fotolaku – za bežných podmienok okolo 2 minút. Následne sa dosky plošných spojov opláchnu v teplej vode a sú pripravené na odleptanie nežiaducej časti medi.



**Obr. 46** Kúpeľ DPS v roztoku vývojky

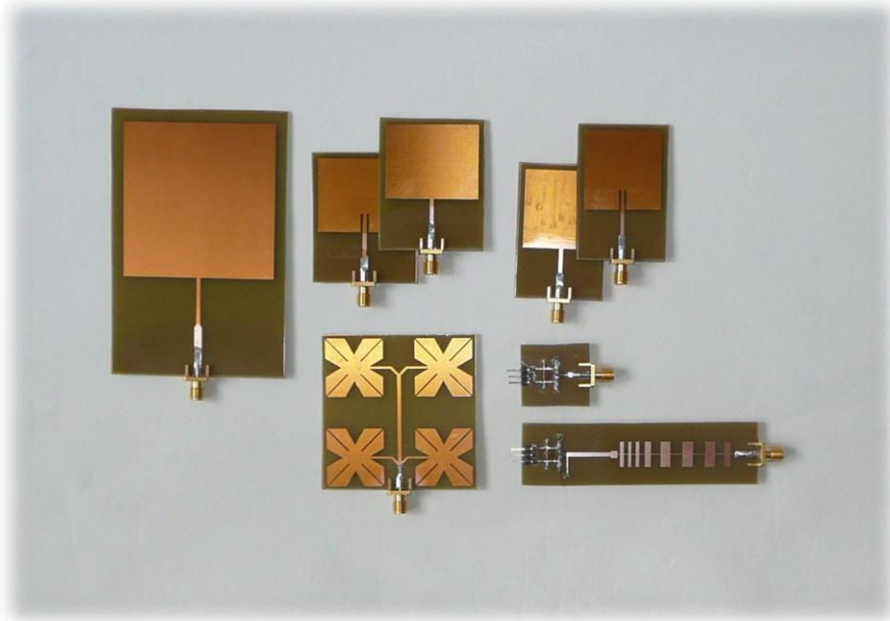
Leptanie DPS sa vykonalo pomocou roztoku chloridu železitého, ktorý odstránil nepotrebné zvyšky medi. Opäť bolo potrebné očistiť DPS prúdom teplej vody. Dosky plošných spojov boli následne upravené jemným brúsnym papierom kvôli odstráneniu malých zvyškov neodleptanej medi.



**Obr. 47** Leptanie DPS chloridom železitým

Hotové antény a usmerňovací obvod aj s priletovanými konektormi a súčiastkami sú na obr. 48. Konektory sú typu SMB, ktoré sa bežne používajú na pripojenie

bezdrôtových WIFI antén k smerovačom alebo koncovým zariadeniam. Ich impedancia je  $50 \Omega$ .



**Obr. 48** Hotové antény a usmerňovací obvod s konektormi a súčiastkami

## 4 MERANIA

V tejto kapitole sú uvedené experimentálne merania. Merania rádiového spektra boli uskutočnené na spektrálnom analyzátore Rohde & Schwarz FSH8 (obr. 49). Merané spektrá boli 2,4 GHz využívané bezdrôtovými počítačovými sieťami WIFI a frekvenčné pásmo GSM 1900MHz využívané mobilnými telefónmi.



Obr. 49 Meranie frekvenčného spektra spektrálnym analyzátorom R&H FSH8

Úroveň rádiového signálu WIFI kanála číslo 8, pre ktorý je navrhnutý modul zberu energie je zachytená na obr. 50. Ako je možné z obrázka vyčítať, šírka pásma je skutočne 22 MHz ako bolo uvedené v časti 2.1. Samotná úroveň rádiového signálu nie je veľmi vysoká, ale signál je možné použiť na zber energie pri vhodne zvolenej anténe.

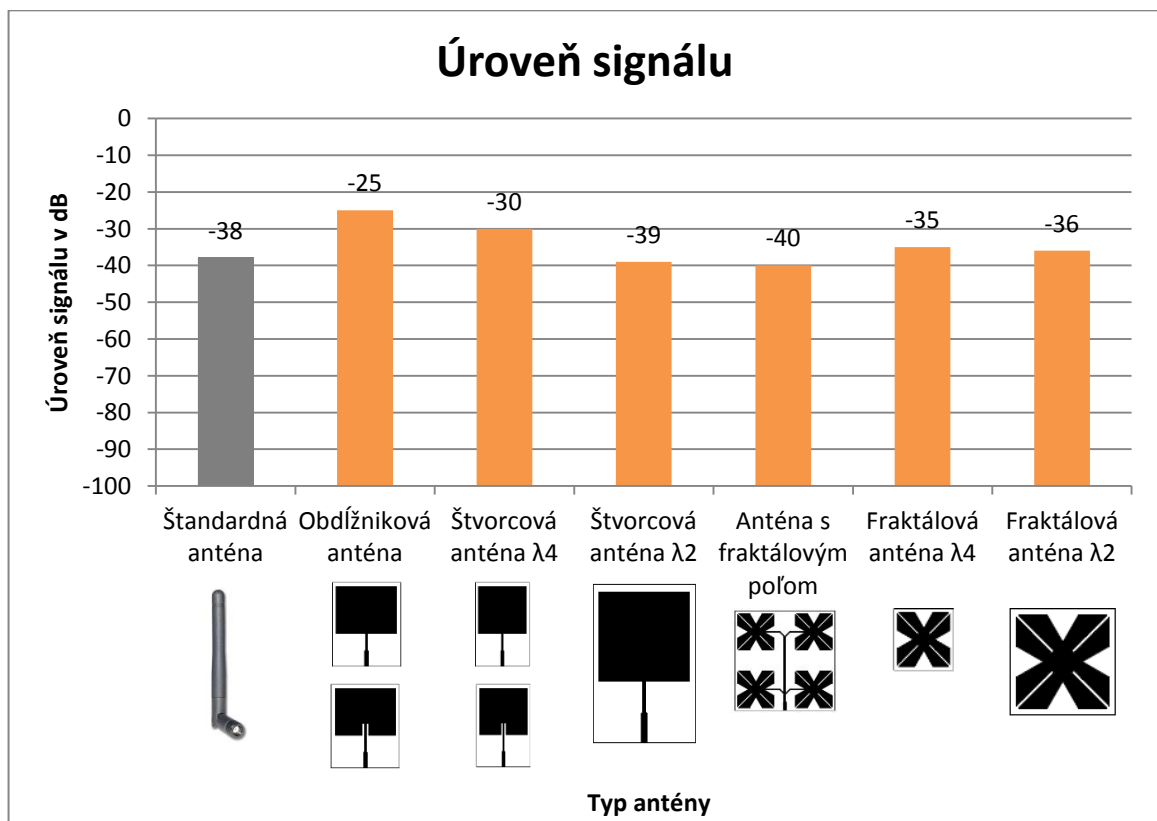


Obr. 50 Uložená obrazovka merania WIFI kanála číslo 8

Kvalita navrhnutých antén bola odmeraná porovnávacou metódou vzhľadom na štandardnú anténu so známymi vlastnosťami. Merania boli uskutočnené na počítači s použitím špecializovaného softvéru na zistenie sily WIFI signálu. Antény sú použité ako vysielacie a každá je pripojená priamo na prístupový bod (bezdrôtový smerovač). Grafické porovnanie jednotlivých nameraných úrovní signálu rôznych antén je na obr. 51. Zachytené obrazovky jednotlivých meraní sa nachádzajú v prílohách J až R.

Vlastnosti štandardnej WIFI antény podľa (31):

- Centrovaná frekvencia: 2,4 GHz
- VSWR: menej ako 2
- Impedancia: 50  $\Omega$
- Polarizácia: vertikálna
- Zisk: 2,2 dBi
- Rozmer: 112,5 mm x  $\phi$  9,6 mm

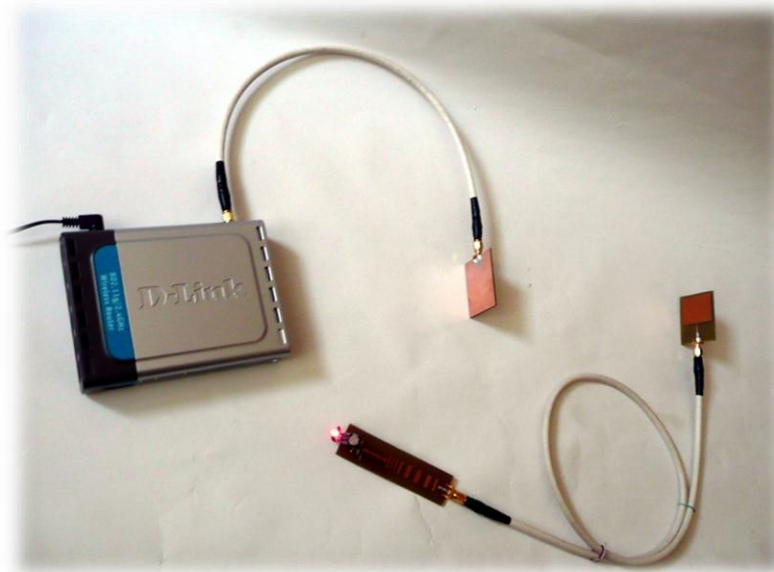


Obr. 51 Grafické porovnanie nameraných úrovní signálov vysielacích antén

Fakt, že niektoré mikropásikové antény (štvorcové, obdĺžnikové, ...) vykazujú lepšie vysielacie vlastnosti ako štandardná anténa vyplýva z toho, že štandardná anténa je všesmerová na rozdiel od mikropásikových, ktoré sú smerové. Tento fakt potvrdili aj merania, keď vychýlenie antény o niekoľko stupňov od osi s prijímacím zariadením (počítačom) spôsobilo zníženie kvality prijímaného signálu.

Usmerňovací obvod spolu s navrhnutou obdĺžnikovou anténou bol schopný dodať najviac niekoľko miliwattov. Obdĺžniková anténa bola zvolená z dôvodu jej najlepších zistených vlastností. Meraniami sa zistili výkony v rozmedzí 3,26 mW až 7,81 mW. Veľký rozptyl hodnôt je spôsobený komplikovanou optimalizáciou smeru prijímacej a vysielacej antény. Namerané hodnoty postačujú na rozsvietenie LED diódy.

Modelová aplikácia modulu zberu energie napájajúca LED diódu, na ktorej bola odskúšaná funkčnosť navrhnutého modulu, je zobrazená na obr. 52.



**Obr. 52** Modelová aplikácia zberu energie napájajúca LED diódu

Ďalším pásmom, ktoré bolo odmerané spektrálnym analyzátorom je GSM pásmo mobilnej komunikácie. Mobilné telefóny využívajú GSM pásma 900 MHz, 1800 MHz a 1900 MHz. Vzhľadom na to, že mobilné telefóny si vyberajú pracovnú frekvenciu sami na základe vnútorných parametrov, podarilo sa namerať hodnoty spektra pri volaní iba v GSM pásme 1900 MHz. Iné skúšané typy telefónov sa správali totožne.



**Obr. 53** Uložená obrazovka merania kanála 1900 MHz

Z obr. 53 je zrejmé, že úroveň rádiového signálu pri volaní je nízka. Možnosti získavania energie zo zdrojov mobilnej komunikácie sú však otvorené, a už v súčasnosti sa vyvíjajú mobilné siete schopné napájať mobilné uzly iba z rádiového signálu emitovaného vysielacími.

## ZÁVER

Vytvorenie zariadenia na získavanie energie z rádiového signálu je pomerne zložitá záležitosť. Zodpovedá tomu aj množstvo práce venovanej štúdiu odbornej literatúry a znalostiam potrebným na vytvorenie antény a usmerňovacieho obvodu spolu s vyrovnávacím. Modelovanie týchto častí je komplikovaný proces vyžadujúci profesionálne počítačové prostriedky v podobe programového vybavenia a skúseností návrhára. Merania som spočiatku uskutočnil na spektrálnom analyzátore s cieľom zistiť intenzitu elektromagnetického poľa v jednotlivých frekvenčných pásmach, ktoré sú najčastejšie využívané, a tým sa v nich koncentruje najväčšie množstvo energie, ktoré je možné potenciálne využiť pri aplikáciách zberu energie. Overenie funkčnosti antén bolo vykonané ich zapojením ako vysielacie antény a zistením intenzity prijímaného signálu. Výsledky boli porovnané s intenzitou signálu originálnej antény.

Predpoklad, že originálna anténa bude mať najlepšie výsledky bol vyvrátený. Obdĺžnikové a štvorcové mikropáskové antény s rozmermi blízko štvrtiny vlnovej dĺžky dosiahli o málo lepšie intenzity prijímaného signálu. Zlepšenie je do veľkej miery spôsobené faktom, že mikropáskové antény sú smerové, na rozdiel od originálnej dipólovej antény, ktorá je všesmerová. Preto, aplikácie využívajúce zber energie z rádiového signálu založené na mikropáskových anténach musia poznať smer, z ktorého elektromagnetické žiarenie prichádza, aby premena energie bola efektívna.

V spojení s usmerňovacím obvodom je možné získať rádovo niekoľko miliwattov. Použitím antén s veľmi veľkým ziskom je možné dosiahnuť aj výkony rádovo v desiatkach miliwattov. Tieto hodnoty postačujú na napájanie bezdrôtových senzorov, v ktorých spotreba nie je vysoká. Môžeme povedať, že tento druh alternatívnej energie začína konkurovať solárnym zdrojom a s postupným vývojom a výskumom v oblasti elektromagnetického získavania energie sa môžeme tešiť na pozitívne výsledky.

Navrhnutý celok, teda antény spolu s usmerňovacím a vyrovnávacím obvodom nie sú ideálne. Vidím ešte veľký priestor v zdokonalení návrhu antény ako aj lepšie impedančné vyrovnanie usmerňovacieho obvodu. Avšak každá zmena čo i len jediného atribútu celého systému si vyžaduje zmenu ostatných parametrov a ich vyváženie. Je to



časovo náročný proces vyžadujúci trpezlivosť, zmysel pre experimentovanie a v neposlednom rade skúsenosti.

Dnešný svet charakterizuje energia. Možno práve tá elektromagnetická bude raz jedným zo zdrojov, ktoré ľudstvu umožnia energetickú nezávislosť na fosílnych palivách.

# ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. **Alternativy.sk.** Alternatívne zdroje energie. [Online] [Dátum: 17. 10 2011.]  
<http://www.alternativy.sk/>.
2. **British Petroleum.** Energy Outlook 2030 | Statistical Review 2011. [Online] [Dátum: 26. 10 2011.]  
[http://www.bp.com/liveassets/bp\\_internet/globalbp/STAGING/global\\_assets/downloads/O/2012\\_BP-Energy-Outlook-2030-summary-tables.xls](http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/STAGING/global_assets/downloads/O/2012_BP-Energy-Outlook-2030-summary-tables.xls).
3. **Energy Harvesting Forum.** Energy Harvesting Forum. [Online] [Dátum: 29. 11 2011.]  
<http://www.energyharvesting.net/>.
4. **Wikipedia, the free encyclopedia.** Energy Harvesting. [Online] [Dátum: 01. 12 2011.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_harvesting](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting).
5. —. Antenna (Radio). [Online] [Dátum: 14. 12 2011.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_%28radio%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_%28radio%29).
6. **Peter Joseph Bevelacqua.** Antenna-Theory.com - Frequency Bands. [Online] [Dátum: 4. 01 2012.] <http://www.antenna-theory.com/basics/freqBands.html>.
7. —. Antenna-Theory.com - Radiation pattern. [Online] [Dátum: 04. 01 2012.]  
<http://www.antenna-theory.com/basics/radPattern.html>.
8. —. Antenna-Theory.com - Beamwidths and Sidelobe Levels. [Online] [Dátum: 04. 01 2012.] <http://www.antenna-theory.com/basics/radPatDefs.php>.
9. —. Antenna-Theory.com - Field Regions. [Online] [Dátum: 08. 01 2012.]  
<http://www.antenna-theory.com/basics/fieldRegions.php>.
10. —. Antenna-Theory.com - Directivity. [Online] [Dátum: 18. 01 2012.]  
<http://www.antenna-theory.com/basics/directivity.php>.
11. —. Antenna-Theory.com - Antenna Efficiency and Antenna Gain. [Online] [Dátum: 18. 01 2012.] <http://www.antenna-theory.com/basics/gain.php>.
12. —. Antenna-Theory.com - Impedance. [Online] [Dátum: 25. 01 2012.]  
<http://www.antenna-theory.com/basics/impedance.php>.
13. —. Antenna-Theory.com - Bandwidth. [Online] [Dátum: 30. 01 2012.]  
<http://www.antenna-theory.com/basics/bandwidth.php>.
14. —. Antenna-Theory.com - Polarization - EM Waves and Antennas. [Online] [Dátum: 03. 02 2012.] <http://www.antenna-theory.com/basics/polarization.php>.

15. —. Antenna-Theory.com - Antenna Types. [Online] [Dátum: 17. 02 2012.]  
<http://www.antenna-theory.com/antennas/main.php>.
16. **Wikipedia, the free encyclopedia.** Dipole antenna. [Online] [Dátum: 02. 02 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole\\_antenna](http://en.wikipedia.org/wiki/Dipole_antenna).
17. **Katedra elektroniky a multimediálnych telekomunikácií.** Pr11\_Mikropasikove anteny.pdf. [Online] [Dátum: 05. 02 2012.]  
[http://www.kemt.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/\\_materialy/Prednasky/Pr11/Pr11\\_Mikropasikove%20anteny.pdf](http://www.kemt.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/Prednasky/Pr11/Pr11_Mikropasikove%20anteny.pdf).
18. **Wikipedia, the free encyclopedia.** Rectifier. [Online] [Dátum: 05. 02 2012.]  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier>.
19. **Wikipedie, otevřená encyklopedie.** Polovodičová dioda. [Online] [Dátum: 08. 02 2012.] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodičová\\_dioda](http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodičová_dioda).
20. **Wikipedia, the free encyclopedia.** Shottky diode. [Online] [Dátum: 08. 02 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_diode).
21. **abcdimenze.wz.cz.** USMĚRŇOVAČE. [Online] [Dátum: 10. 02 2012.]  
<http://abcdimenze.wz.cz/elektronika/usmernovace.html>.
22. **Wikipedia, the free encyclopedia.** Impedance matching. [Online] [Dátum: 18. 02 2012.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Impedance\\_matching](http://en.wikipedia.org/wiki/Impedance_matching).
23. **Peter Joseph Bevelacqua.** Antenna-Theory.com - Impedance Matching Basics - Series L and C. [Online] [Dátum: 20. 02 2012.] <http://www.antenna-theory.com/tutorial/smith/smithchart5.php>.
24. **Wikipedia, the free encyclopedia.** IEEE 802.11. [Online] [Dátum: 04. 03 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11).
25. **RefractiveIndexe.INFO.** Refractive index of air. [Online] [Dátum: 05. 03 2012.]  
<http://refractiveindex.info/?group=GASES&material=Air>.
26. **Ghafar, Nurulrodziah Bt Abdul.** *Design of a Compact Microstrip Antenna at 2,4 GHz.* s.l. : Universiti Teknologi Malaysia, 2005.
27. *Two Compact Microstrip Patch Antennas for 2,4 GHz Band - A Comparison.* **Gupta, Vibha Rani a Gupta, Nisha.** 2006.
28. **Wikipédia, slobodná encyklopédia.** Fraktál. [Online] [Dátum: 23. 03 2012.]  
<http://sk.wikipedia.org/wiki/Fraktál>.
29. —. Wi-Fi. [Online] [Dátum: 29. 03 2012.] <http://sk.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>.
30. **Scotty Gammenthaler.** *Basic Rectifier Relationships and Design Considerations for use with Rectennas.* s.l. : The Moon Society Incorporated, 2008.

31. **2J antennae.** SOS Electronic. [Online] [Dátum: 22. 03 2012.]  
[http://www.sos.sk/a\\_info/resource/c/2JW032.pdf](http://www.sos.sk/a_info/resource/c/2JW032.pdf).

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**  
**FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY**

**ZÍSKAVANIE ENERGIE Z RÁDIOVÉHO SIGNÁLU**

**Diplomová práca**

**(Prílohy)**

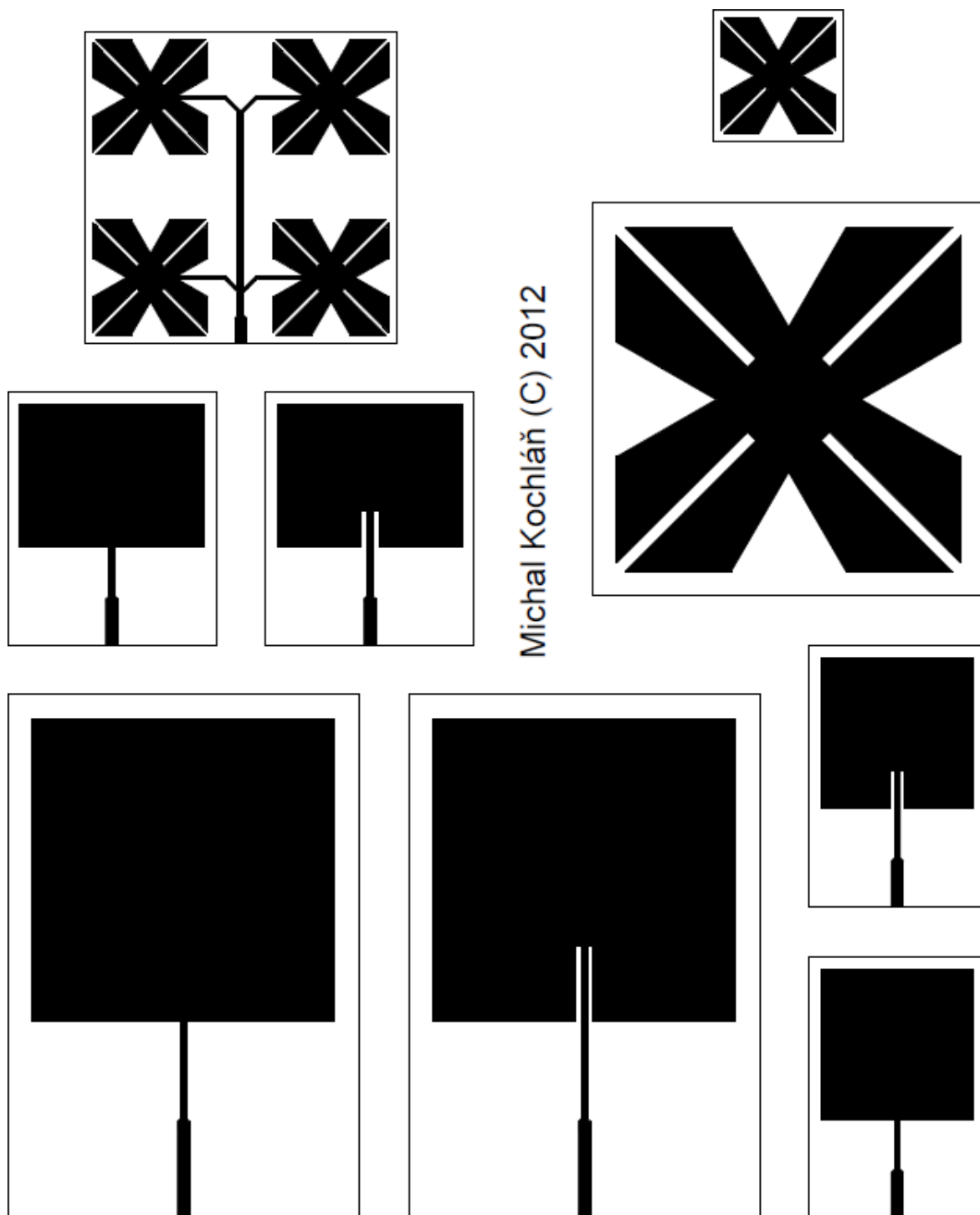
Študijný program: Počítačové inžinierstvo  
Študijný odbor: 9.2.4. počítačové inžinierstvo  
Školiace pracovisko: Katedra technickej kybernetiky  
Školiteľ: doc. Ing. Juraj Miček, PhD.  
Registračné číslo: 359/2011

**Žilina 2012**  
**Bc. Michal Kochláš**

---

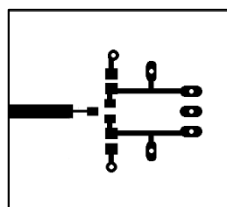
## PRÍLOHA A:

### Predloha priesvitnej fólie antén (70% pôvodnej veľkosti)



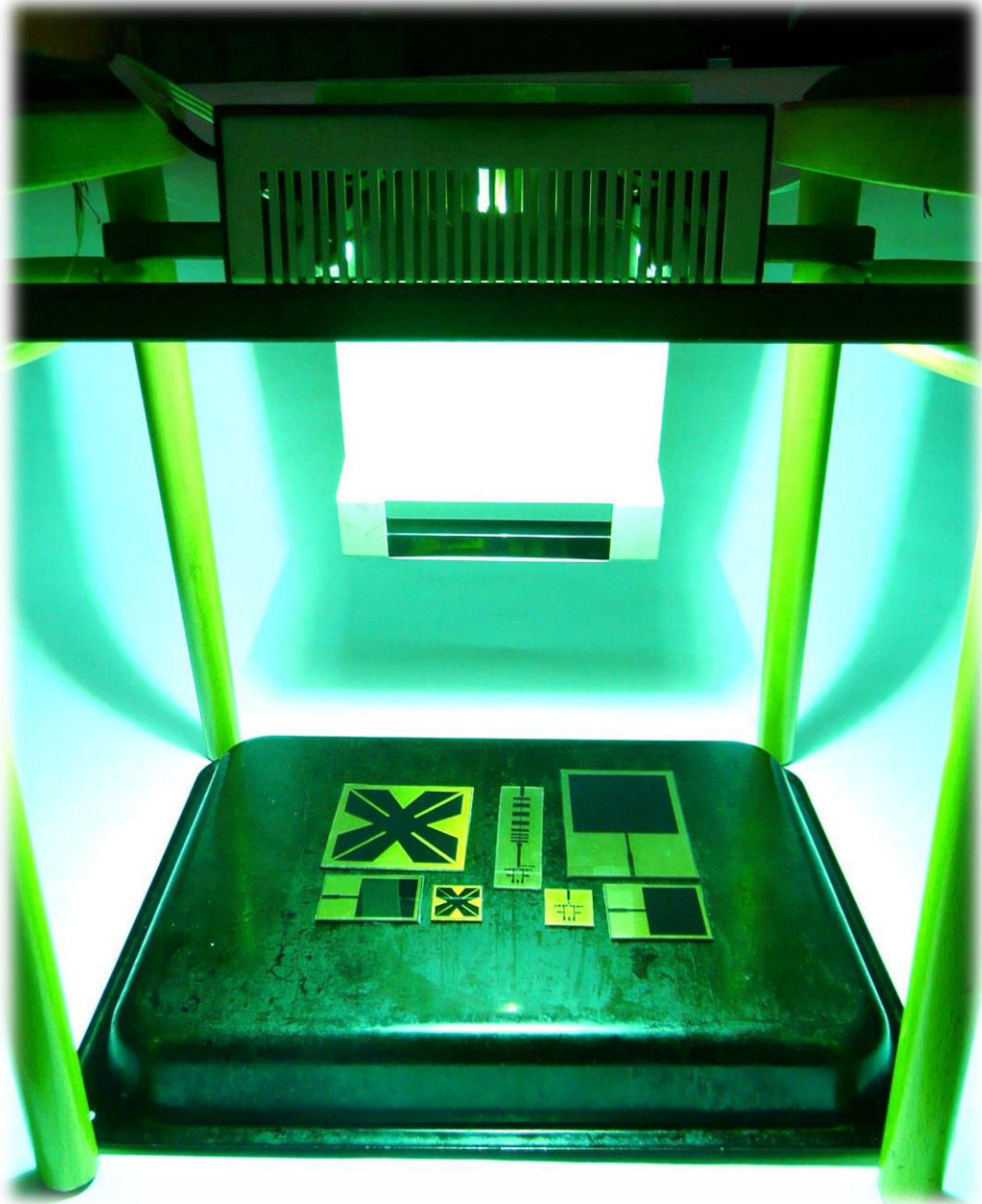
## PRÍLOHA B:

Predloha priesvitnej fólie usmerňovacieho obvodu (100% veľkosť)



## PRÍLOHA C:

### Osvit dosiek plošných spojov





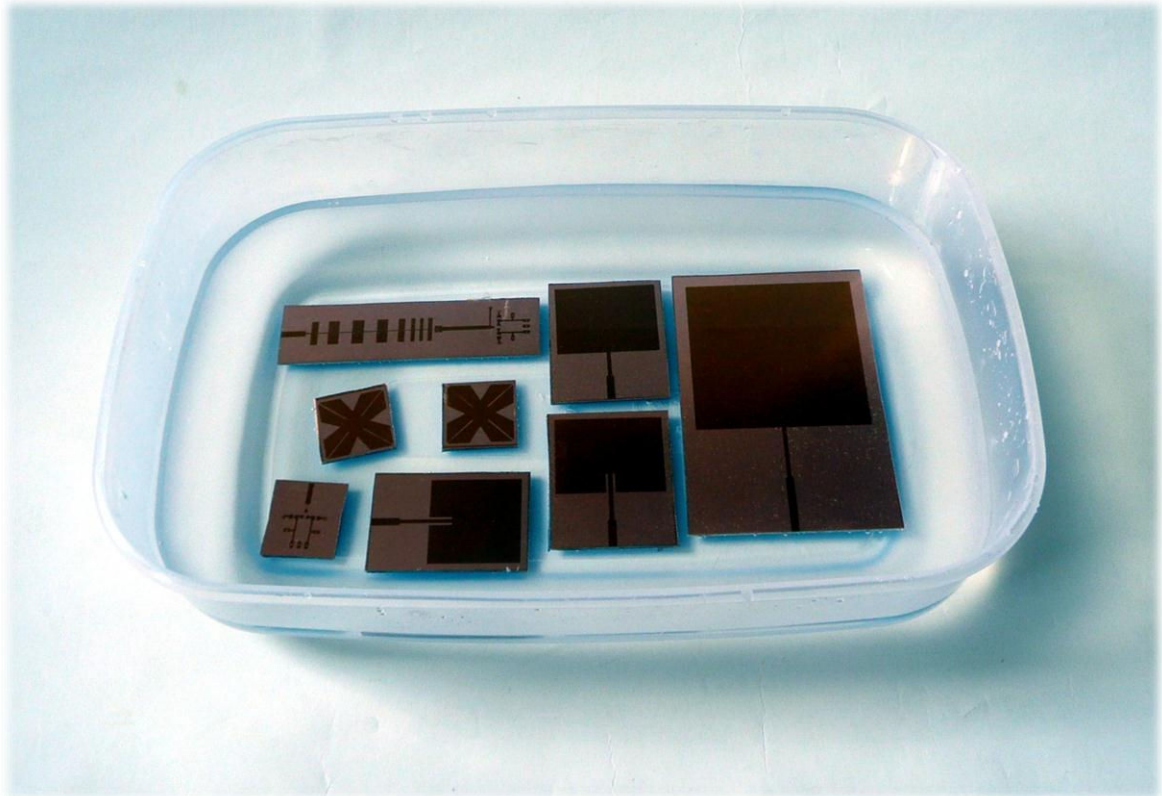
## PRÍLOHA D:

### Osvit dosiek plošných spojov (druhá várka)



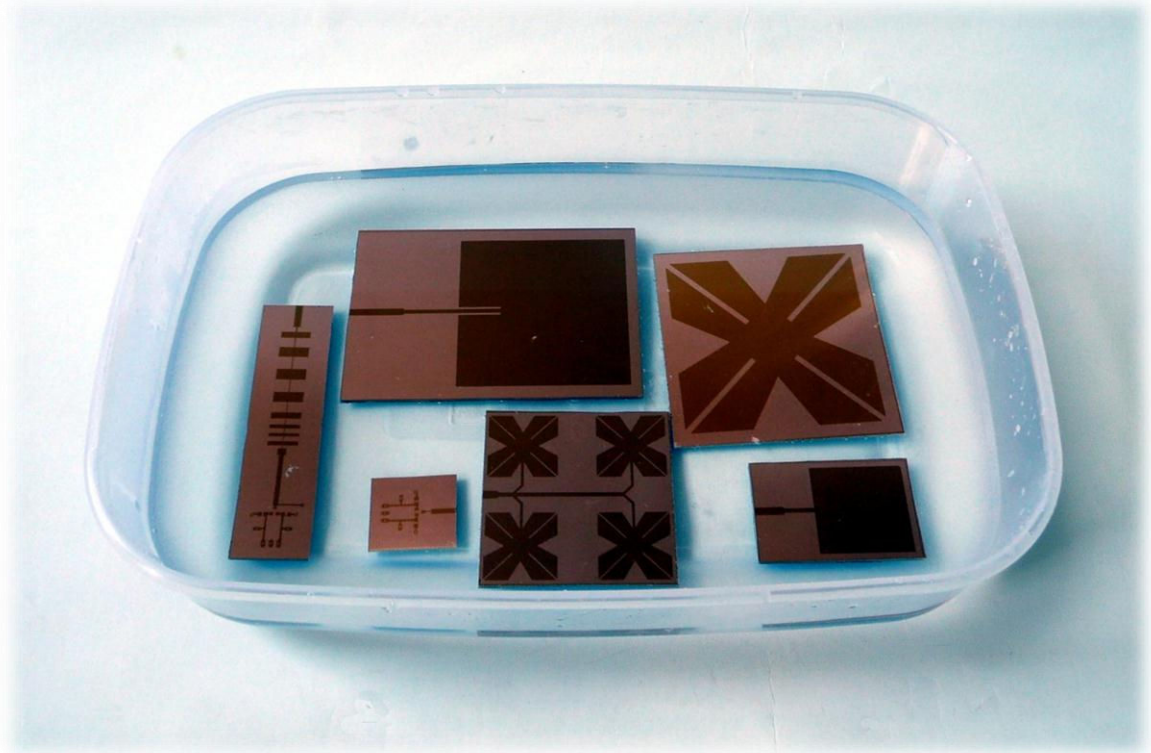
## PRÍLOHA E:

### Kúpeľ DPS v roztoku vývojky



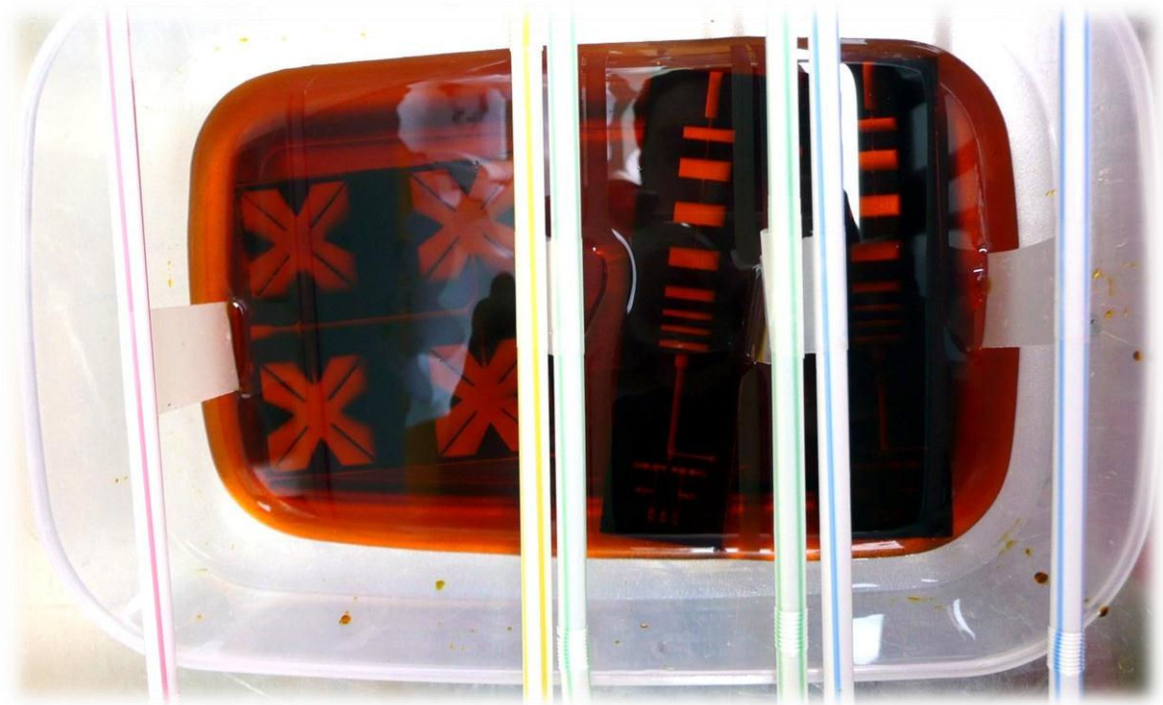
## PRÍLOHA F:

### Kúpeľ DPS v roztoku vývojky (druhá várka)



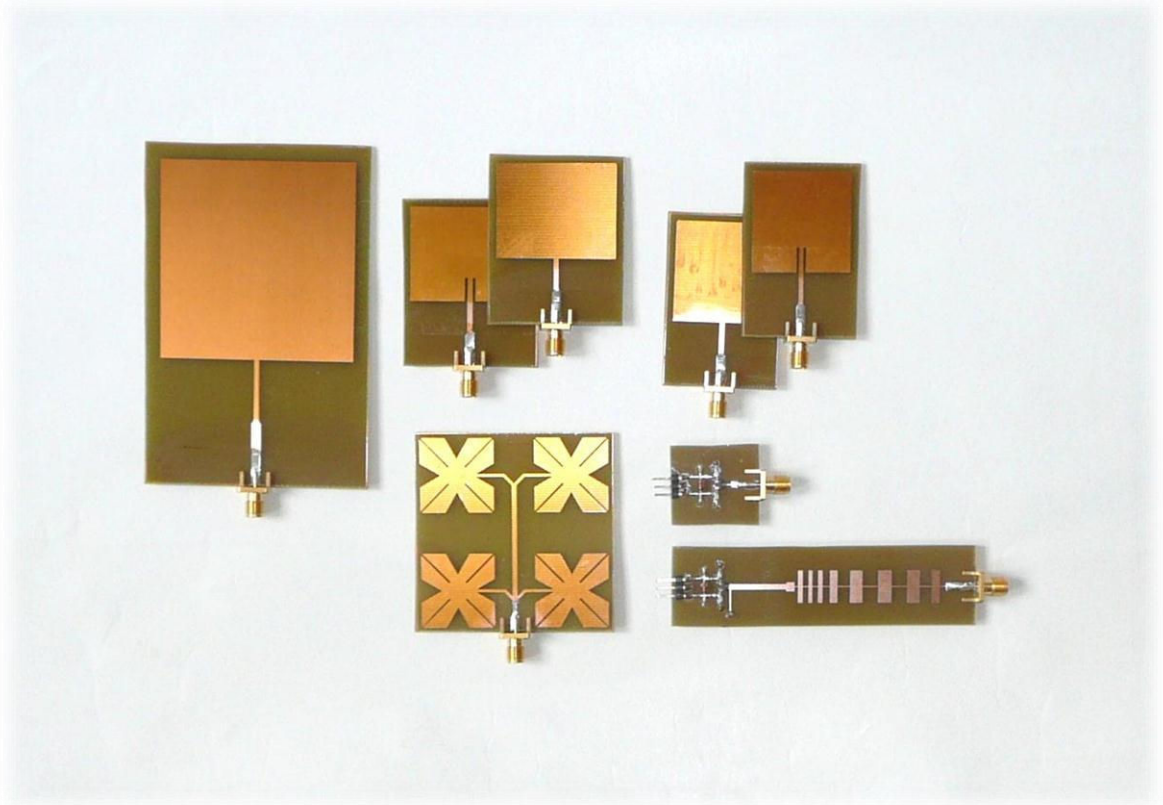
## PRÍLOHA G:

### Leptanie DPS chloridom železitým



## PRÍLOHA H:

### Hotové DPS s konektormi a súčiastkami



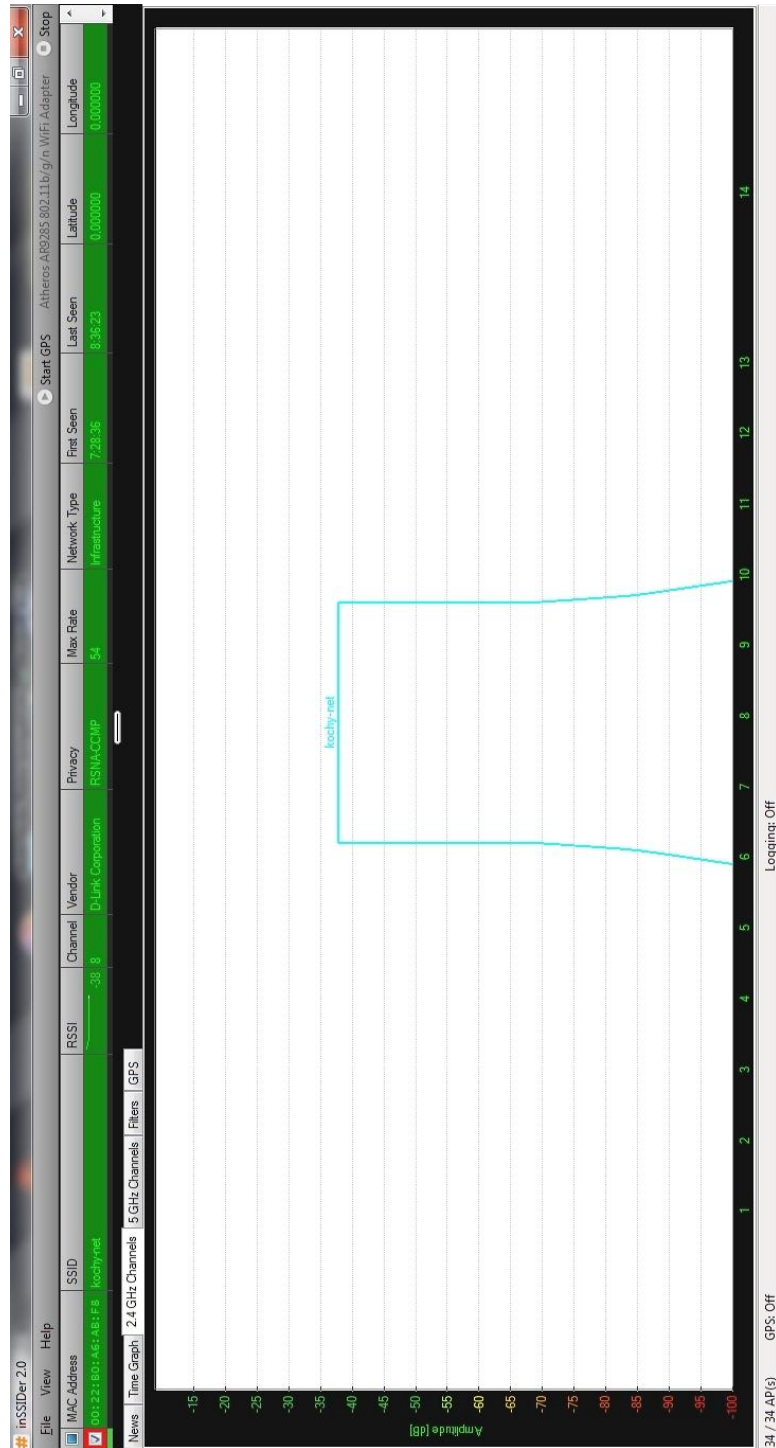
# PRÍLOHA I:

## Meranie spektrálnym analyzátorom R&H FSH8



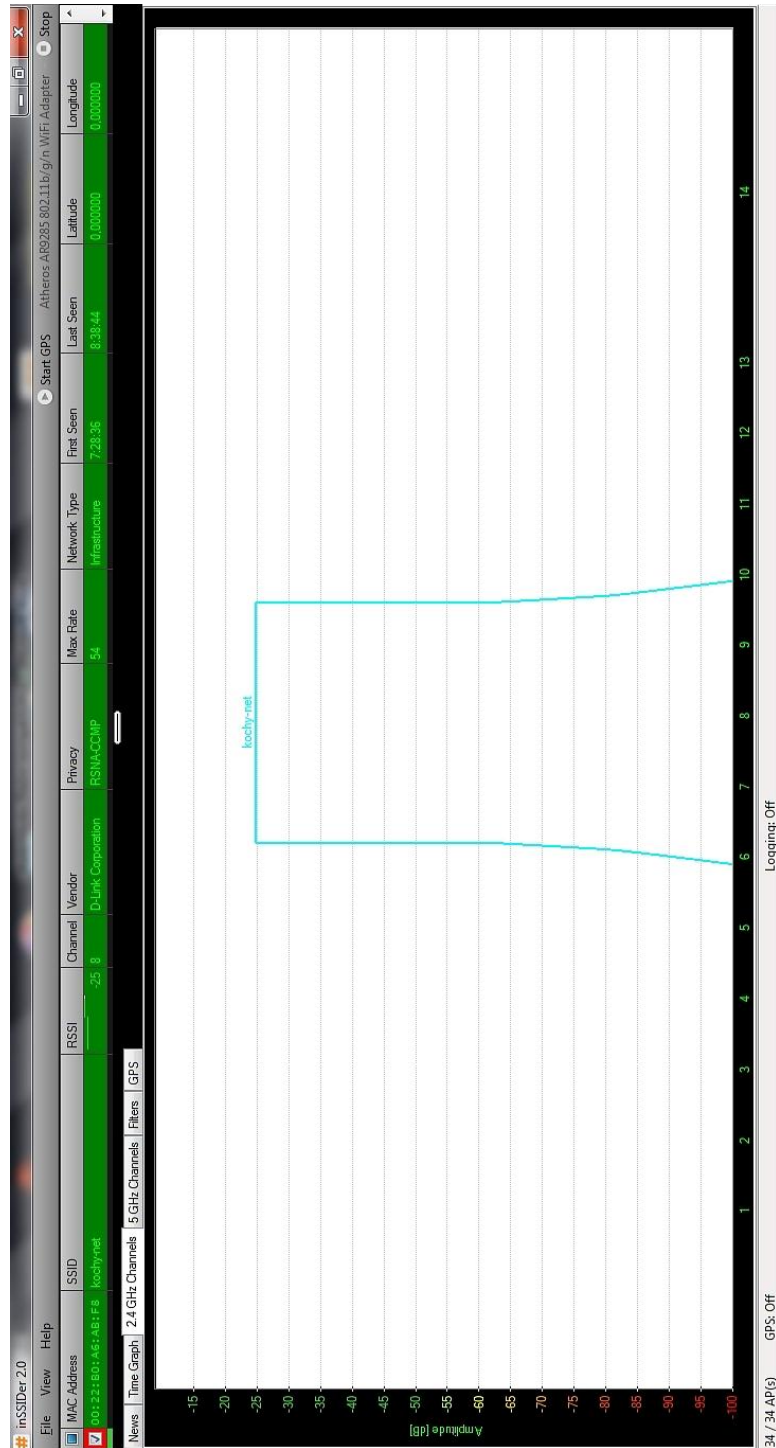
# PRÍLOHA J:

## Meraná úroveň signálu štandardnej WIFI antény



# PRÍLOHA K:

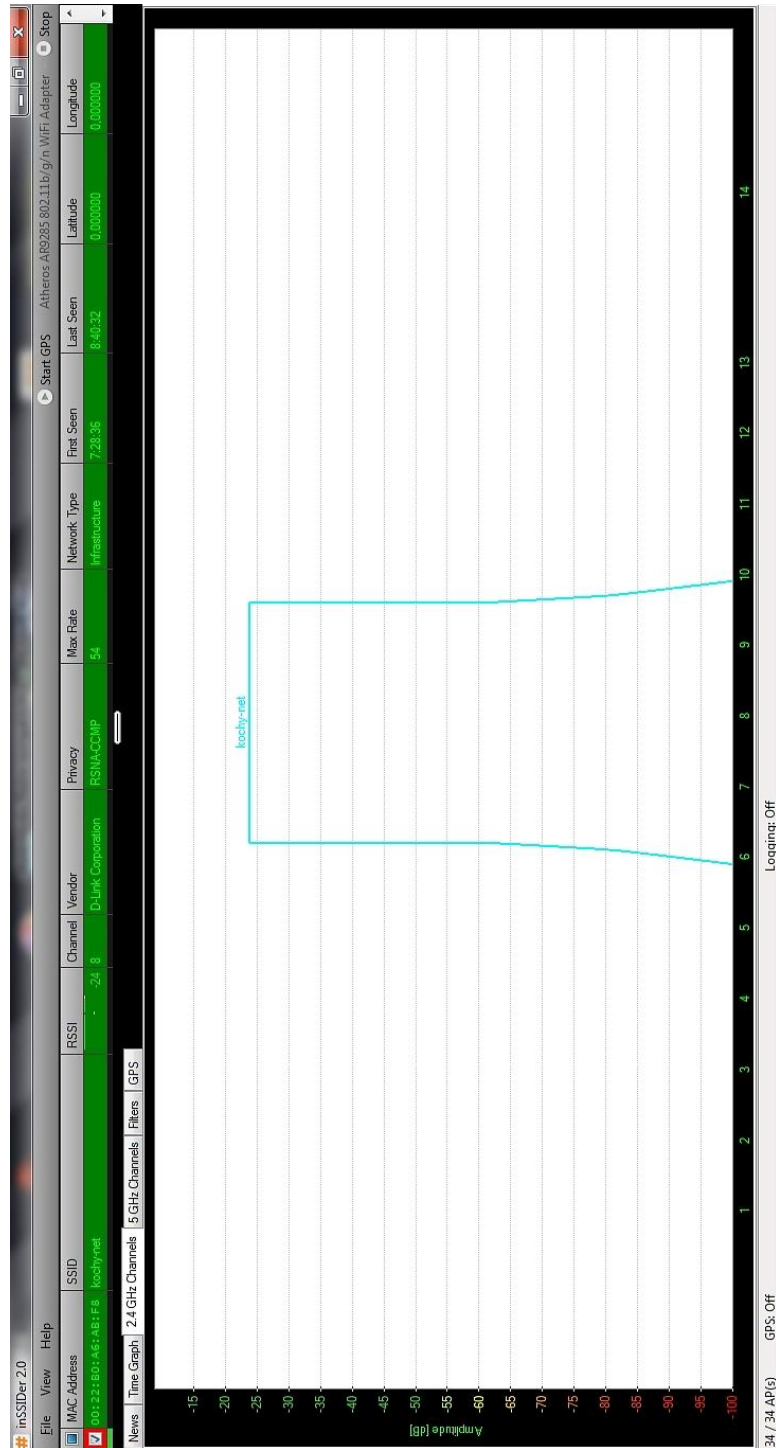
## Meraná úroveň signálu obdĺžnikovej antény





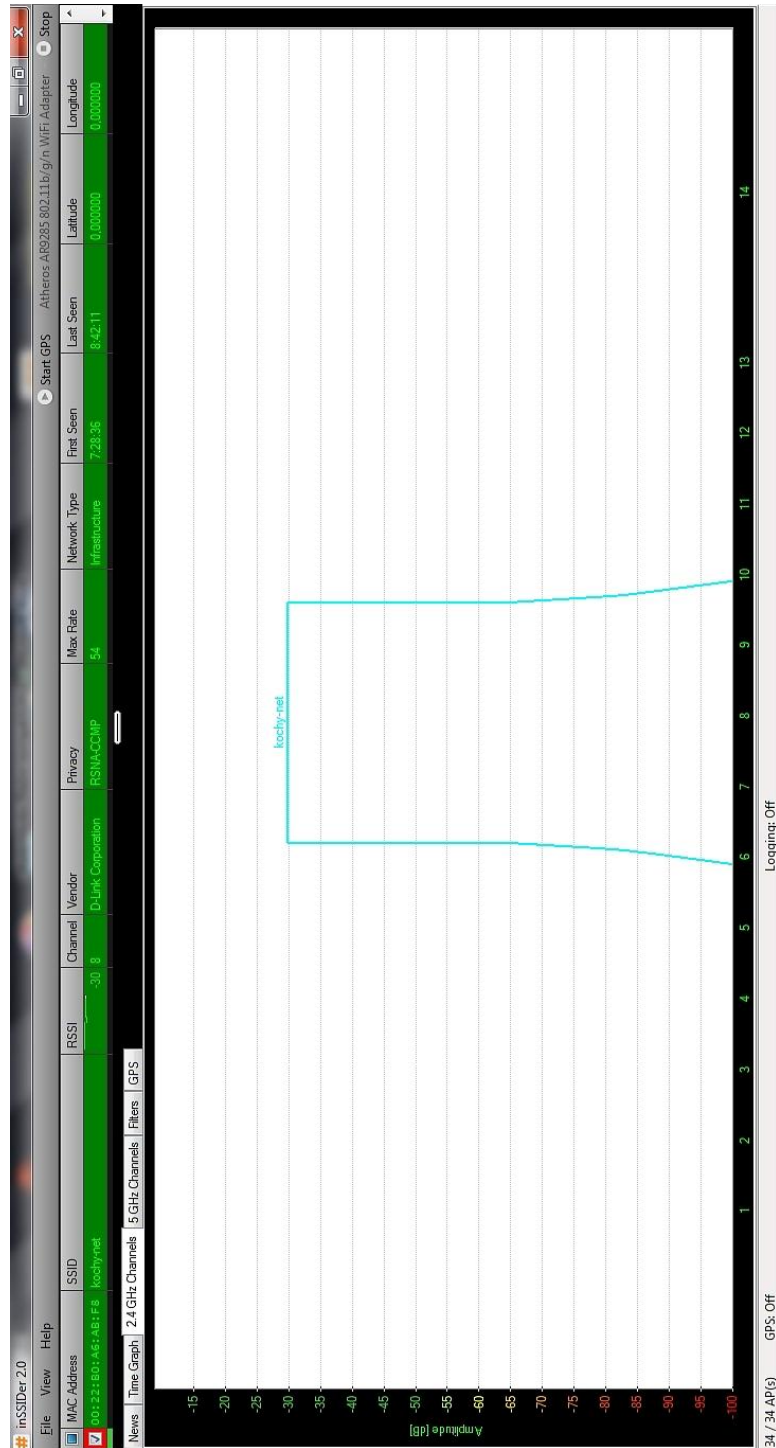
# PRÍLOHA L:

## Meraná úroveň signálu obdĺžnikovej antény so zárezom



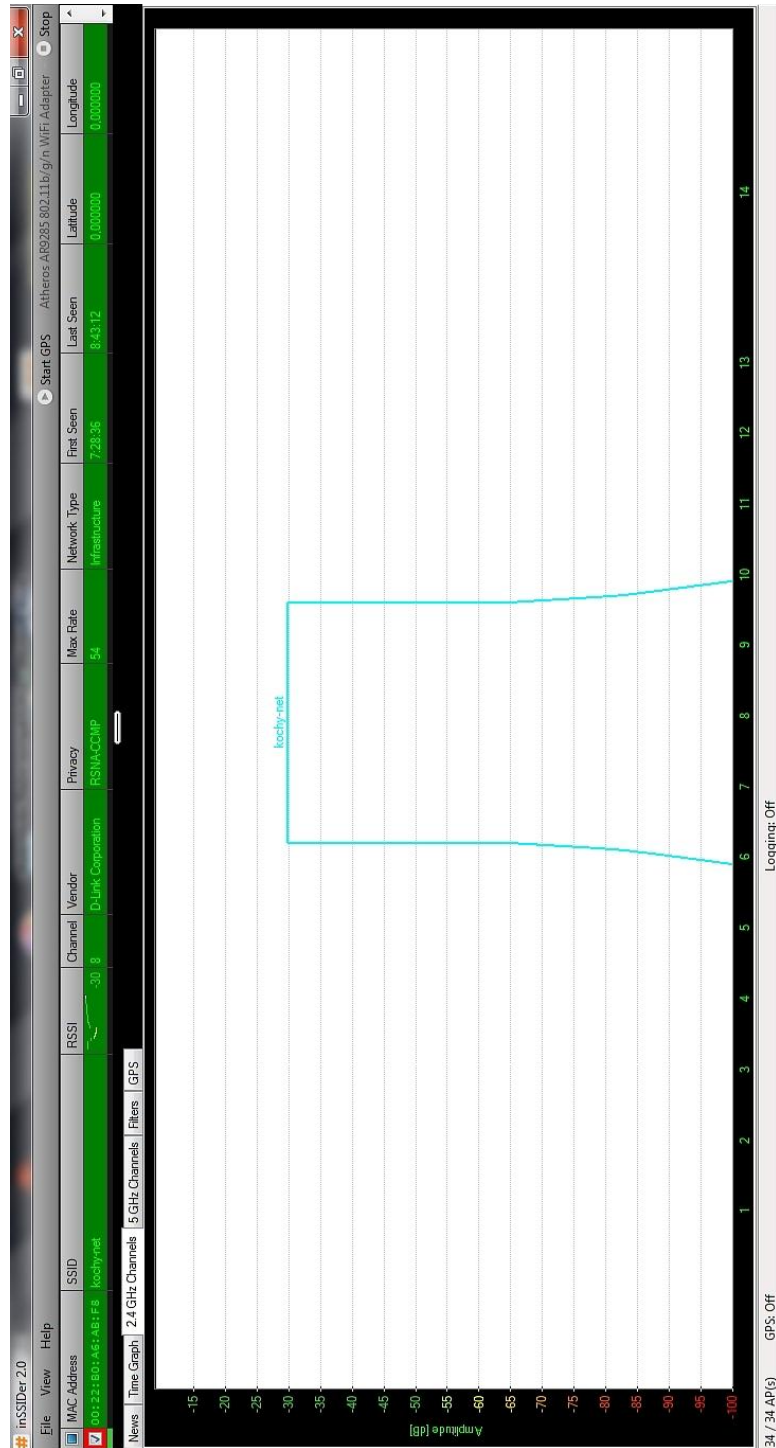
# PRÍLOHA M:

## Meraná úroveň signálu štvorcovej antény $\lambda 4$



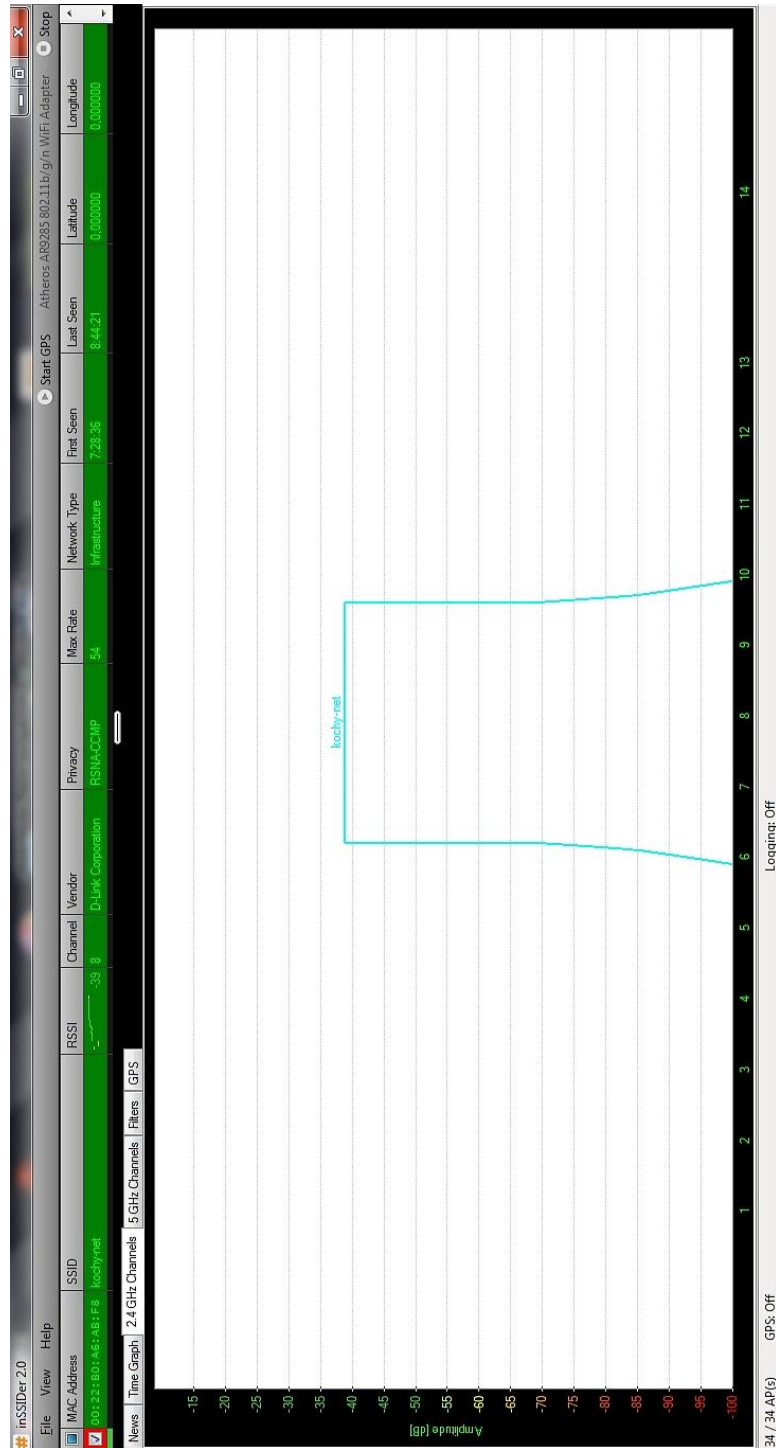
# PRÍLOHA N:

## Meraná úroveň signálu štvorcovej antény $\lambda_4$ so zárezom



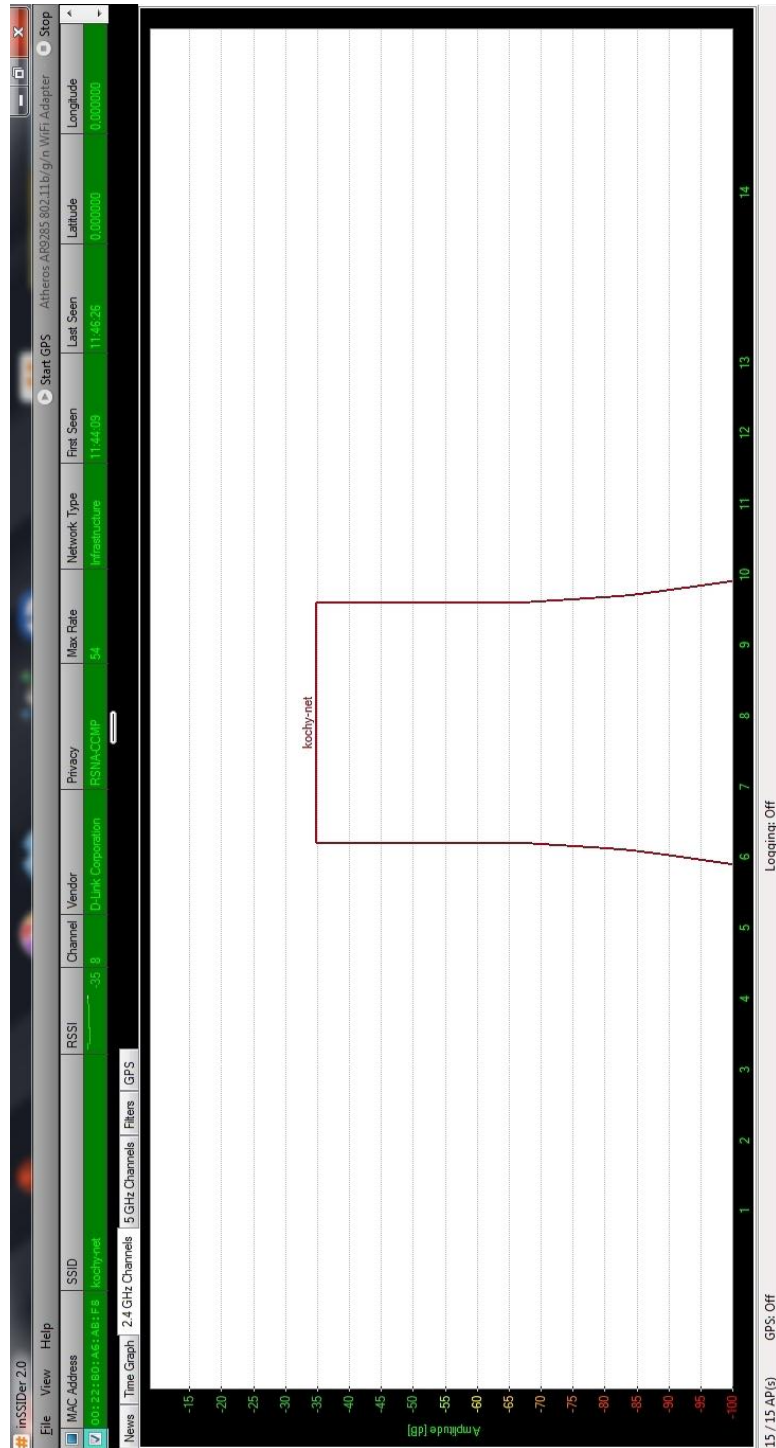
# PRÍLOHA O:

## Meraná úroveň signálu štvorcovej antény $\lambda_2$



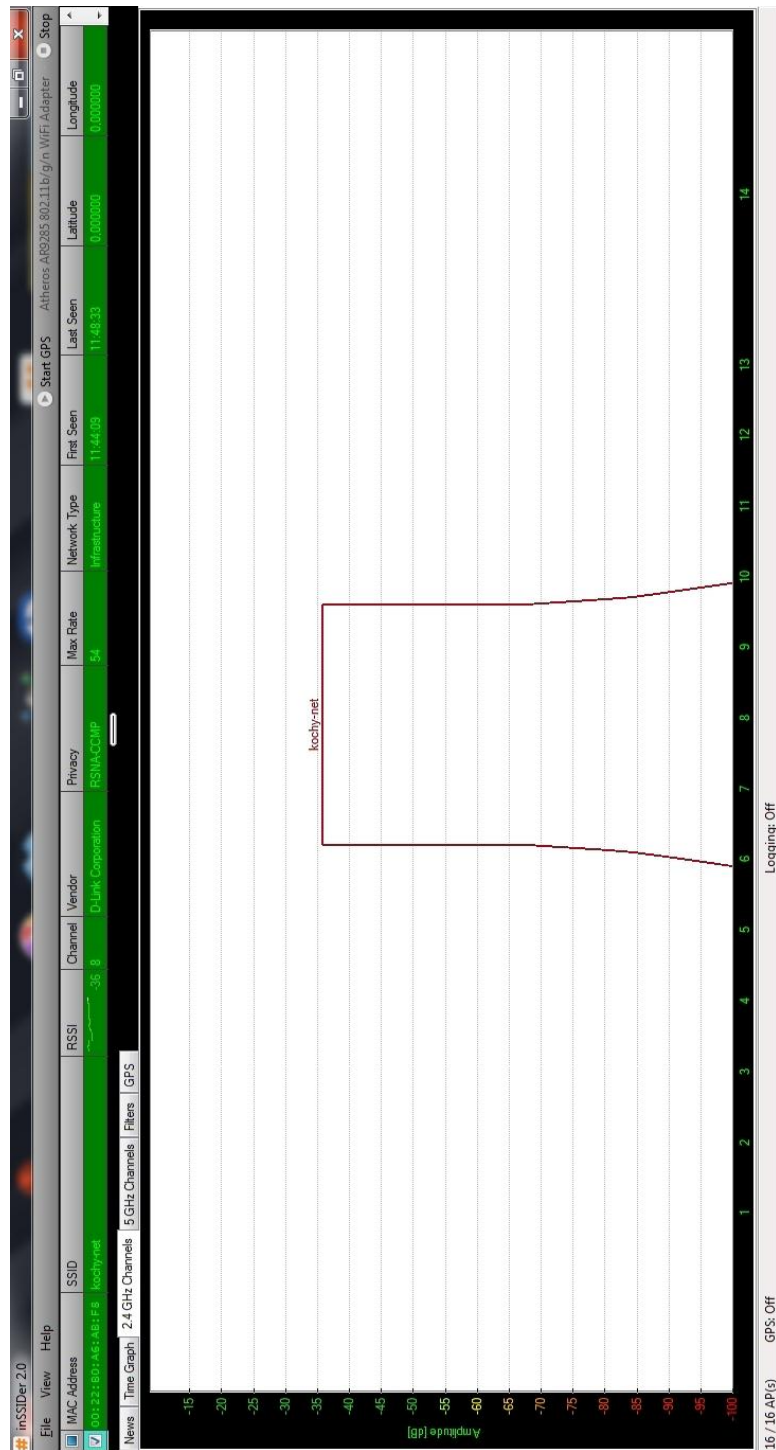
# PRÍLOHA P:

## Meraná úroveň signálu fraktálovej antény $\lambda_4$



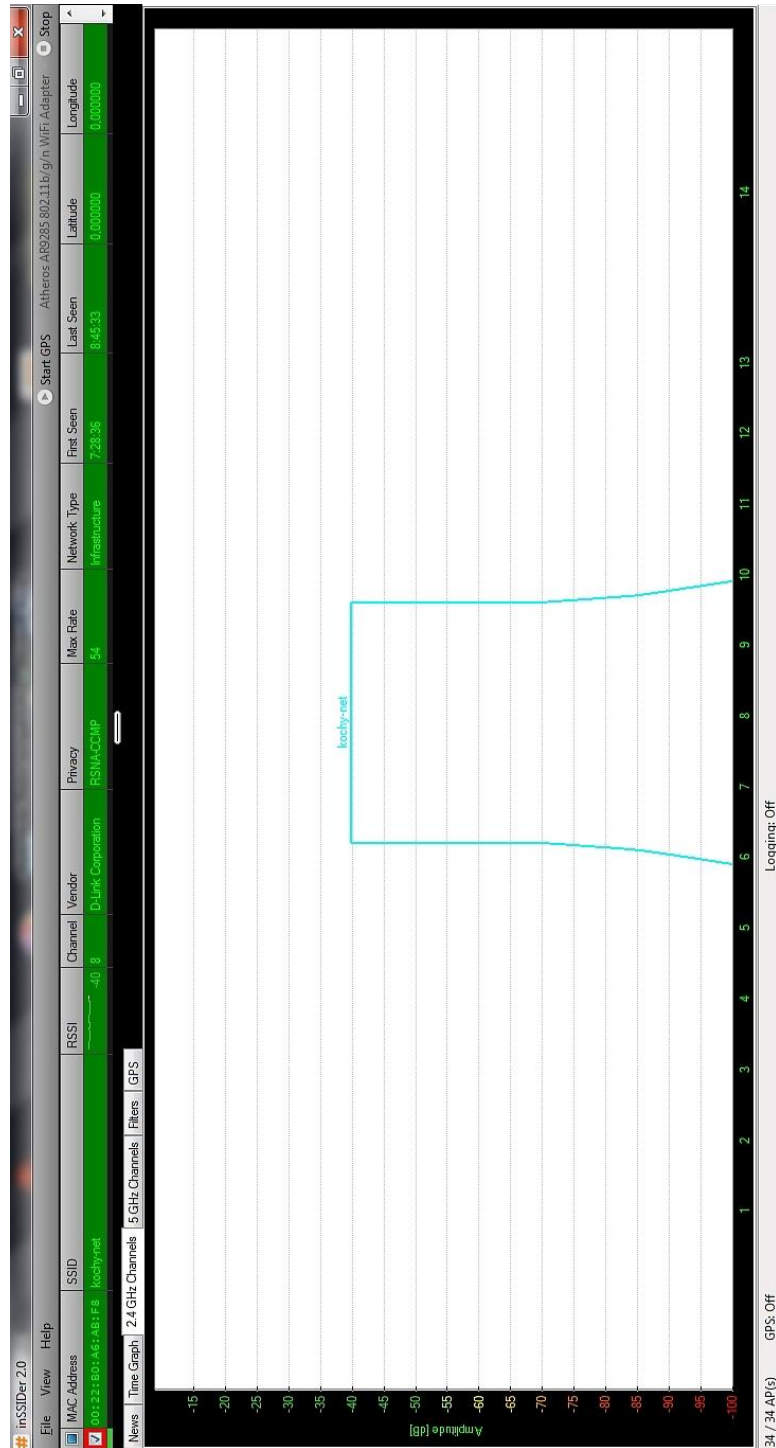
# PRÍLOHA Q:

## Meraná úroveň signálu fraktálovej antény $\lambda_2$



# PRÍLOHA R:

## Meraná úroveň signálu antény fraktálového poľa



## PRÍLOHA S:

### Namerané frekvenčné pásmo 8. kanála WIFI spektrálnym analyzátorom R&H FSH8





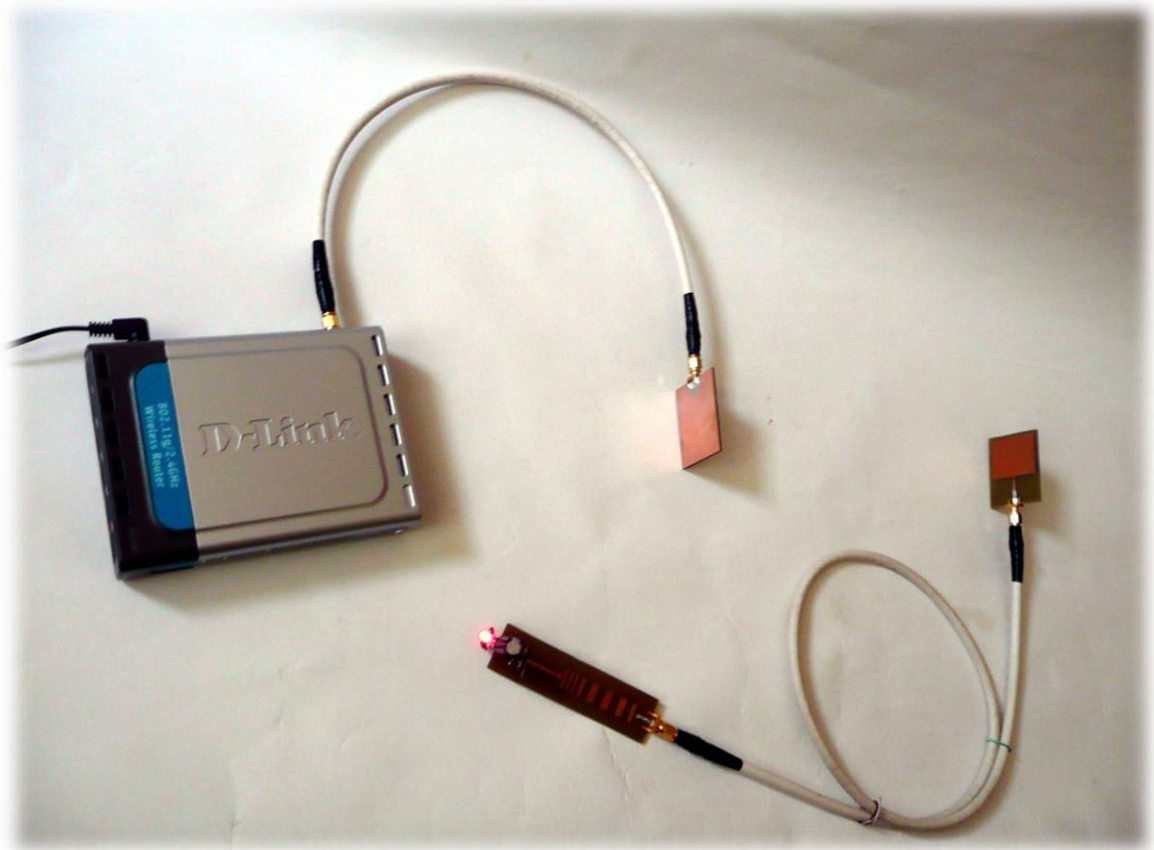
## PRÍLOHA T:

### Namerané frekvenčné pásmo GSM 1900 MHz spektrálnym analyzátorom R&H FSH8



## PRÍLOHA U:

### Modul zberu energie napájajúci LED diódu



# PRÍLOHA V:

## Schéma usmerňovacieho a vyrovnávacieho obvodu

