



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

YAGI-UDA ANTÉNY V PLANÁRNÍM A DRÁTĚNÉM PROVEDENÍ

PLANAR AND WIRED YAGI-UDA ANTENNAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Křepela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Mikulášek, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Pavel Křepela

ID: 120698

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Yagi-Uda antény v planárním a drátěném provedení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s teorií návrhu Yagi-Uda antén a prostudujte možnosti jejich realizace. Vše stručně sepište. Navrhněte a modelujte Yagi-Uda anténu v planárním provedení pro pásmo Wi-Fi 5 GHz. Zvažte možnosti zlepšení parametrů navržené antény pomocí drátěného reflektoru. Interpretujte dosažené výsledky.

Navrženou anténu vyrobte a změřte její vlastnosti. Diskutujte dosažené výsledky s výsledky získanými modelováním antény na počítači. Ověřte funkci antény v reálném provozu sítě Wi-Fi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HUANG, H., LU, J., HSU, P. A simple planar high-directivity Yagi-Uda antenna with a concave parabolic reflector. International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2010, Lisbon, 2010, pp. 1-4.

[2] KANEDA, N., QUIAN, Y., ITOH, T. A novel Yagi-Uda dipole array fed by a microstrip-to-CPS transition. In Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, Japan, pp. 1413-1416, 1998.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 16.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Mikulášek, Ph.D.

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem Yagi-Uda antén s následujícím rozbohem a návrhem antény v planárním provedení s drátěným reflektorem. První část se zaměřuje na rozbor této antény a parametrů. Další část pokračuje vyšetřováním optimálních parametrů pro zadanou anténu s následným návrhem pro pásmo Wi-Fi 5 GHz. Anténa je simulována v CST Microwave Studio. Finální část hodnotí dosažené výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA

yagi, uda, planární anténa, flíčková anténa, drátěná anténa, zářič, reflektor, direktor, dipól, CST, Wi-Fi, 5 GHz, balun

ABSTRACT

This work deals with the study of Yagi-Uda antennas, followed by analysis and design of planar antenna with wired reflector. The first part focused on the analysis of the antenna and parameters. Another part of the continuing investigation of the optimum parameters for a given antenna followed by a design in Wi-Fi 5 GHz band. The antenna is simulated in CST Microwave Studio. The final part devoted the results achieved.

KEYWORDS

yagi, uda, patch, mirostrip, wired, anntena, driven element, reflector, director, dipole, CST, Wi-Fi, 5 GHz, balun

KŘEPELA, P. Yagi-Uda antény v planárním a drátěném provedení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 42 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Mikulášek, Ph.D.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Yagi-Uda antény v planárním a drátěném provedení jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáš Mikuláškoví, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

.....
(podpis autora)

OBSAH

ÚVOD	11
1 TEORETICKÝ ROZBOR.....	12
1.1 Yagi anténa.....	12
1.2 Popis funkce Yagi antény.....	13
1.3 Konstrukce Yagi antény	15
1.4 Způsoby návrhu Yagi antény	17
1.4.1 Modelování antén.....	17
1.4.2 Návrh tabulkou.....	18
1.4.3 Návrh vzorci	19
1.4.4 Návrh kalkulátorem.....	19
1.5 Planární antény.....	19
1.5.1 Mikropásek.....	20
1.5.2 Vázané mikropáskové vedení.....	22
2 NÁVRH PLANÁRNÍ YAGI ANTÉNY	23
2.1 Volba šířky pracovního pásma antény	23
2.2 Vyšetřování zisku planární antény	24
2.3 Planární Yagi anténa	26
2.4 Drátěný reflektor	31
2.5 Impedanční přizpůsobení Yagi antény	37
2.6 Kompletace Yagi antény	40
3 REALIZACE A MĚŘENÍ	45
ZÁVĚR.....	49
LITERATURA.....	50
Seznam zkratk	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Yagi-Uda anténa s definicí rozměrů pro návrh. [1]	12
Obrázek 2. Rozložení vzdáleného pole pro (A) zářič-reflektor a (B) zářič-direktor [3].....	14
Obrázek 3. (A) Geometrie vzdáleného pole a (B) fázorový diagram N-elementové soustavy [1]	15
Obrázek 4. Vliv vzdálenosti reflektoru na směrovost [4]	16
Obrázek 5. Vliv vzdálenosti direktorů na směrovost [4].....	17
Obrázek 6. Strom výpočetních metod CEM	18
Obrázek 7. Tabulka pro návrhy Yagi antén	19
Obrázek 8. Mikropásek s rozměry	20
Obrázek 9. Koplanární mikropásky s rozměry.....	22
Obrázek 10. Elektromagnetické pole lichého buzení	22
Obrázek 11. Grafické znázornění vlivu počtu elementů na zisk antény	26
Obrázek 12. Vliv změny wR na směrovou char. roviny H	27
Obrázek 13. Vliv změny LR na směrovou char. roviny H.....	27
Obrázek 14. Vliv změny wD na směrovou char. roviny H	28
Obrázek 15. Vliv změny LD na směrovou char. roviny H	29
Obrázek 16. Planární anténa s definicí rozměrů.....	29
Obrázek 17. Činitel odrazu planární antény	30
Obrázek 18. Směrová char. E roviny planární antény.....	30
Obrázek 19. Směrová char. H roviny planární antény	31
Obrázek 20. Anténa s plošným reflektorem a definicí rozměrů.....	31
Obrázek 21. Vliv vzdálenosti wR na směrovost antény	32
Obrázek 22. Vliv vzdálenosti wR na směrovou char. roviny H.....	32
Obrázek 23. Vliv sevřeného úhlu na směrovost antény	33
Obrázek 24. Vliv sevřeného úhlu na směrovou char. roviny H	33
Obrázek 25. Vliv šířky průchodu na směrovou char. antény roviny H.....	34
Obrázek 26. Vliv redukce ver. drátů na směrovou char. antény roviny H.....	34
Obrázek 27. Postupná změna tvaru reflektoru, (A) plošný plný reflektor, (B) drátový reflektor, (C) drátový reflektor s průchodem a (D) drátový reflektor s redukcí vertikálních drátů.....	35
Obrázek 28. Směrové charakteristiky reflektorů v rovině H	35
Obrázek 29. FBR reflektorů v pracovním pásmu	36
Obrázek 30. Zisk reflektorů v pracovním pásmu	36
Obrázek 31. Činitel odrazu reflektorů v pracovním pásmu	36
Obrázek 32. Reálná složka impedance antény	37
Obrázek 33. Imaginární složka impedance antény.....	37
Obrázek 34. Balun s definicí rozměrů.....	38
Obrázek 35. Činitel odrazu balunu.....	39
Obrázek 36. Změna fáze na výstupech balunu.....	39
Obrázek 37. Finální vzhled antény bez substrátu.....	40
Obrázek 38. Činitel odrazu finální antény	41
Obrázek 39. SWR finální antény.....	41
Obrázek 40. Zisk finální antény	41
Obrázek 41. FBR finální antény.....	42
Obrázek 42. Reálná hodnota impedance finální antény	42
Obrázek 43. Imaginární hodnota impedance finální antény.....	42
Obrázek 44. Účinnost finální antény.....	43
Obrázek 45. Rozložení elektrického pole antény na 5,4375 GHz.....	43

Obrázek 46. Směrová char. roviny E finální antény	44
Obrázek 47. Směrová char. roviny H finální antény	44
Obrázek 48. Horní strana antény	45
Obrázek 49. Dolní strana antény	45
Obrázek 50. Srovnání činitele odrazu antény	46
Obrázek 51. Srovnání zisku antény v rovině E - 5,15 GHz	46
Obrázek 52. Srovnání zisku antény v rovině H - 5,15 GHz.....	47
Obrázek 53. Srovnání zisku antény v rovině E - 5,725 GHz	47
Obrázek 54. Srovnání zisku antény v rovině H - 5,725 GHz.....	48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Parametry substrátu IsoClad 933.	23
Tabulka 2. Rozdělení pásma 5 GHz.....	23
Tabulka 3. Pracovní pásma antén pro 5 GHz.....	23
Tabulka 4. Vliv celkového počtu elementů na zisk antény.....	25
Tabulka 5. Počáteční rozměry planární antény	26
Tabulka 6. Optimální rozměry planární antény	28
Tabulka 7. Optimální rozměry balunu v mm	39
Tabulka 8. Rozměry kompletní antény v mm	40

ÚVOD

Cílem této práce je prostudovat teorii návrhu a možnosti realizace Yagi-Uda antény v planárním provedení pro pásmo Wi-Fi 5 GHz. Dále je vyšetřován vliv drátěného reflektoru na tuto anténu.

První teoretická část práce se zabývá popisem a funkcí Yagi-Uda antény. Jsou zde popsány i možné způsoby návrhů této antény. V druhé se návrhová část zabývá volbou požadovaných parametrů antény, návrhu a následnou analýzou antény v programovém prostředí CST Microwave Studio. V třetí praktické části je popsána výroba a měření antény s následným porovnáním změřených veličin s výsledky analýzy. V závěru je zhodnocen celkový výsledek práce.

Výsledky této práce lze uplatnit při návrhu v jakémkoliv Yagi-Uda antény, výsledné rozměry by se odlišovaly pouze v závislosti na délce vlny. Výslednou anténu lze použít v bezdrátových spojeních bod-bod v LAN sítích.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

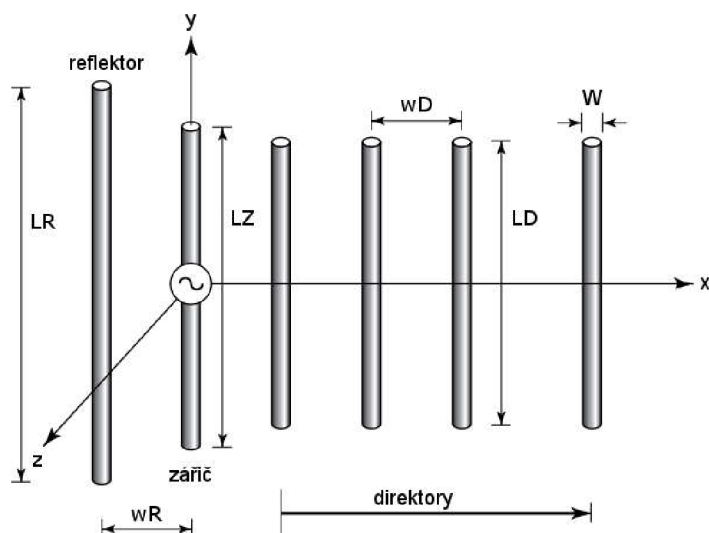
Pod pojmem Yagi-Uda (dále jen Yagi) se nám vybaví anténa, která je levná a jednoduchá na výrobu, ale má malou šířku pásma, velké rozměry a složitý návrh. Anténa je svou konstrukční jednoduchostí a dobrými parametry jednou z nejrozšířenějších antén v pásmu metrových a decimetrových vln. Svoji popularitu získala díky použití pro příjem televizního signálu, ale je používána i v jiných profesionálních nebo domácích aplikacích.

1.1 Yagi anténa

Anténu navrhl v roce 1926 profesor Shintaro Uda s pomocí studenta Hidetsugu Yagi na Tohoku University v Japonsku. První koncept této antény byl anglicky publikován v roce 1928 a to studentem Hidetsugu Yagi. Proto je anténa obvykle označována jeho jménem, i když jeho podíl na práci byl menší. První použití se datuje do druhé světové války, kdy se anténa používala pro radary na letadlech.

Skládá se ze soustavy elementů - dipólů (viz obrázek 1.), které nejsou vodivě spojeny. Jedná se o lineární směrovou anténu s podélným vyzařováním a zpomalenou vlnou:

- Lineární (nebo drátové) antény mají podélný rozměr mnohem větší, než je rozměr příčný. Rozložení proudů (napětí) má tvar stojatých vln a proud je rovnoběžný s podélným rozměrem. Klasickým představitelem je dipólová anténa. Vyzařují lineárně polarizovanou vlnu.
- Směrové antény dosahují maxima směrovosti (tedy i zisku) v jednom směru záření. To je definováno parametrem směrovost antény D .
- Antény s podélným vyzařováním mají vhodně zvolené fázování proudů, tedy maximum vyzařování je podél směru.
- Antény se zpomalenou vlnou mají fázovou rychlost budící vlny menší, než rychlost světla, tím se dosáhne maximální směrovosti.



Obrázek 1. Yagi-Uda anténa s definicí rozměrů pro návrh. [1]

1.2 Popis funkce Yagi antény

Vezněme v potaz dva paralelně vázané dipóly. Jejich vztah můžeme vyjádřit společnou impedanční maticí:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde jsou diagonální členy matice rovny. Když budeme jeden element napájet a druhý zvolíme jako zátěž, můžeme vyřešit vstupní impedanci napájení antény:

$$Z_{IN} = \frac{V_1}{I_1} = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22} + Z_2} \quad (2)$$

kde Z_2 je zátěž na druhé anténě. Když bude druhá anténa nakrátko ($Z_2 = 0$), maximalizuje se tím indukovaný proud stojatých vln a eliminují se výkonové rozptylové ztráty:

$$Z_{IN} = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} \quad (3)$$

Společná impedance mezi paralelně vázanými dipóly (Z_{12}) se přiblíží vlastní impedanci (Z_{11}), pokud budeme tyto dipóly přibližovat. To způsobí, že se vstupní impedance bude blížit 0. Druhá rovnice z (1) pro anténu nakrátko souvisí s proudem v obou dipólech:

$$0 = Z_{12}I_1 + Z_{22}I_2 \text{ nebo-li } I_2 = -\frac{Z_{12}I_1}{Z_{22}} \quad (4)$$

Jelikož $Z_{12} \approx Z_{22}$, tak proud v dipólu nakrátko je opačný proudu v napájeném elementu a vyzařování z indukovaného proudu redukuje pole okolo dipólu. Proudem na parazitním elementu můžeme vyřešit rovnici pro vzdálené pole. Pokud jsou od sebe elementy vzdáleny o délku d a umístěny na společné z-tové ose, bude normalizovaná vyzařovací odezva:

$$E = 1 + I_R e^{j(kd \cos \theta + \delta)} \quad (5)$$

kde $I_R e^{j\alpha} = I_2 / I_1$ je proud parazitního elementu vztaženého k napájenému elementu. Pokud bereme v potaz výkonový vyzařovací rozdíl mezi zářením na $\theta = 0^\circ$ a $\theta = 180^\circ$, dostaneme:

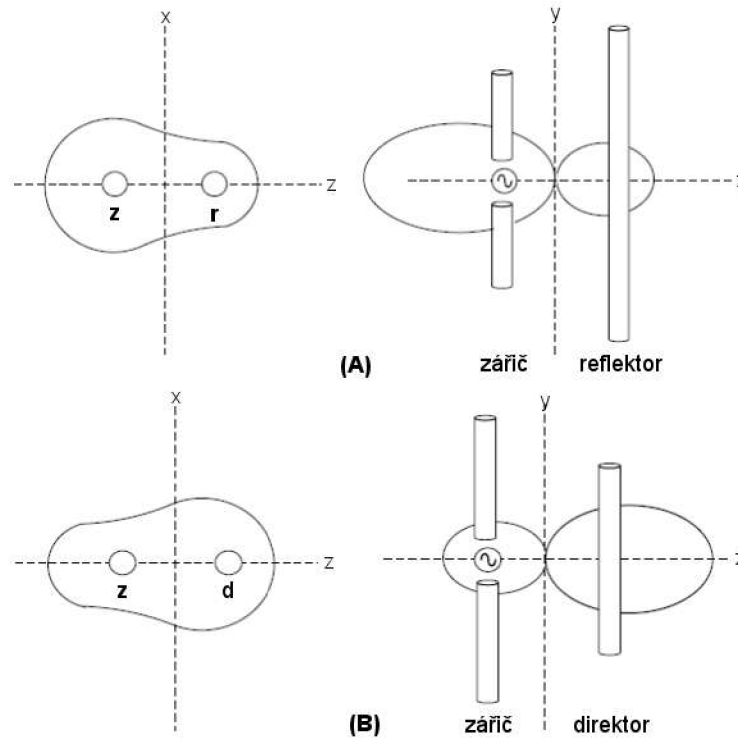
$$|\Delta E|^2 = -2I_R \sin \delta \sin kd \quad (6)$$

Nyní můžou vzniknout tři případy:

- Pro $\delta = 180^\circ$ je $\Delta E = 0$ a máme stejné vyzařovací úrovně v obou směrech s nulou na $\theta = 90^\circ$. Element je stejně dlouhý jako zářič.

- Pro $180^\circ < \delta < 360^\circ$ je $\Delta E > 0$. Parazitní element je direktor a vyzařování v jeho směru bude vyšší ($\theta = 0^\circ$) než při $\delta = 180^\circ$ (obrázek 2.B).
- Pro $0^\circ < \delta < 180^\circ$ je $\Delta E < 0$. Parazitní element je reflektor, protože vyzařování od něj ($\theta = 180^\circ$) je vyšší než při $\theta = 0^\circ$ (obrázek 2.A).

Sledujeme fázi vztažených proudů pro určení, zda je parazitní element direktor nebo reflektor. [2]



Obrázek 2. Rozložení vzdáleného pole pro (A) zářič-reflektor a (B) zářič-direktor [3]

Celkové pole vyzářené dvěma elementy, kde neuvažuje žádnou vazbu mezi nimi, je dáno součtem polí obou elementů. Taktéž je celkové pole soustavy je rovné poli jednoho elementu násobeného anténním faktorem. Pro soustavu dvou elementů o konstantní amplitudě je normalizovaný anténní faktor dán:

$$(AF)_n = \cos \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \delta) \right] \quad (7)$$

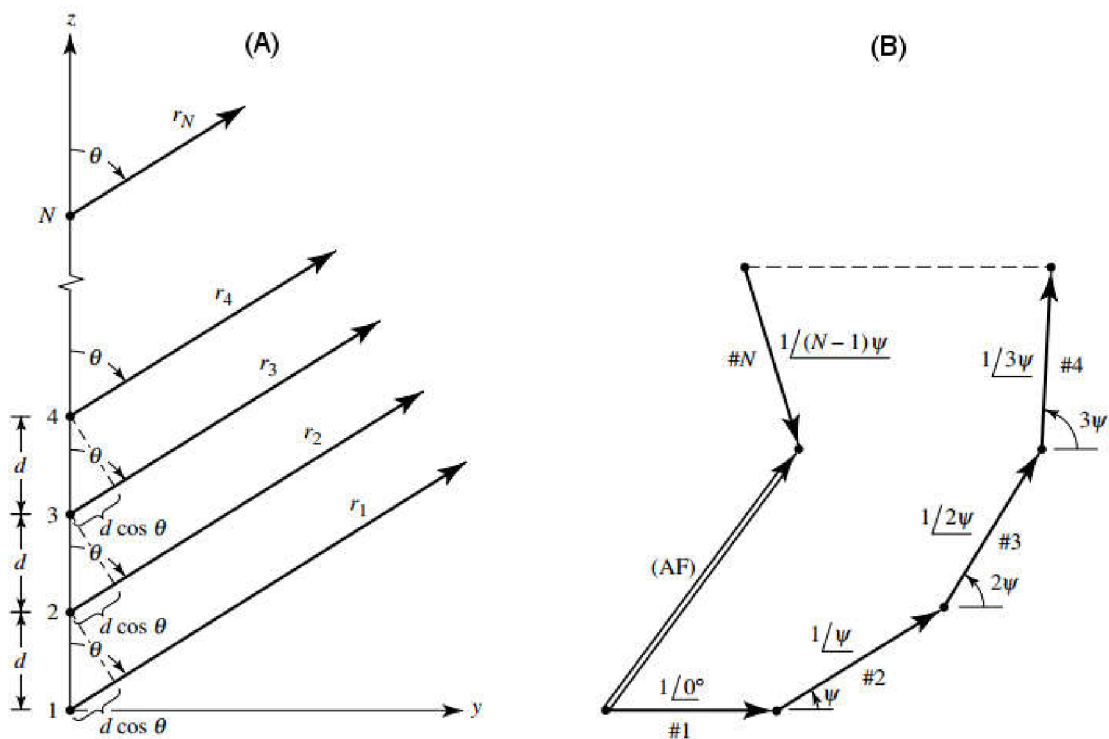
Anténní faktor je funkcí geometrie soustavy a fázi buzení. Může být kontrolován změnou vzdálenosti d či fázi δ mezi elementy. Pro N-elementární lineární soustavu antén se stejnou amplitudou a vzdáleností (obrázek 3.A) můžeme napsat výsledný anténní faktor:

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (8)$$

kde

$$\psi = kd \cos \theta + \delta \quad (9)$$

Jelikož je celkový anténní faktor sumou exponenciálních funkcí, může být reprezentována sumou N fázorů, každý svou amplitudou a změnou fáze ψ k předchozí hodnotě (obrázek 3.B). Největší vliv v této soustavě má tedy volba ψ . V soustavě s různými amplitudami a vzdálenostmi má vliv na anténní faktor jak amplituda, tak i změna fáze. [1]



Obrázek 3. (A) Geometrie vzdáleného pole a (B) fázorový diagram N-elementové soustavy [1]

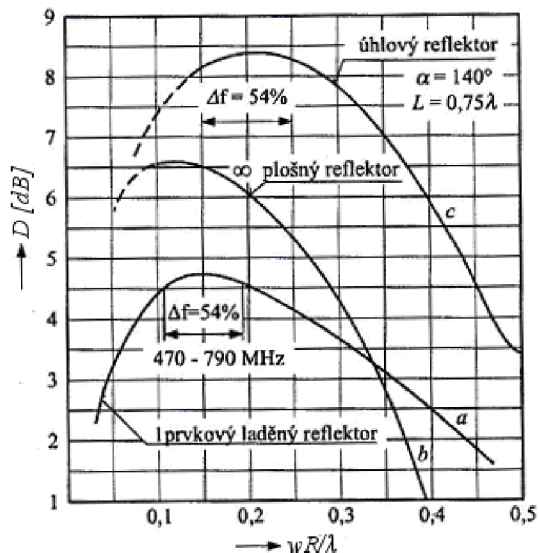
Můžeme tedy říct, že v aktivním (napájeném) zářiči se indukují proudy, který je vyzařován do pasivních (parazitních) direktorů a reflektoru vzájemnou vazbou. Fáze indukovaných proudů závisí na vzdálenosti elementů a jejich vlastní impedanci.

1.3 Konstrukce Yagi antény

Zářič tvoří dva stejně dlouhé a široké dipóly, jejichž společná délka LZ je rovna půlce vlny λ dané frekvence f . Impedance takového jednoduchého dipólu je $Z = 73 + j43 \Omega$. Tato délka ale není rezonanční, protože mechanická a elektrická délka dipólu není ve volném prostoru stejná. Tento rozdíl popisuje činitel zkrácení. Ten je závislý jak na délce, tak i na šířce dipólu. Nejčastěji jej můžeme odečíst z křivek, vyčíst z tabulek [4] nebo experimentálně odhadnout (mezi 1 až 10% délky dipólu). Impedance dipólu při rezonanci ztrácí svou imaginární složku. Ideální dipól má směrovost 2,15 dBi nebo-li 0 dB.

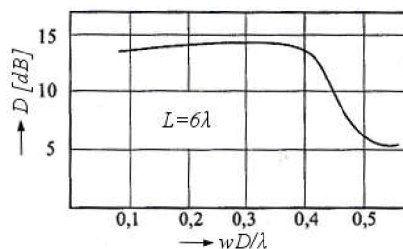
Reflektor přidaný k zářiči vytvoří základ soustavy Yagi antény. Jeho délka LR je větší než u zářiče ($0,5 \lambda$ a více), tím je dosaženo induktivní impedance. Při vhodné vzdálenosti od zářiče pak reflektor indukují proudy v proti-fázi a tím odráží vyzářenou elektromagnetickou energii zpět do směru zářiče. Vzdálenost reflektoru wR se volí $0,15 - 0,25 \lambda$. V praxi se nastavuje délka reflektoru tak, aby na nejvyšším kmitočtu pracovního pásma bylo dosaženo vyhovujícího činitele zpětného záření (FBR). Soustava zářič reflektor dosahuje ideální směrovosti 7,15 dBi [5]. Reflektor může být sestaven i z několika prvků, to ovlivní činitele

zpětného záření v širším kmitočtovém pásmu. Několika prvkový reflektor ztrácí charakter reflektoru laděného, přestává tedy být jeho délka významná. Prodloužení prvků reflektoru může ale zlepšit impedanční přizpůsobení antény. Širokopásmové antény bývají často vybaveny reflektorem úhlovým, který zlepšuje směrovost v dolní části pracovního pásma. Vliv vzdálenosti reflektoru wR na směrovost této soustavy je zobrazen na obrázku 4.



Obrázek 4. Vliv vzdálenosti reflektoru na směrovost [4]

Direktor je dalším elementem přidaným k anténě. Jeho délka LD je menší než u zářiče ($0,4 - 0,45 \lambda$), tím je dosaženo kapacitní impedance. Direktory ovlivňují horní část pracovního, způsobující zvýšení směrovosti antény ve směru maxima diagramu záření. Jejich fyzikální rozměry, počet a geometrické uspořádání má rozhodující vliv na fázovou rychlost elektromagnetické vlny šířící se podél soustavy direktorů. Čím je fázová rychlost větší, tím je větší i směrovost. Fázová rychlost se zvětšuje se zkracováním délky direktorů, ale zmenšuje s rostoucí šířkou (případně průměrem) elementů. Dále se zvětšuje s rostoucí vzdáleností wD mezi direktory a zmenšuje se s zvyšujícím kmitočtem. U širokopásmových antén se většinou volí vzdálenost wD mezi direktory $0,3 - 0,4 \lambda$. U úzkopásmových antén s malým počtem direktorů je dobré zmenšit vzdálenost mezi zářičem a prvním direktorem. Pokud jsou délky, šířky a vzdálenosti direktorů konstantní, je konstantní i fázová rychlost povrchové vlny a diagram záření antény má velké postranní laloky v rovině E i H. Úroveň postranních laloků můžeme snížit postupným zkracováním direktorů směrem od zářiče nebo postupným zvětšováním jejich vzdáleností, případně jejich kombinací. Šířka hlavního laloku diagramu se pak rozšíří, směrovost zůstane téměř stejná. Uvedené rozměrové parametry se nejlépe zjišťují experimentálně. U dlouhých antén s konstantní délkou direktorů lze zkrácením posledního direktoru (o 2 - 3 %) zlepšit činitel zpětného záření o několik dB. Soustava zářič direktor dosahuje ideální směrovosti 7,15 dBi [5]. Přidáním dalších direktorů zvyšujeme směrovost, ale směrovost dalších přidaných direktorů se postupně zmenšuje. Vliv vzdálenosti direktorů wD na směrovost této soustavy je zobrazen na obrázku 5. [4]



Obrázek 5. Vliv vzdálenosti direktorů na směrovost [4]

Impedanční přizpůsobení antény se upravuje až po nastavení směrových vlastností a vychází se ze svorkové impedance na zářiči v pracovním kmitočtovém pásmu. Změny v obvodu zářiče mají minimální vliv na tvar diagramu záření. Jakákoliv změna délek, šířek či vzdáleností pasivních prvků má vliv na diagram záření. Impedanci zářiče lze ovlivnit tzv. kompenzačním direktorem, který je umístěn nejbližší zářiče ve vzdálenosti $0,03 - 0,1 \lambda$. Rozměry této dvojice lze ovlivnit impedanci zářiče bez patrného vlivu na již nastavené směrové vlastnosti antény. Vlastní impedance zářiče je ovlivněna dvěma nejbližšími prvky: reflektorem a kompenzačním direktorem. Kvalita přizpůsobení je dána poměrem stojatých vln.

1.4 Způsoby návrhu Yagi antény

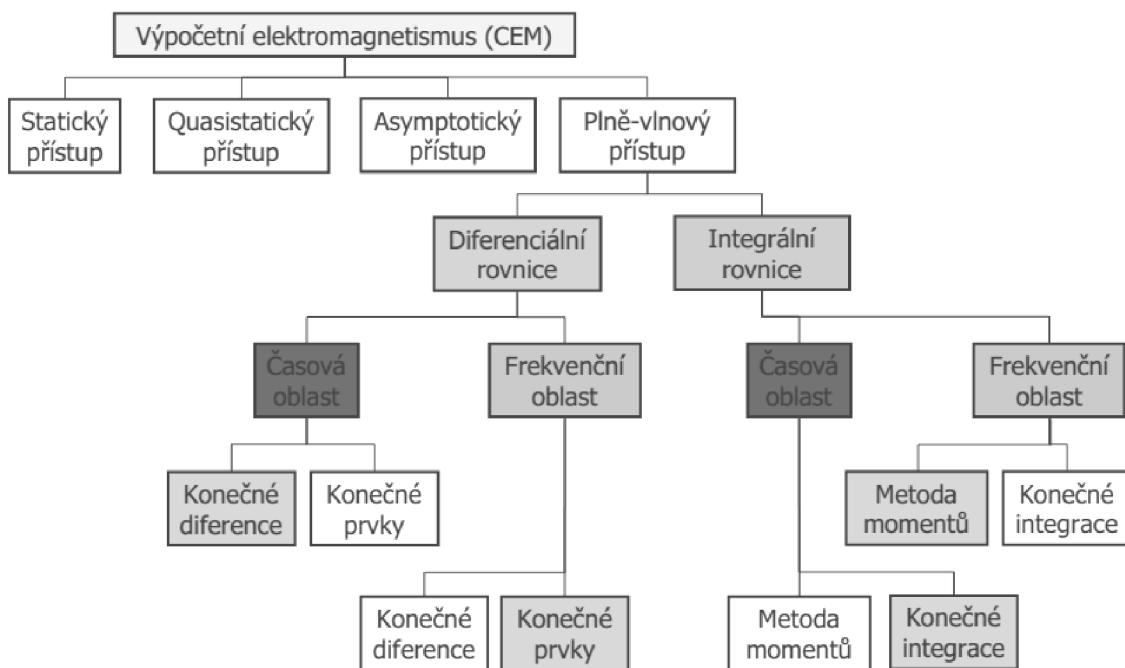
Návrh Yagi antény je komplikovaný. Od dob zveřejnění první anglické verze studie této antény bylo vydáno nepřeberné množství studií, analýz a zdokonalení návrhu antény. Drátová verze byla navržena v roce 1926 [6]. První návrh planární antény byl zveřejněn v roce 1989 [7]. Návrh tzv. Kvazi-Yagi antény v planárním provedení byl zveřejněn v roce 1998 [8], návrh umožnil zvětšení šířky pracovního pásma. Aktuálně lze postupovat 3 způsoby návrhu antény: tabulkou, vzorci a kalkulátorem. Tyto metody jsou popsány dále. Všechny návrhy společně potřebují znát požadované parametry antény, a to šířku pracovního pásma (střední frekvenci) a zisk (směrovost) antény - ten zároveň ovlivňuje i velikost antény. Návrh planární antény je podobný klasické drátové anténě, jen je nutno brát v potaz, že anténa je vytvořena na substrátu a elektromagnetická vlna se zde šíří jinou fázovou rychlostí. Dnešní doba umožňuje analyzovat navrženou anténu v CEM simulátorech a ověřit si tak její vlastnosti před výrobou, to snižuje jak náklady tak i čas při návrhu nové antény.

1.4.1 Modelování antén

Při modelování antén vycházíme ze vztahů maxwellových rovnic. Ty jsou základními rovnicemi makroskopické elektrodynamiky, které popisují elektromagnetické pole v každém bodě prostoru. Rovnice jsou vyjádřeny jak v diferenciálním tak i v integrálním tvaru. Pro získání řešení je nutné definovat okrajové podmínky a spojitost dvou prostředí. Rovnice lze řešit buď analyticky (jednoduché struktury) nebo numericky (jakékoliv 3D struktury). Podrobně jsou tyto metody rozděleny na obrázku 6.

- **Diferenciální rovnice:** Pro nehomogenní struktury, velký počet neznámých, vhodné pro uzavřené struktury.
- **Integrální rovnice:** Pro homogenní struktury, nízký počet neznámých, vhodné pro otevřené i uzavřené struktury.

- **Časová oblast:** Znázornění šíření vln, modelování přechodových dějů, analýza struktury v širokém pásmu kmitočtů, Fourierova transformace pro získání frekvenčních dat, vhodné pro širokopásmové struktury s nízkým činitelem jakosti.
- **Frekvenční oblast:** Řešení v harmonicky ustáleném stavu, běžně používané parametry jsou definované ve frekvenční oblasti (např. s parametry), popis chování disperzních materiálů, inverzní Fourierova transformace pro získání časových dat, vhodné pro úzkopásmové struktury s vysokým činitelem jakosti.



Obrázek 6. Strom výpočetních metod CEM

Nejznámější aplikace pro 3D modelování antén jsou ANSYS HFSS®, CST MICROWAVE STUDIO® nebo volně šiřitelný 4nec2.

1.4.2 Návrh tabulkou

Návrh tabulkou je z uvedených způsobů nejrychlejší a nejjednodušší. Tyto tabulky jsou tvořeny na základě měření reálných konstrukcí nebo analýz Yagi antén. Lze je najít např. v [1] [4]. Obecně si v tabulce vyhledáme požadovaný parametr (zisk/směrovost, činitel stojatých vln, celkovou délku nebo šířku pracovního pásma) a dohledáme si ve sloupci počet a rozměry jednotlivých elementů antény. Tyto tabulky jsou tvořeny hlavně pro návrhy drátěných Yagi antén. Rozměry jsou pak vztaženy k délce vlny λ v pracovním pásmu antény. Příklad části takové tabulky je zobrazen na obrázku 7.

$W/\lambda=0.0085$ $wR=0.2\lambda$		Délka antény (λ)
		0.4
Délka reflektoru LR/λ		0.482
Délka direktorů (λ)	LD1	0.442
Vzdál. mezi direktory (wD/λ)		0.20
Směrovost vztažená k půlvlnnému dipolu (dB)		7.1

Obrázek 7. Tabulka pro návrhy Yagi antén

1.4.3 Návrh vzorců

Druhý způsob uvedený v [9] je návrh pomocí vzorců rozměrů. Autor rozepisuje vzorce pro návrhy 2, 3 či více elementových Yagi antén. Pro ukázkou jsou zobrazeny vzorce pro výpočet 6 elementové antény. Zde se pro výpočet používá střední frekvence pracovního pásma antény v MHz.

$$\text{Délka direktoru:} \quad LD = 134,39 / f \quad (10)$$

$$\text{Délka zářiče:} \quad LZ = 144,05 / f \quad (11)$$

$$\text{Délka reflektoru:} \quad LR = 148,56 / f \quad (12)$$

$$\text{Vzdálenosti mezi elementy:} \quad wR = wD = 44,8 / f \quad (13)$$

1.4.4 Návrh kalkulátorem

Dalším způsobem je návrh pomocí dostupných kalkulátorů. Jedná se buď o webové aplikace [10] nebo PC programy (např. Yagi Calculator od autora John Drew). Většina pracuje na bázi skriptu DL6WU od autora Guenter Hoch. První publikace této práce byla zveřejněna v březnu 1982 v German Radio Magazine VHF Communications [11]. Návrh je určen pro dlouhé drátové antény.

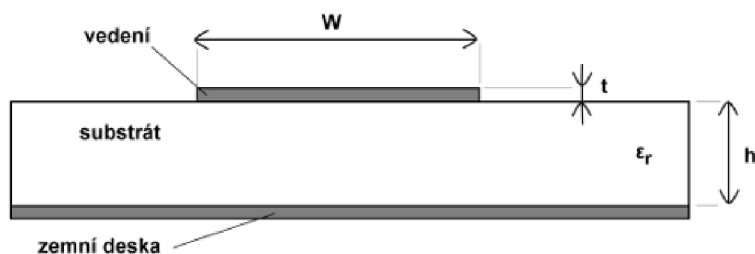
1.5 Planární antény

Je tvořena kovovým vedením, upevněným na dielektrické desce. Tato technologie byla původně určena pro radarové snímání, ale díky širokému pracovnímu pásmu (minimum je 20% od střední frekvence) se začala používat pro datové přenosy. Mezi další výhody patří malé rozměry, nízký profil, snadná integrace do mikrovláknových obvodů a nízká cena sériové výroby.

Mezi nevýhody patří úzká impedanční šířka pásma (impedanční přizpůsobení), nízká polarizační čistota a vyzářovací účinnost. Nejčastější typy planárních antén jsou: flíčkové, mikropáskové (MS) a štěrbinové. Šířka pásma závisí na tvaru zářiče, substrátu, napájení, vybudzení násobných rezonancí a impedančním přizpůsobení. Substrát se používá nejčastěji s relativní permitivitou $2,2 \leq \epsilon_R \leq 16$ a ztrátovým činitelem $0,0001 \leq tg\delta \leq 0,06$. Napájecí struktura ovlivňuje impedanční přizpůsobení, provozní módy, parazitní vyzářování, šíření povrchových vln a vyzářený výkon. Pro velkou šířku pásma se používá koplanární vedení (CPS). Zvýšená šířky pásma je podmíněno snížením činitele jakosti antény. Tlustý substrát s nízkou relativní permitivitou má větší šířku pásma. Vstupní impedance antény je závislá na frekvenci – to je řešeno přizpůsobovacím obvodem, např. čtvrtlenným transformátorem, pahylem nebo tvarem zářiče. Dobře přizpůsobená anténa ve svém pracovním pásmu by měla splňovat tyto požadavky (měli by se měnit jen minimálně): poměr stojatých vln $SWR < 2$ a $s_{11} < -10$ dB. [4][12].

1.5.1 Mikropásek

Řez nesymetrickým mikropáskem s typickým značením rozměrů je zobrazen na obrázku 8. Elektromagnetické pole je rozloženo ve dvou prostředích, v substrátu a ve vzduchu. Jedná se tedy o nehomogenní strukturu, kde se nešíří ryzí TEM vlny (ty mají pouze příčné komponenty). Vlny v mikropásku nemají nulovou komponentu podélného pole a jejich rychlost šíření závisí jak na vlastnostech materiálu, tak i na jejich fyzických rozměrech. I když podélné komponenty dominantního vidu jsou mnohem menší, než příčné, nelze je zanedbat. Lze modifikovat TEM teorii přenosu pro mikropásek, tato aproximace se nazývá kvazi-TEM.



Obrázek 8. Mikropásek s rozměry

Charakter přenosu mikropásku kvazi-TEM vlnou je popsán dvěma parametry: charakteristickou impedancí Z_C a efektivní permitivitou ϵ_{eff} . Pro malé tloušťky vedení ($t \rightarrow 0$) lze použít s přesností 99,8% tyto vztahy:

$$\text{Efektivní permitivita: } \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{W/h} \right)^{-a} \quad (14)$$

kde:

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left[\frac{(W/h)^4 + \left(\frac{W/h}{52}\right)^2}{(W/h)^4 + 0,432} \right] + \frac{1}{18,7} \ln \left[1 + \left(\frac{W/h}{18,1}\right)^3 \right] \quad (15)$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0,9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0,053} \quad (16)$$

$$\text{Charakteristická impedace: } Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{F}{W/h} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{W/h} \right)^2} \right] \quad (17)$$

kde:

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30,666}{W/h} \right)^{0,7528} \right] \quad (18)$$

$$\eta = 120\pi \quad (19)$$

Přenosové parametry tohoto vedení jsou:

$$\text{Elektrická délka vedení: } \theta = \beta \cdot L \quad (20)$$

$$\text{Konstanta šíření: } \beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (21)$$

$$\text{Vlnová délka kvazi-TEM vlny: } \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (22)$$

$$\text{Fázová rychlost: } v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (23)$$

kde $\lambda_0 = \lambda$ je délka vlny ve volném prostoru a c je rychlost světla. Skrze disperzi na mikropásku je ale jak fázová rychlost, tak i charakteristická impedance závislá na frekvenci.

Ztráty v jednom mikropáskou jsou dané ztrátou ve vedení, ztrátou v dielektriku a ztrátou vyzařováním. Magnetické ztráty hrají roli pouze při použití magnetických substrátů.

Povrchová vlna je způsob šíření vlny na povrchu vzduch-dielektrikum pro dielektrický substrát na zemní desce a to i bez přítomnosti horního vedení. Dolní vid TM nemá žádnou mezní frekvenci a je značen jako TM_0 . Mezní frekvence pro vidy vyššího řádu TM_N a TE_N jsou dány:

$$f_c = \frac{N \cdot c}{4h\sqrt{\varepsilon_r - 1}} \quad (24)$$

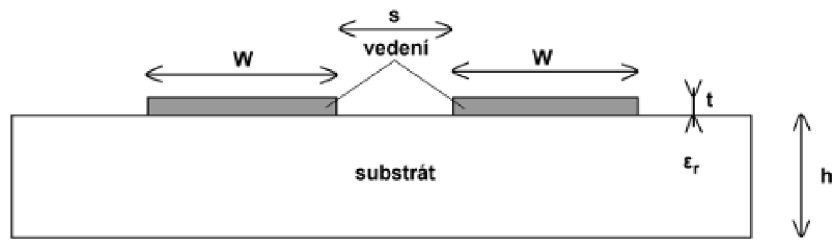
kde $N = 1, 3, 5 \dots$ pro TE_N a $N = 0, 2, 4 \dots$ pro TM_N . Vid TM_0 bude vždy rozmítán na otevřených koncích mikropásků. Distribuce pole vidu TE_1 je taková, že se může šířit pod vedení a může být vždy rozmítán nad mezní frekvenci. První vyšší vid je dán frekvencí:

$$f_c = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} (2W + 0,8h)} \quad (25)$$

Ten je zároveň považován za horní mez pracovní frekvence. [13][14]

1.5.2 Vázané mikropáskové vedení

To se nejčastěji používá pro návrhy filtrů. Pro nás účel se zaměříme pouze na koplanární mikropásky bez zemní desky, viz obrázek 9.



Obrázek 9. Koplanární mikropásky s rozměry

Charakteristická impedance tohoto vedení je dána:

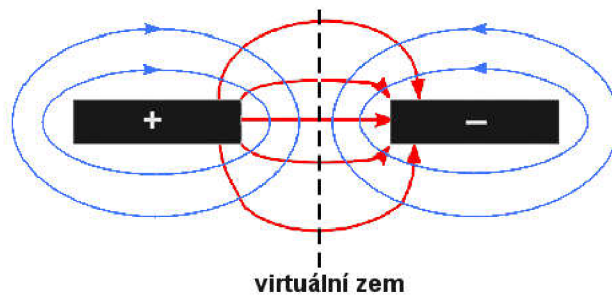
$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{K(k_0)}{K(k_0')} \quad (26)$$

kde K značí kompletní eliptický integrál prvního druhu a

$$k_0 = \frac{s/2}{W + s/2} \quad (27)$$

$$k_0' = \sqrt{1 - k_0^2} \quad (28)$$

Tato struktura podporuje dva kvazi-TEM vidy šíření: sudé (even) a liché (odd). Opět pro účel této antény se zaměříme a lichý vid. Ten je buzen, když pásy prochází signál stejné amplitudy ale opačné fáze. Elektromagnetické pole je zobrazeno na obrázku 10. Červeně jsou zobrazeny siločáry elektrického pole, modře magnetického pole. Impedance tohoto vedení pak může být až dvakrát menší, než je charakteristická impedance. [13][14]



Obrázek 10. Elektromagnetické pole lichého buzení

2 NÁVRH PLANÁRNÍ YAGI ANTÉNY

Pro tuto anténu byl zadán substrát IsoClad 933. Jeho parametry [15] jsou vypsány v tabulce 1. Pro velkou šířku pásma jsou požadovány substráty s nízkou relativní permitivitou nebo velkou výškou. Tím se zmenší nežádoucí odrazy na jejich rozhraní.

Tabulka 1. Parametry substrátu IsoClad 933.

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka	Hodnoty pro
Výška substrátu	h	1,524	mm	
Relativní permitivita	ϵ_r	2,33	-	10 GHz
Dielektrické ztráty	$tg\delta$	0,0016	-	10 GHz

2.1 Volba šířky pracovního pásma antény

Prvním úkolem návrhu je volba šířky pracovního pásma. Anténa má být použita pro 5 GHz Wi-Fi, tedy standardy IEEE 802.11 a, n, ac (pro použití v Evropě). Norma ETSI EN 301 893 určila pro tyto aplikace pásma:

- 5150 – 5350 MHz – nízké sub-pásmo
- 5470 – 5725 MHz – vysoké sub-pásmo [16]

Tyto dvě pásma ještě můžeme rozdělit dle použití, viz tabulka 2.

Tabulka 2. Rozdělení pásma 5 GHz

Frekvence [MHz]	Použití	
5150 - 5250	Uvnitř budovy	
5250 - 5330	Uvnitř budovy	DFS* TPC'
5330 - 5710		
5735 - 5725	SRD°	

* zařízení používající funkci *Dynamic Frequency Selection*

' zařízení používající funkci *Transmit Power Control*

° *Short Range Device (např. pro sledování pozice, transportní telemetrie apod.)*

Dále je proveden rozbor pracovní šířky pásma vyráběných antén pro tuto aplikaci, nejen Yagi antén. Dohledání technických parametrů antén je obtížné, většinou se uvádí popis, že jsou optimalizované pro tento standart. V tabulce 3. jsou vypsány některé nalezené antény s technickými parametry, hodnoty ale nelze ověřit, výrobci tyto údaje neudávají.

Tabulka 3. Pracovní pásma antén pro 5 GHz

Název	Typ	Technologie	Pracovní pásmo
Yagi anténa ASD 5GHz s krytem 17dBi NF	Yagi	-	5,10 – 5,90 GHz
Antenna 18dBi 5.8GHz 802.11N/A Yagi	Yagi	-	5,70 – 5,80 GHz
HyperLink HG5817Y-NF-1	Yagi	-	5,72 – 5,82 GHz
Yagi Antenna DB541 V-POL TY-2458-9-9	Yagi	-	4,90 – 5,85 GHz
TP-link CPE520	směrová	MIMO	5,15 – 5,85 GHz
airGrid M5 HP	horn	-	5,17 – 5,87 GHz

Posledním kritériem jsou i konstrukční možnosti samotné antény. Ta se nejčastěji používá v pásmech 3 – 3000 MHz pro příjem televizního signálu [1]. Nejstarší typy a původní návrh dosahoval šířky pásma okolo 2% (desítky MHz), moderní už dosahují i 15% (stovky MHz). S uspokojivými výsledky lze dosáhnout i 30% [17]. Při použití vhodně zvoleného napájení tedy nebude obtížné dosáhnout celého pracovního pásma: 5150 – 5725 MHz ($B = 575$ MHz) se střední frekvencí f_c na 5437,5 MHz. Výběr byl konzultován a potvrzen vedoucím práce.

2.2 Vyšetřování zisku planární antény

Druhým úkolem je volba zisku (směrnosti) antény. Směrnost udává poměr intenzity vyzařování U v daném směru k intenzitě vyzařování referenční antény U_0 :

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (29)$$

Pro planární antény je provedena aproximace maxima směrnosti:

$$D_m \approx \frac{32400}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (30)$$

kde Θ_{1d} a Θ_{2d} značí šířky svazků na polovinu výkonu v na sebe kolmých rovinách.

Nejčastěji se vyjadřuje v decibelech:

$$D_{dB} = 10 \log D \quad (31)$$

Celková účinnost planární antény je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{ref} + P_{diel} + P_{met} + P_{sw}} \quad (32)$$

kde P_{rad} je vyzářený výkon, P_{ref} je výkon ztracený přizpůsobením antény, P_{diel} je výkon ztracený v dielektriku, P_{met} je výkon ztracený v kovovém vedení a P_{sw} je výkon ztracený v povrchové vlně.

Relativní zisk antény je definován jako poměr výkonu ku bezztrátové referenční anténě a lze jej vyjádřit pomocí směrnosti a účinnosti:

$$G = \eta \cdot D \quad (33)$$

Nejčastěji se vyjadřuje v decibelech, podobně jako směrnost. V závislosti na referenčním zářiči rozlišujeme izotropní zisk v dBi a zisk vztažený k půlvlnnému dipólu v dBd nebo dB.

Úkolem je definovat zisk planární antény v závislosti na počtu elementů. Šířka elementů (mikropásků) W je doporučena $0,05\lambda_0$ nebo méně [18]. Dále je potřeba zjistit elektrickou rezonanční délku zářiče, jak je popsána v kapitole 1.3 pro zadaný substrát a střední pracovní frekvenci.

$$LZ = \frac{c}{2f_c} = 27,59 \text{ mm} \quad (34)$$

Délka vlny ve volném prostoru středu pracovní frekvence je 55,17 mm. Zářič je následně vyladěn do rezonance, jeho nový rozměr je 22,63 mm. Pokud by byl planární zářič umístěn ve volném prostoru, jeho rezonanční délka by byla 25,24 mm. Délka napájecí mezery s je zvolena 0,5 mm. Její vliv bude popsán v následující kapitole, nyní má zanedbatelný vliv. Nový rozměr délky LZ je tedy roven $0,41\lambda_0$.

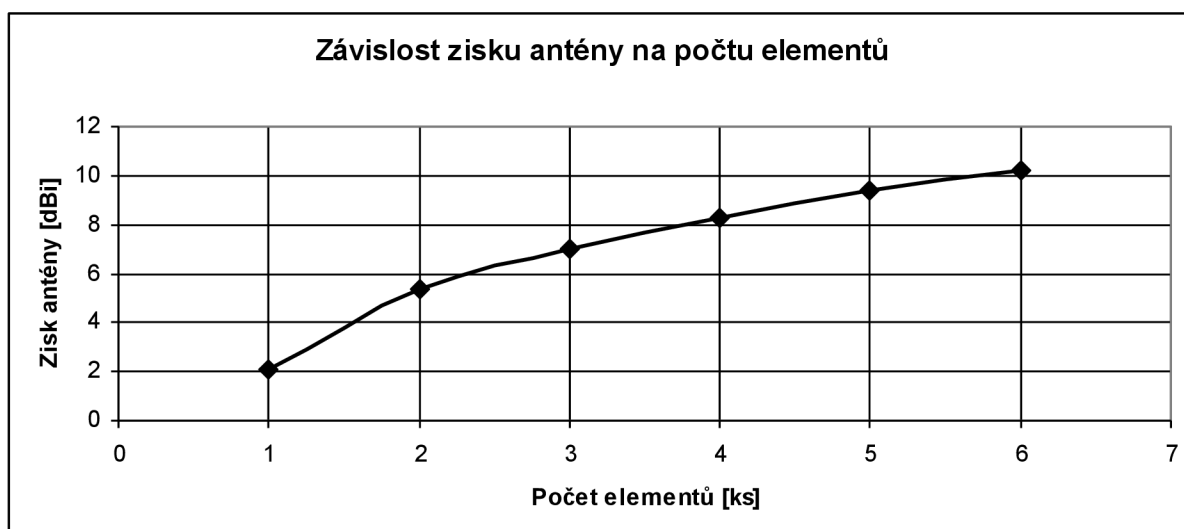
Zářič byl analyzován v aplikaci CST MICROWAVE STUDIO (dále jen CST). Jedná se o německý produkt firmy Computed Simulation Technology. Je to 3D CEM simulátor vysokofrekvenčních komponent. Řeší struktury jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. Používá „perfektní aproximaci rozmezí materiálů“ či metodu konečných integrací v časové oblasti. Další specifikace jsou vypsány na webových stránkách výrobce. Modelování můžeme rozdělit do několika kroků:

1. Kreslení struktury a definice materiálů.
2. Definice okolí a okrajových podmínek.
3. Definice napájení (portů).
4. Definice buzení nebo frekvenčního rozsahu analýzy.
5. Generování sítě.
6. Analýza.
7. Vyhodnocení výsledků.

Dále jsou přidávány parazitní elementy, reflektor a direktory. Vzdálenosti mezi direktory wD a délky direktorů LD jsou pro zjednodušení voleny shodně. Analýza je prováděna se ztrátovými materiály. Výsledky tohoto vyšetřování jsou zobrazeny v tabulce 4 a zobrazeny na obrázku 11. Zobrazená hodnota zisku je vždy nejmenší z celého pracovního pásma dané konfigurace antény. Pro analýzu je zvoleno napájení diskretním portem. Každá anténa byla přizpůsobena a činitel odrazu s_{11} v pracovním pásmu nepřesáhnul požadovanou hodnotu – 10 dB. Dle předpokladů měl každý nově přidáný direktor menší zisk.

Tabulka 4. Vliv celkového počtu elementů na zisk antény

Celkový počet elementů	Min zisk antény	Zisk přidaného direktoru
<i>ks</i>	<i>[dBi]</i>	<i>[dB]</i>
1	2,11	
2	5,37	
3	7,00	1,63
4	8,27	1,27
5	9,41	1,14
6	10,20	0,79



Obrázek 11. Grafické znázornění vlivu počtu elementů na zisk antény

Tyto výsledky jsou konzultovány s vedoucím práce a je rozhodnuto, že minimální zisk antény v celém pracovním pásmu bude 10 dBi. Experimentálně jsou upravovány antény navržené pro vyšetření zisku. Cílem je zjistit, která konfigurace je schopna dosáhnout požadovaného zisku a šířky pracovního pásma:

- Anténu se 3 direktory nelze navrhnout s minimálním ziskem 10 dBi, šířka pásma je nevyhovující.
- Anténu se 4 direktory lze navrhnout s minimálním ziskem 10 dBi, šířka pásma je ale nevyhovující.
- Anténu s 5 direktory lze navrhnout s minimálním ziskem 10 dBi, šířka pásma vyhovuje.

2.3 Planární Yagi anténa

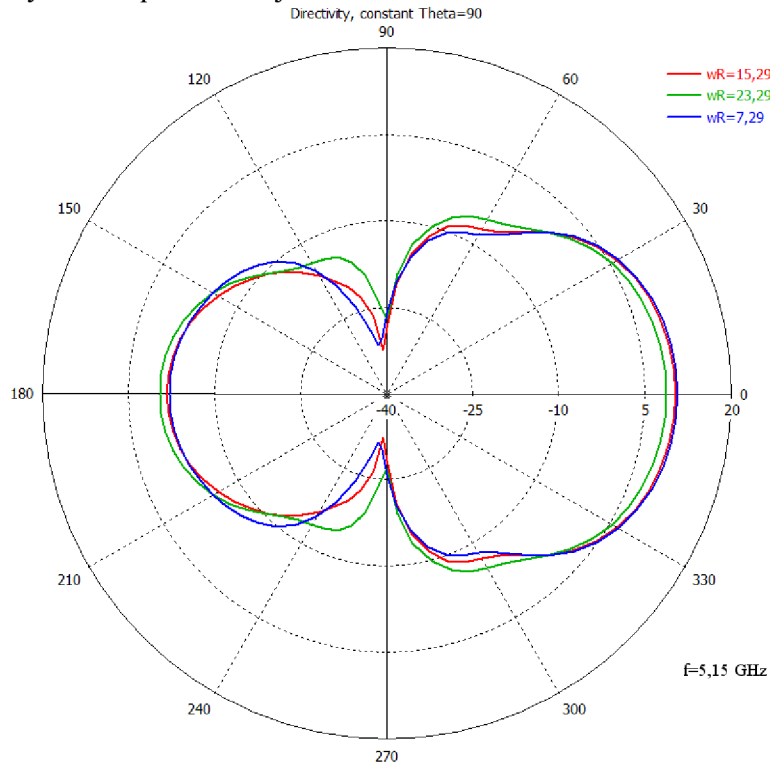
Rozměry planární Yagi antény se mírně liší od drátové verze. V předchozí kapitole byla nalezena délka zářiče LZ pro použitý substrát na střední pracovní frekvenci pásma. Autoři v [19] uvádí výchozí rozměry elementů planární Yagi antény při známé délce zářiče. Délka reflektoru by měla být v rozmezí 1,1 – 1,3 délky LZ. Délka direktorů v rozmezí 0,8 – 0,95. Vzdálenost reflektoru wR od zářiče $0,25\lambda_0$ a vzdálenost direktorů wD v rozmezí $0,3 - 0,4\lambda_0$. S ohledem na výsledky z předchozí kapitole můžeme určit počáteční rozměry antén. Ty jsou vypsané v tabulce 5. Rozměry jsou okótovány na obrázku 1 v první kapitole.

Tabulka 5. Počáteční rozměry planární antény

Element		LZ	LR	LD	W	wR	wD
Rozměr	vůči λ	0,40	0,44	0,32	0,04	0,25	0,30
Hodnota	[mm]	22,07	24,27	17,65	2,2	13,79	16,55

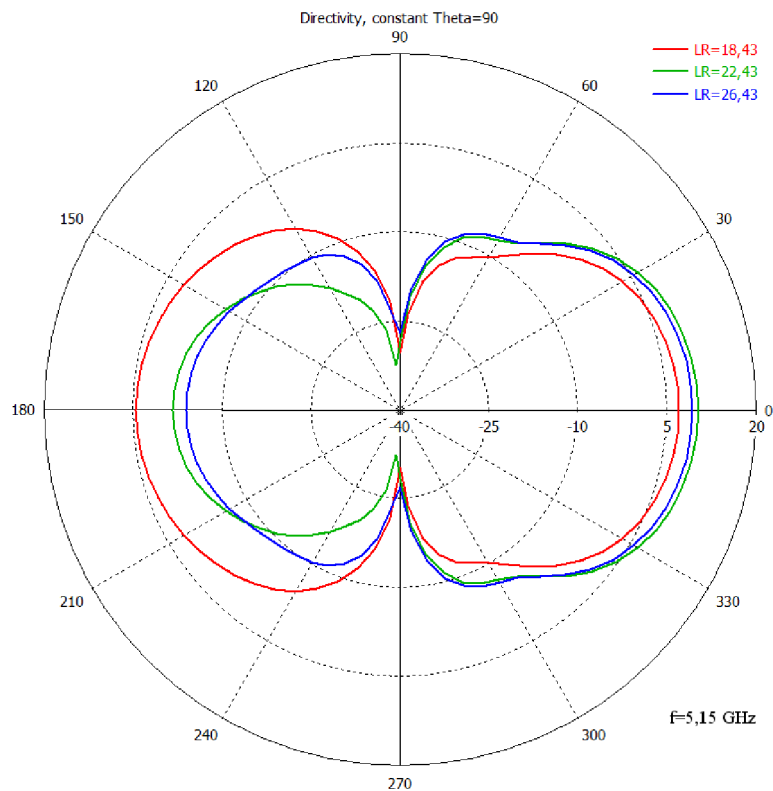
Anténa je vymodelována v CST, podrobena analýze v časové oblasti. Počáteční rozměry je nutné optimalizovat, protože pracovní frekvence a směrovost antény nevyhovují požadavkům. Vliv rozměrů na ladění směrových vlastností antény jsou popsány níže, pro napájení antény je použit diskretní port. Délka všech elementů určuje pracovní pásmo antény. Prodloužením se pracovní pásmo posouvá ve frekvenci dolů. Vzdálenost reflektoru wR není

pro směrové vlastnosti kritická, ale při překročení vzdálenosti $0,4\lambda_0$ se směrovost v maximum snižuje. Vliv změny tohoto parametru je zobrazen na obrázku 12.



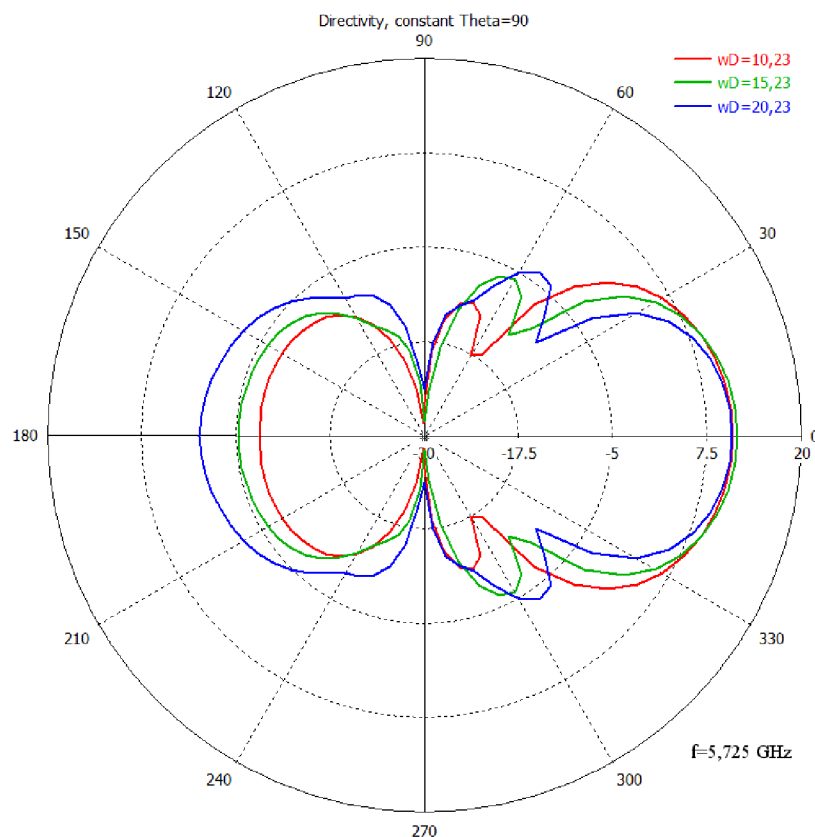
Obrázek 12. Vliv změny wR na směrovou char. roviny H

Změny reflektoru ovlivňují hlavně dolní pracovní pásmo antény. Délka reflektoru LR má již výrazný vliv na směrové vlastnosti antény, hlavně zadní lalok antény, viz obrázek 13.



Obrázek 13. Vliv změny LR na směrovou char. roviny H

Změny v soustavě direktorů ovlivňují směrové vlastnosti antény v horní části pracovní frekvence. Větší vzdálenost wD snižuje šířku hlavního laloku ale zvyšuje úroveň postranních laloků, to je zobrazeno na obrázku 14. Při překročení hodnoty $0,35\lambda_0$ se směrovost v maximu snižuje. Délka direktorů LD má vliv na postranní laloky a hlavní lalok, ale i výrazní vliv na směrovost v maximu, kdy po překročení mezní hodnoty $0,31\lambda_0$ se výrazně zmenšuje směrovost, viz obrázek 15. Zde je zobrazen i vliv stejné a různé délky direktorů, při stejné délce (červeně) je úroveň postranních laloků vysoká, vliv na maximální směrovost je minimální. Postupným zkrácením direktorů o 4% ve směru od zářiče (modře) snížíme úroveň těchto laloků bez patrné ztráty maxima směrovosti. Parametr p zde vyjadřuje procentuální změnu délky všech direktorů od optimální hodnoty.

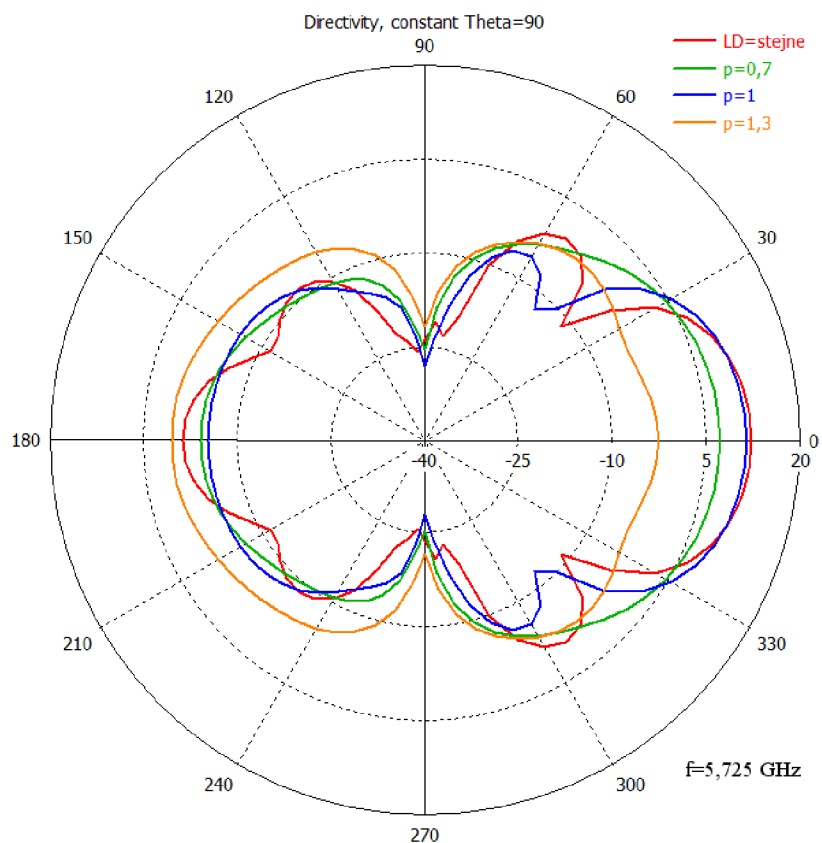


Obrázek 14. Vliv změny wD na směrovou char. roviny H

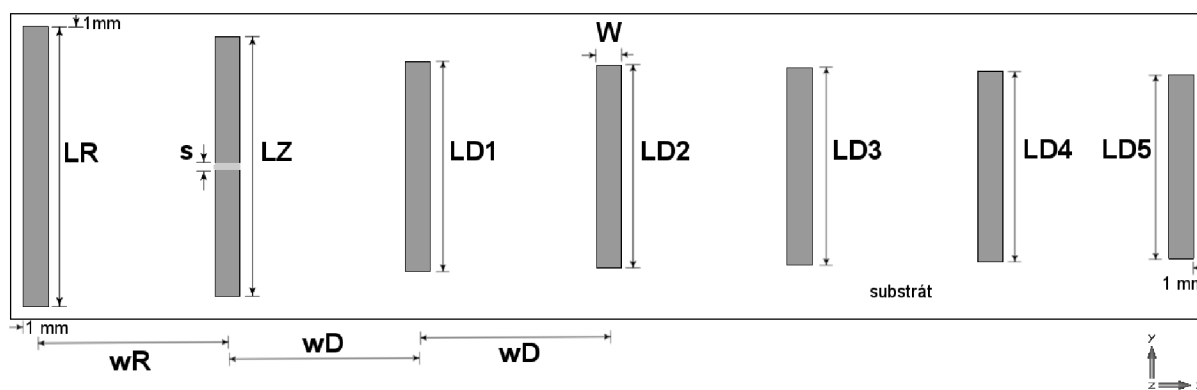
Optimalizované rozměry jsou vypsány v tabulce 6. Výsledný návrh s rozměry je zobrazen na obrázku 16. Minimální zisk antény v maximu směrovosti je 9,9 dBi. Šířka pásma je pozorovatelné v obrázku 17. na činiteli odrazu, ten nepřesáhne hodnotu -12 dB. Směrové charakteristiky pro střední frekvenci a E i H rovinou jsou zobrazeny na obrázcích 18. a 19. Anténa tedy splňuje požadavky.

Tabulka 6. Optimální rozměry planární antény

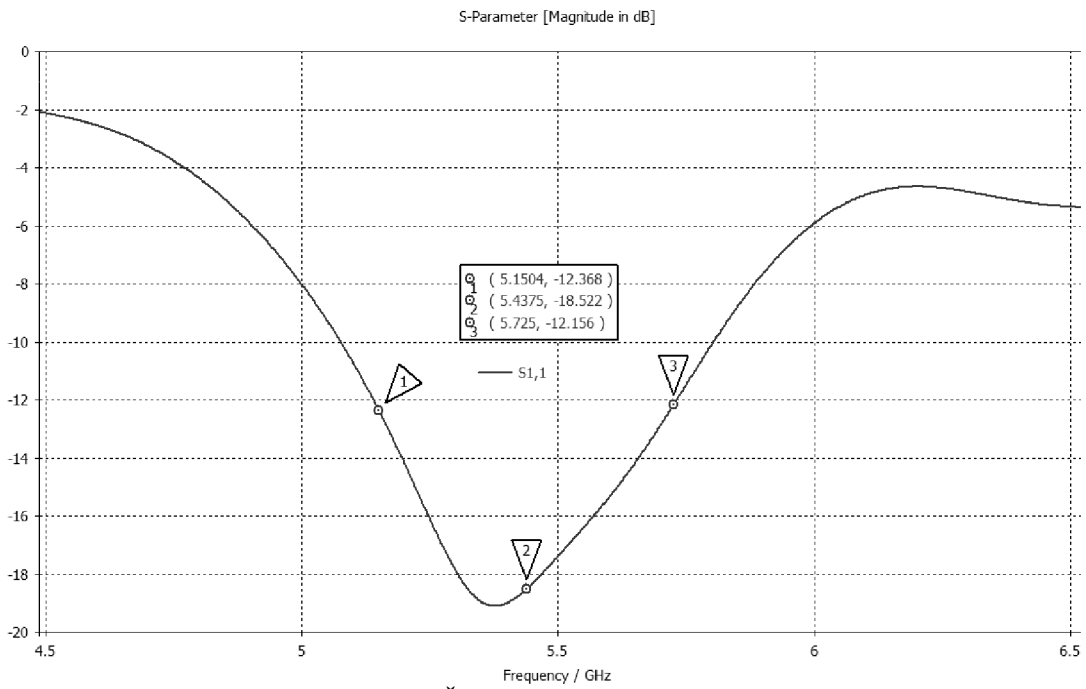
Element	LZ	LR	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5	wR	wD
Velikost [mm]	20,7	20,4	16,8	16,2	15,7	15,1	14,5	15,2	15,2



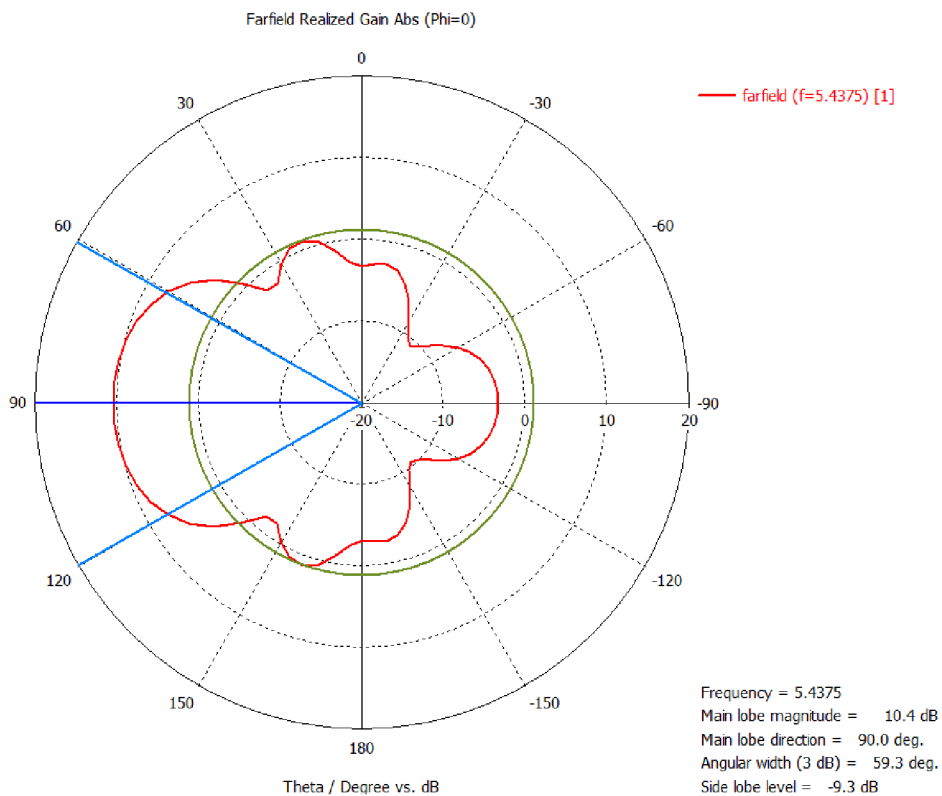
Obrázek 15. Vliv změny LD na směrovou char. roviny H



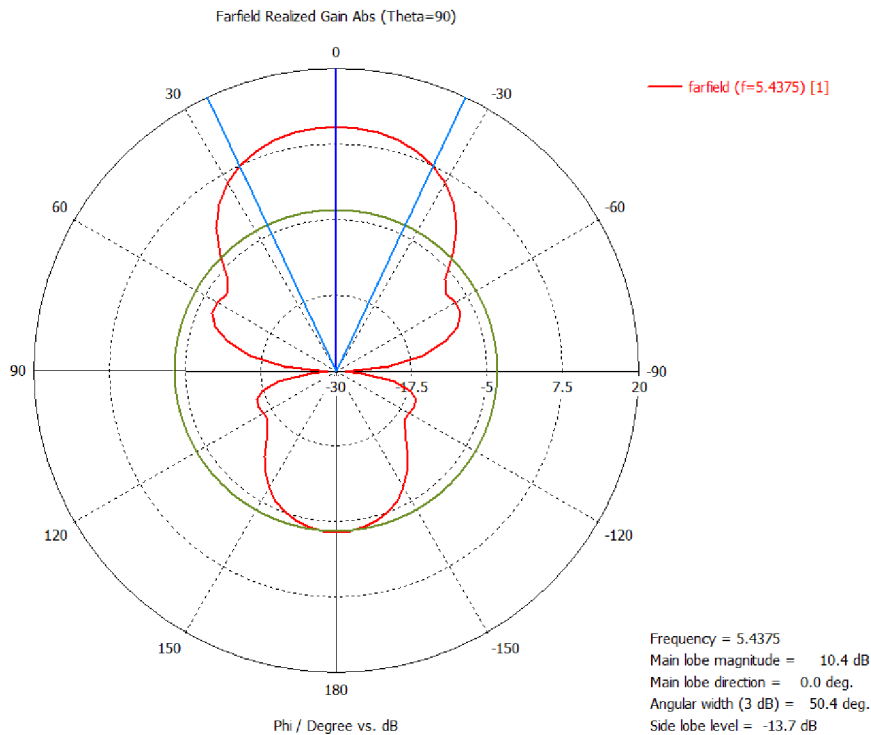
Obrázek 16. Planární anténa s definicí rozměrů



Obrázek 17. Činitel odrazu planární antény



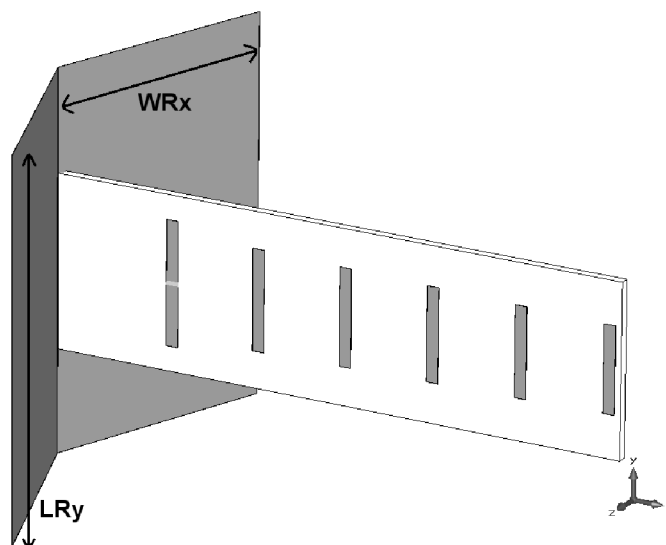
Obrázek 18. Směrová char. E roviny planární antény



Obrázek 19. Směrová char. H roviny planární antény

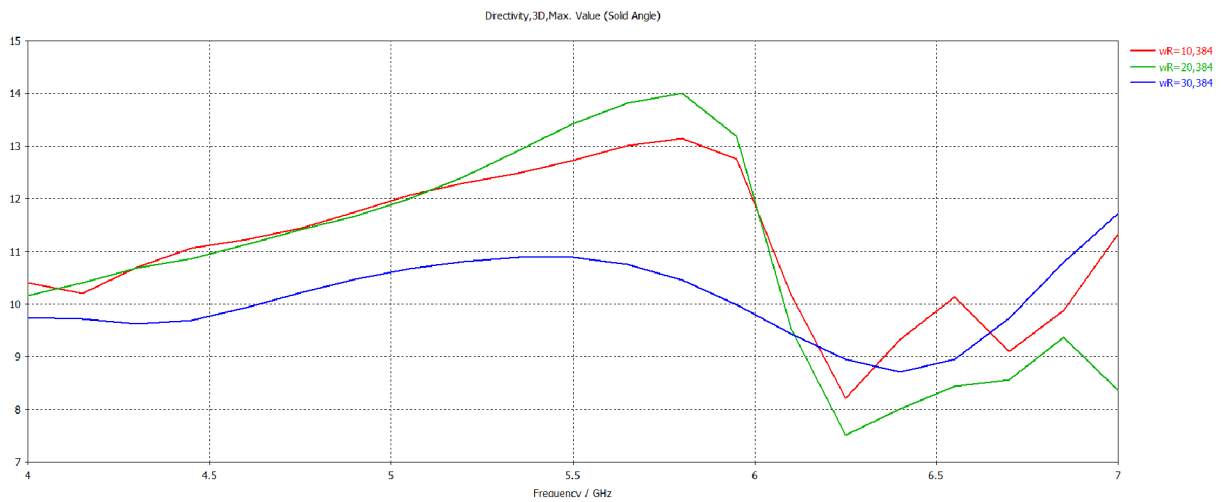
2.4 Drátěný reflektor

Plošný (nebo několikaprvkový) reflektor u drátěných antén zvyšuje ve směru maxima vyzařování zisk až o 4 dB, výrazně zlepšuje FBR a redukuje úroveň zadního a bočních laloků. Tyto vlastnosti ovlivňuje zejména úhel sevření reflektoru a vzdálenost vrcholu wR od zářiče. Délka LRy (v ose Y) plošného reflektoru se volí $1\lambda_0$, úhel sevření 140° dosahuje nejvyššího zisku. Šířka WRx se volí jako $\lambda_0 - wR$, výchozí vzdálenost wR od zářiče je použita stejná, jako u planární antény. Tloušťka a materiál je použit stejný, jako u mikropásků planární antény. Anténa je zobrazena na obrázku 20. Nyní je potřeba navržené rozměry analyzovat a optimalizovat. [4]

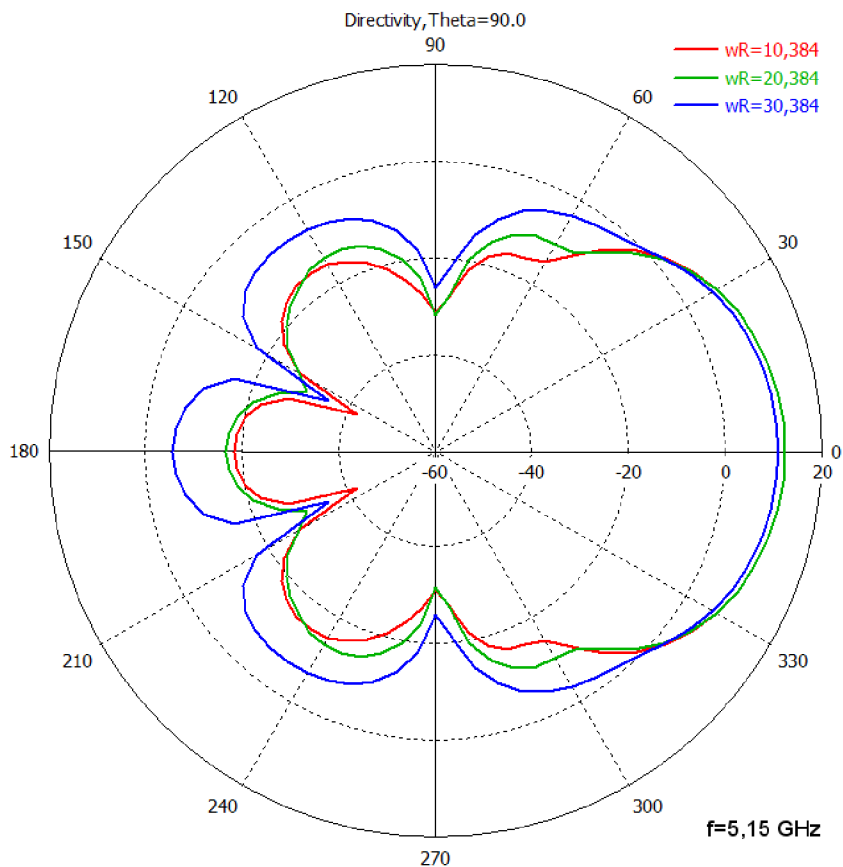


Obrázek 20. Anténa s plošným reflektorem a definicí rozměrů

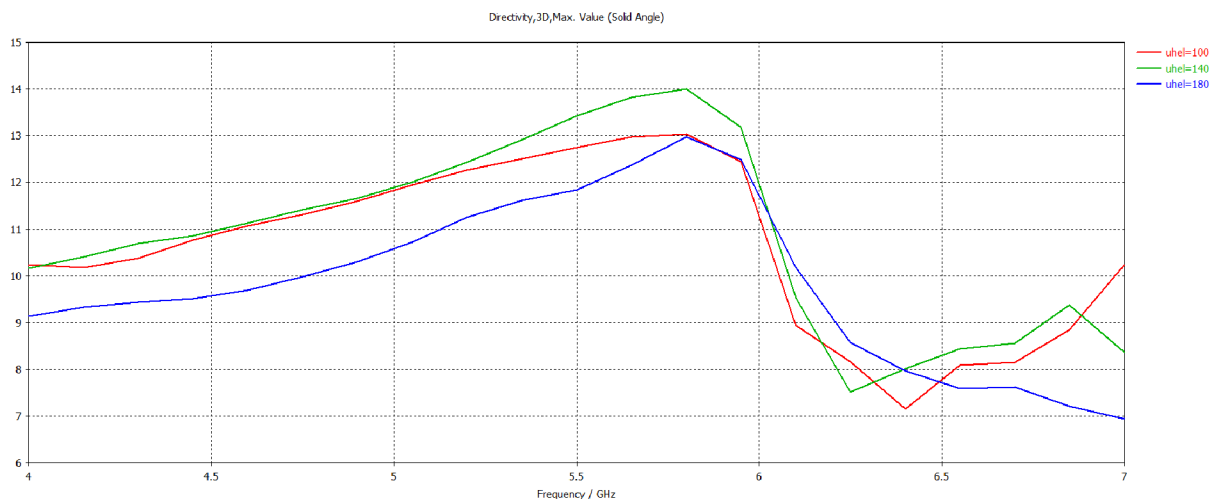
Vzdálenost wR sevřený úhel ovlivňuje úroveň postraních a zadního laloku, směrovost antény v horním pracovním pásmu. To je zobrazeno na obrázcích 21, 22, 23 a 24.



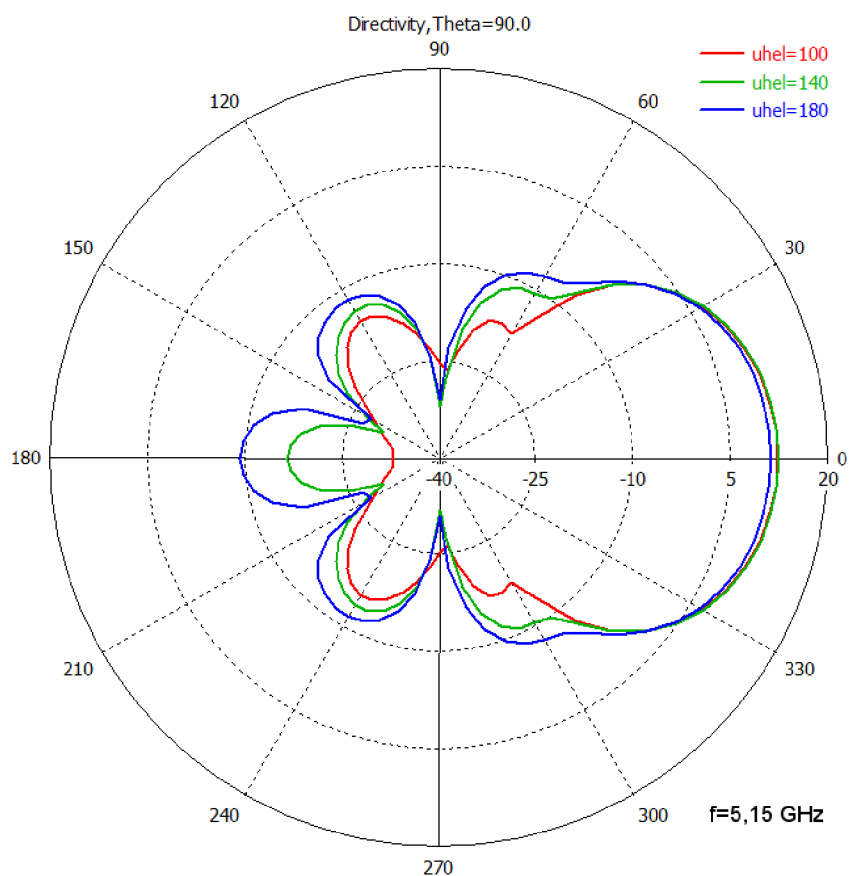
Obrázek 21. Vliv vzdálenosti wR na směrovost antény



Obrázek 22. Vliv vzdálenosti wR na směrovou char. rovinou H



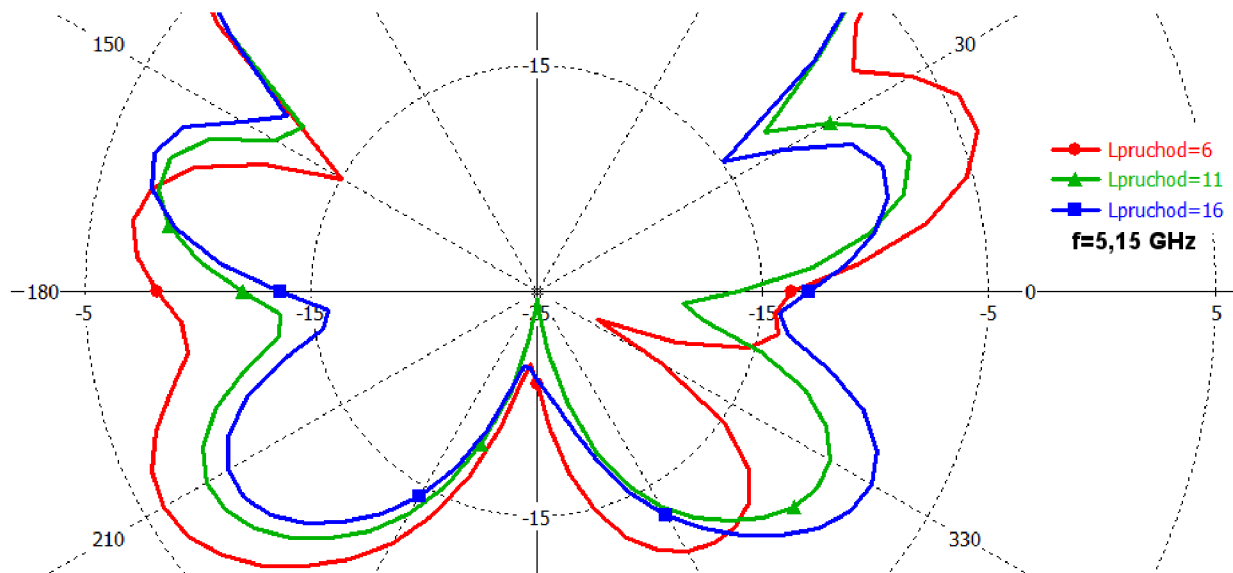
Obrázek 23. Vliv sevřeného úhlu na směrovost antény



Obrázek 24. Vliv sevřeného úhlu na směrovou char. rovinou H

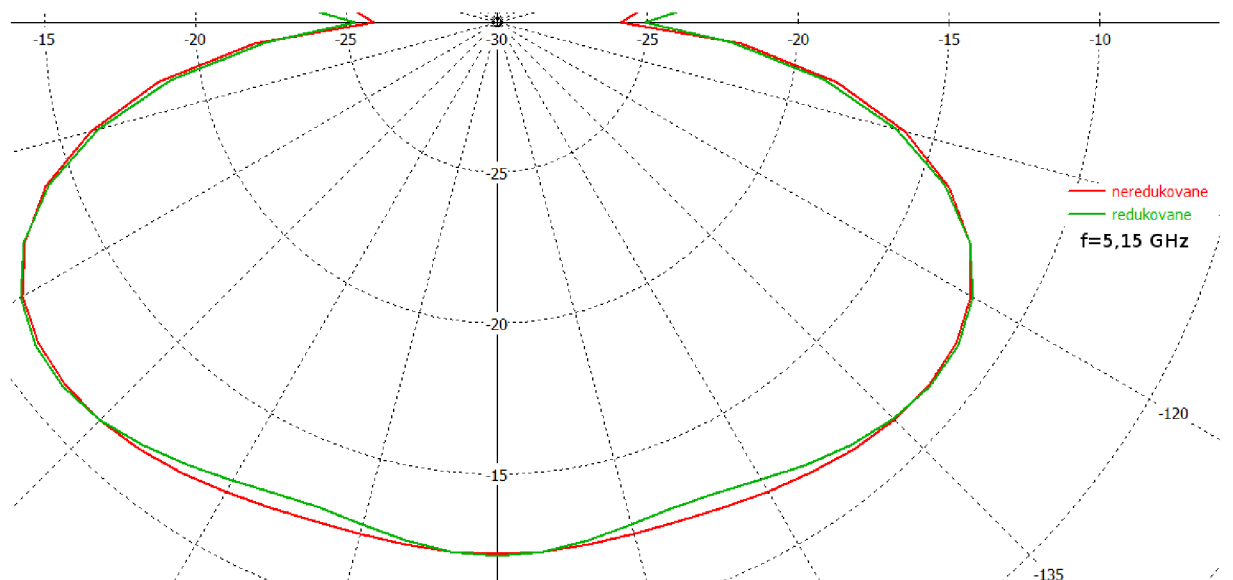
Optimální rozměry tedy jsou: úhel = 140° , $wR = 20,38$ mm, $WR_x = 41,29$ mm a $LR_y = 63,73$ mm. Tento druh reflektoru ale není vhodný pro podmínky mimo budovy. Pro snížení odporu větru a odlehčení konstrukce se tvoří tento reflektor z tyčí. Rozteč ok takového reflektoru se volí $0,1\lambda_0$ [4], s ohledy na rozměry plošného reflektoru je zvolena rozteč 5,9 mm. Reflektor bude vyráběn ručně, bude použit měděný drát, vnější vodič bude mít větší průřez a tak zpevní tvar konstrukce. Tento rozdíl a celkově volba průměrů drátů vhodných pro ruční pájení (do průměru 2 mm) tedy i pro manipulaci nemají výrazný vliv na směrové vlastnosti antény, jen mírně ovlivňují celkovou impedanci antény. Průměr vnějšího vodiče tedy bude 1 mm a vnitřního vodiče 0,5 mm.

Pro velkou šířku pracovního pásma bude použito pro napájení zářiče CPS vedení. Proto je potřeba v drátěném reflektoru vytvořit na horní straně desky průchod. Rozměry průchodu udávané [18] jsou voleny tak, aby nebylo rušené napájení antény. Optimálně by výška průchodu měla být vysoká $8h$ a široká $5h$. Tyto rozměry ale ovlivňují tvar zadního laloku antény. Výška není kritická a je zvolena $3,6h = 5,5$ mm. Šířka je ale kritická. Pro tuto hodnotu byla provedena analýza, která je zobrazena na obrázku 25.



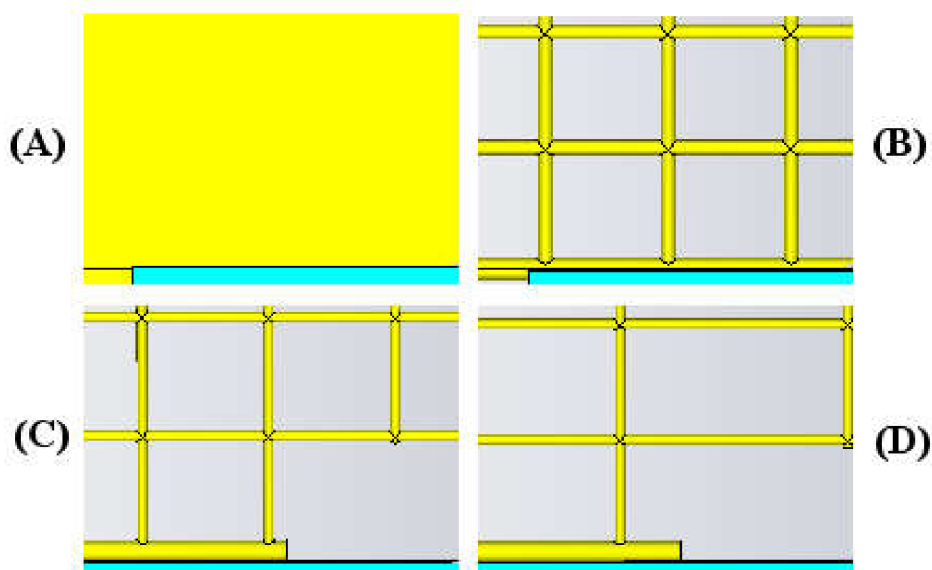
Obrázek 25. Vliv šířky průchodu na směrovou char. antény roviny H

Nejmenší laloky jsou pro šířku 16 mm. Pro ulehčení konstrukce reflektoru je vyšetřován vliv redukce počtu vertikálních drátů. U drátových Yagi antén se používají pouze tyče sousedě se zářičem, tedy i shodně s polarizací antény [4]. Snížení počtu vertikálních drátů na polovinu nemá téměř žádný vliv, viz obrázek 26.



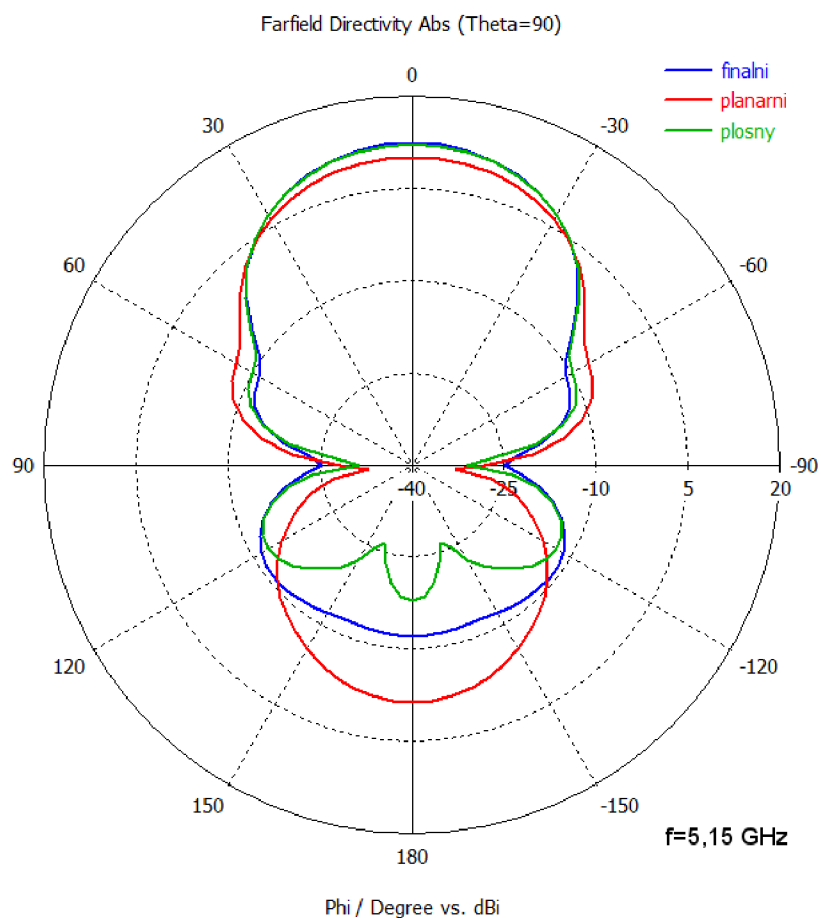
Obrázek 26. Vliv redukce vertikálních drátů na směrovou char. antény roviny H

Postupná změna tvaru reflektoru je zobrazena na výřezech v obrázku 27. Jedná se o pohled z maxima směrovosti antény, tedy proti ose x.

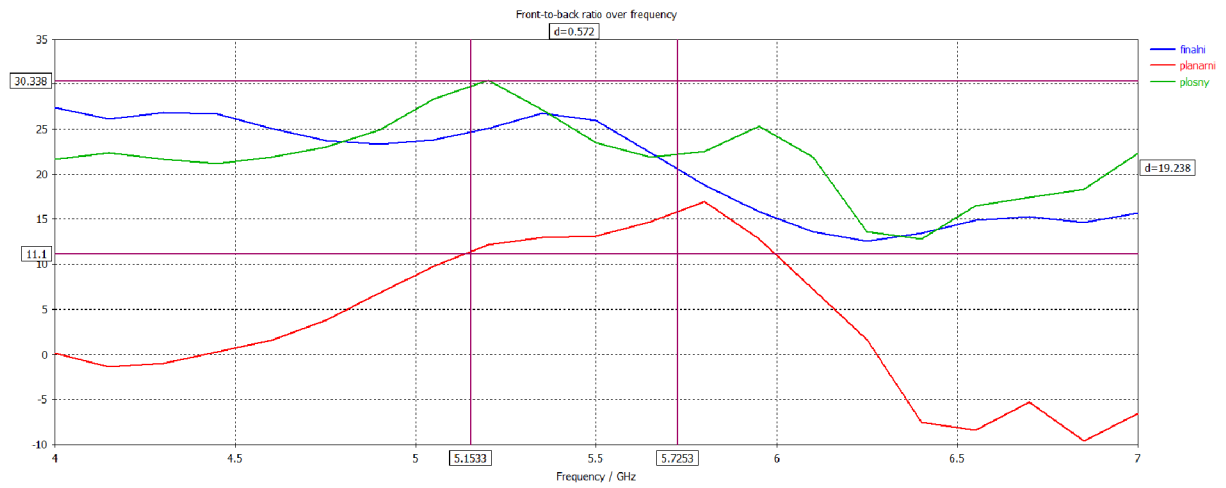


Obrázek 27. Postupná změna tvaru reflektoru, (A) plošný plný reflektor, (B) drátový reflektor, (C) drátový reflektor s průchodem a (D) drátový reflektor s redukcí vertikálních drátů.

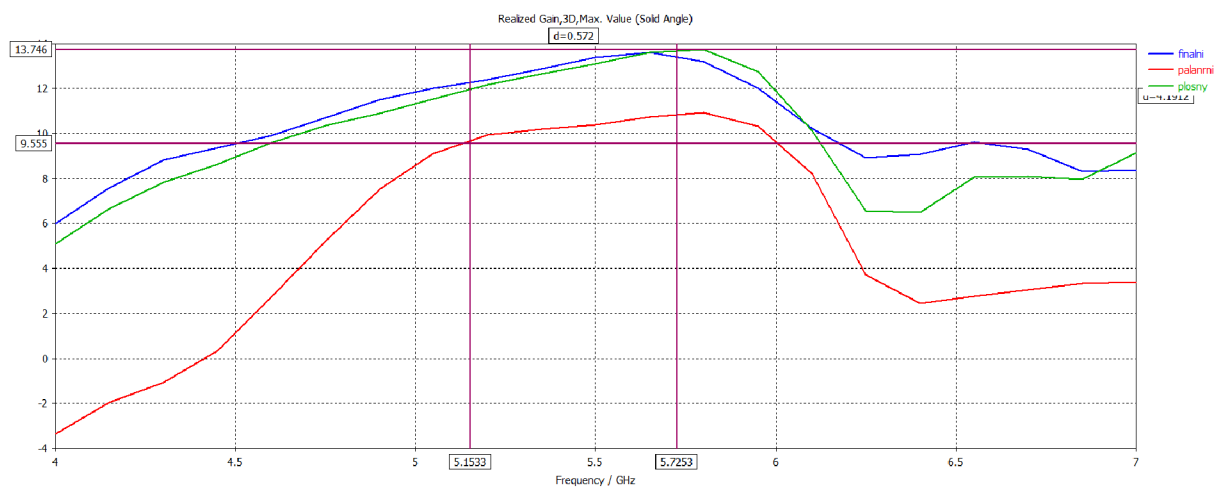
Výsledné charakteristiky posledního reflektoru jsou zobrazeny na obrázcích dále. Zároveň jsou i porovnány s předchozími verzemi reflektorů. Obrázek 28 zobrazuje směrové charakteristiky, obrázek 29 FBR, obrázek 30 zisk antény a obrázek 31 činitel odrazu antény.



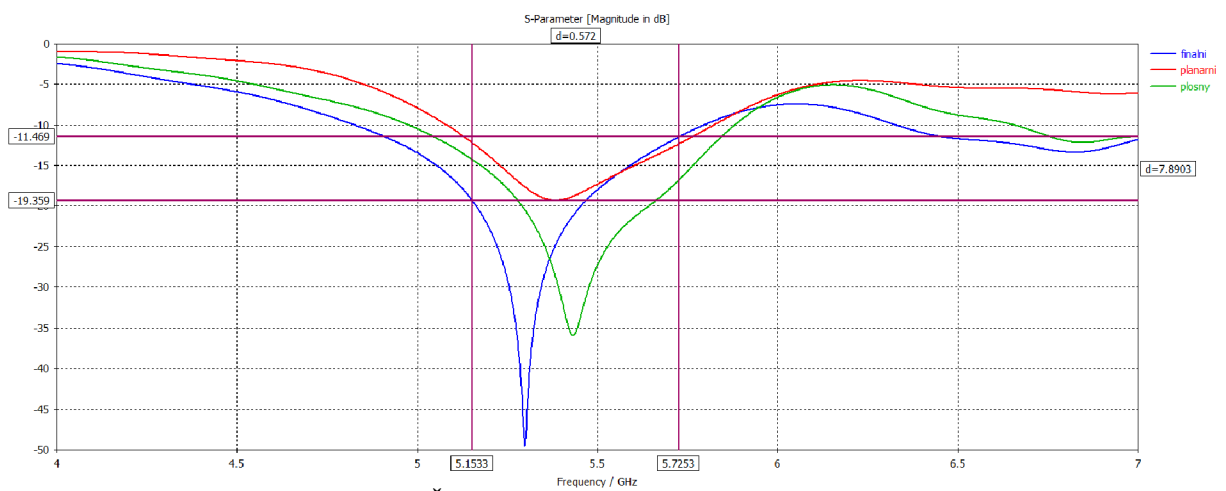
Obrázek 28. Směrové charakteristiky reflektorů v rovině H



Obrázek 29. FBR reflektorů v pracovním pásmu



Obrázek 30. Zisk reflektorů v pracovním pásmu



Obrázek 31. Činitel odrazu reflektorů v pracovním pásmu

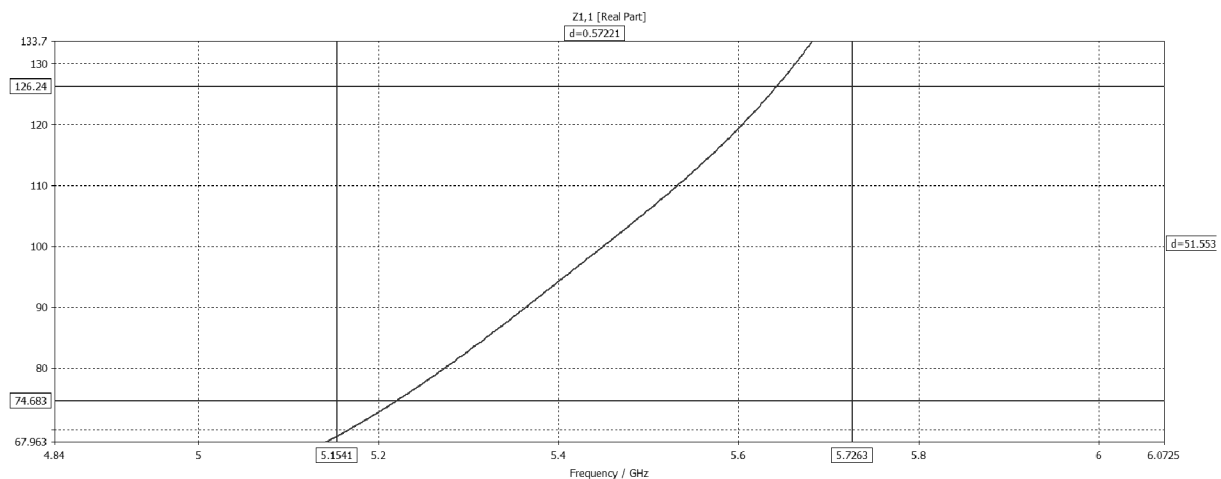
2.5 Impedanční přizpůsobení Yagi antény

Pro správnou funkci Yagi antény je vyžadováno symetrické (signály mají stejnou amplitudu ale opačnou fázi) buzení zářiče. Koaxiální vedení je ale nesymetrické (vztažené k zemi). Proto je nutné použít přizpůsobovací člen, ten zde plní několik úkolů:

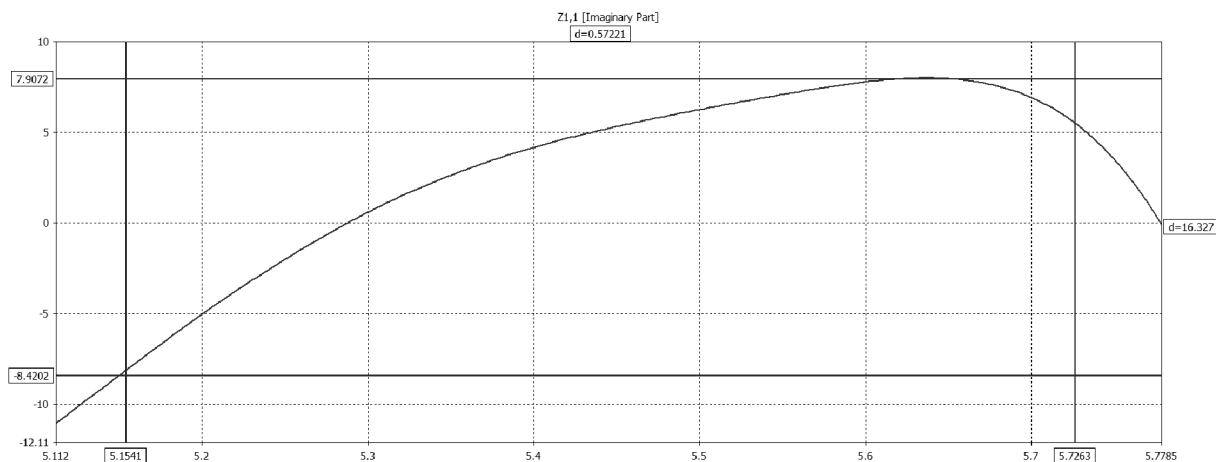
- Transformuje impedanci antény a napájení.
- Symetrizuje napájení.
- Dělí výkon jednoho vedení na dvě části zářiče.

Pokud by buzení nebylo symetrické, vznikali by nesouměrné proudy. Ty vytvářejí a vyzařují elektromagnetické pole, které se sčítá k poli antény a způsobuje deformaci vyzařovací charakteristiky. Toto pole má charakter stojatých vln a je závislé na frekvenci. To ovlivňuje impedanční přizpůsobení antény. [4]

Pro návrh přizpůsobení potřebujeme znát celkovou impedanci antény. Ideálně by měla mít anténa v celém pracovním pásmu nulovou reaktanci a neměnnou rezistenci. Impedance je ale závislá na frekvenci. Proto se snažíme dosáhnout minimální hodnoty reaktance a stabilní hodnotu rezistance. Ty můžeme získat z analýzy v CST. Reálná a imaginární složka impedance je zobrazena na obrázcích 32 a 33.



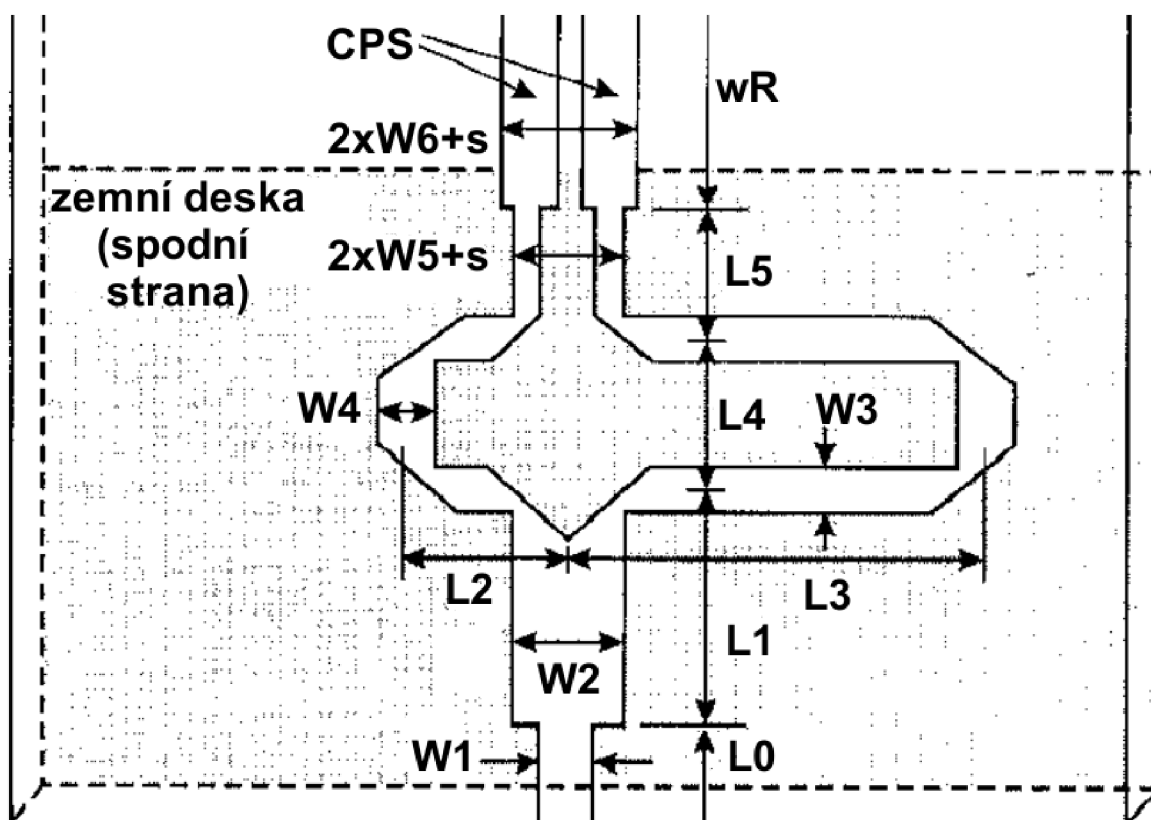
Obrázek 32. Reálná složka impedance antény



Obrázek 33. Imaginární složka impedance antény

Imaginární složka je velmi malá a pro návrh zanedbatelná. Reálná složka se pohybuje v rozmezí 75 – 125 Ω , na středu pracovního pásma je 99 Ω . Z této hodnoty se bude vycházet pro návrh. Pro transformaci impedance bude použit $\lambda/4$ transformátor. Pro rozdělení výkonu lze použít T dělič nebo Wilkinsonův dělič. Změnu fáze signálu lze zajistit prodloužením jedné cesty vedení. Případně lze využít tzv. Rat-race hybridu, který dělí výkon i obrací fázi.

Pro svou jednoduchost a nejčastější použití u planárních Yagi antén je zvolen T dělič. Postup návrhu není složitý, postupuje se od zářiče k napájení antény. Postup návrhu je popsán v [20]. Rozměry přizpůsobovacího členu (anglicky Balun) jsou zobrazeny na obrázku 34. Pro návrh můžeme zjednodušeně říci, že šířka pásku ovlivňuje impedanci a délka fázové zpoždění.



Obrázek 34. Balun s definicí rozměrů

CPS vedením se šíří pouze lichý vid, pro sudý se chová jako otevřený konec MS vedení. Pro impedanci 100 Ω lze rozměr W_6 navrhnout pomocí vztahu (26), použitím volně dostupného kalkulátoru TX Line 2003, online kalkulátorem CPS vedení nebo pomocí kalkulátoru v CST. Tato šířka je pro mezeru $s = 0,5$ mm (ta je limitováno technologií výroby DPS na URELu) příliš velká, zvolená šířka $W_6 = 3,5$ mm vyhovuje pro impedanci 120 Ω . Tohle menší nepřizpůsobení bude mít vliv na zhoršení činitele odrazu. Vázané MS vedení je navrženo pro 60 Ω a šířku lze vypočítat pomocí vztahu (17) nebo kalkulátory a $W_5 = 3,25$ mm. Délka nemá vliv na balun, s ohledem na rušení je zvolena vzdálenost $5h$, tedy $L_5 = 11$ mm.

Fázové zpoždění 180° lze vypočítat podle vzorce:

$$L_3 - L_2 = \lambda_g / 4 \quad (35)$$

nebo dle (20). Kalkulátory a to taktéž umožňují. Hodnoty tedy jsou: $L_2 = 14,27$ mm a $L_3 = 24,3$ mm. Šířky W_3 a W_4 jsou shodné s W_5 .

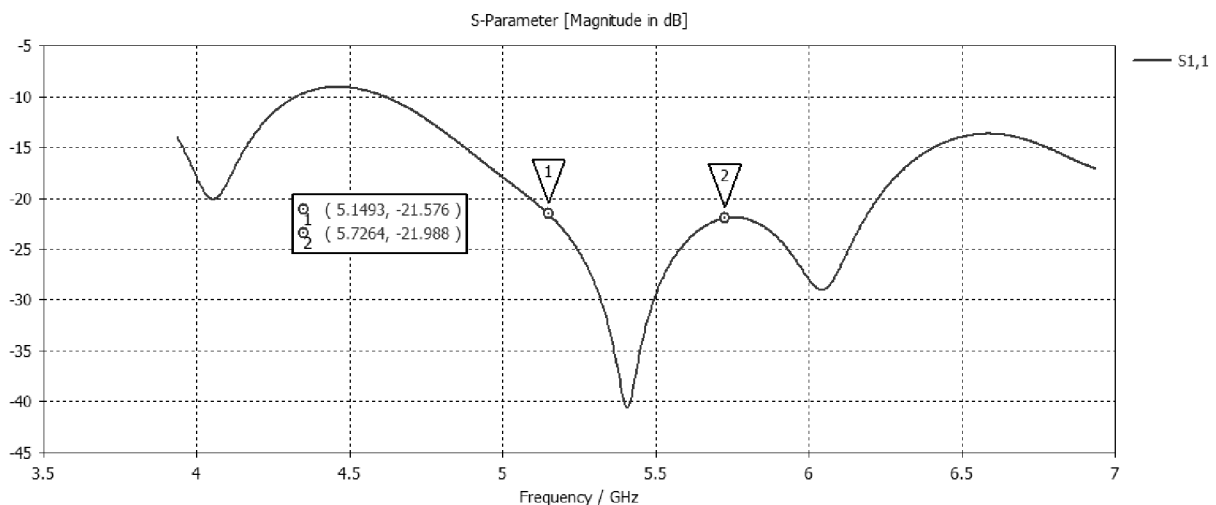
$\lambda/4$ transformátor přizpůsobuje impedanci vázaných MS vedení na napájení antény. Délka $L_1 = \lambda_g/4 = 9$ mm. Impedance transformátoru je rovna $Z_T = \sqrt{Z_{in} \cdot Z_{out}} = \sqrt{50 \cdot 30} = 38,7 \Omega$ a šířka $W_2 = 6,26$ mm. Poslední částí je 50Ω pásek, na který bude připájen konektor, délka nemá vliv na balun a je zvolena $L_0 = 8$ mm, šířka $W_1 = 4,49$ mm. Pro omezení parazitních vlivů na pravoúhlých rozích je použito zkosení m [14]. Pro úhel 45° je výpočet následující:

$$m = W\sqrt{2}(0,52 + 0,65 \cdot \exp(-1,35 \cdot W/h)) \quad (36)$$

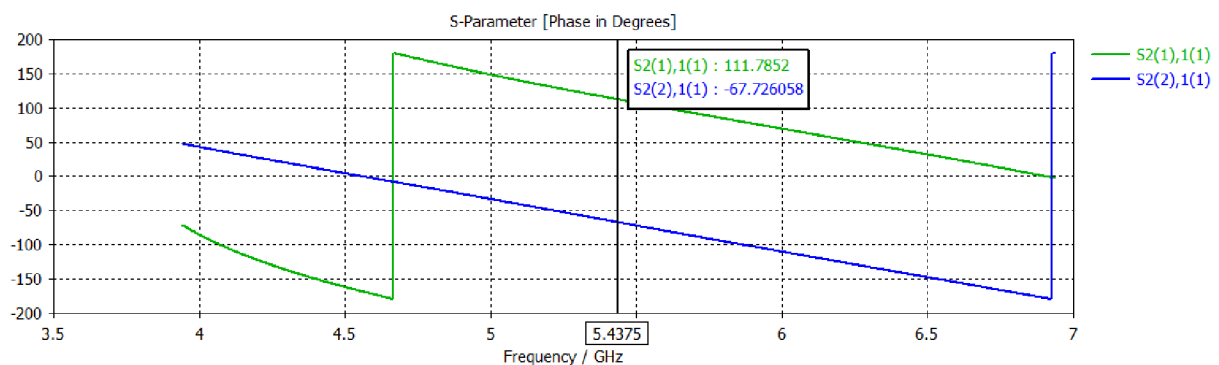
Takto navržený balun podrobíme analýze v CST. Jelikož CST neumožňuje sledovat sudý a lichý vid na vlnovém portu, je nutné sledovat fázi a úroveň signálu na dvou identických modelech. Balun je tedy analyzován a navržená soustava je upravena pro 180° fázový posun na výstupu a co nejlepší činitel přizpůsobení. Výsledné hodnoty optimalizovaného balunu jsou zobrazeny v tabulce 7. Činitel odrazu je zobrazen na obrázku 35, fázový posun signálu na obrázku 36.

Tabulka 7. Optimální rozměry balunu v mm

L0	L1	L2	L3	L4	L5	W1	W2	W3	W4	W5	W6	s	m
8	10	14,27	24,3	4	12	4,49	5,6	W4	W5	3,3	3,5	0,5	1,99



Obrázek 35. Činitel odrazu balunu



Obrázek 36. Změna fáze na výstupech balunu

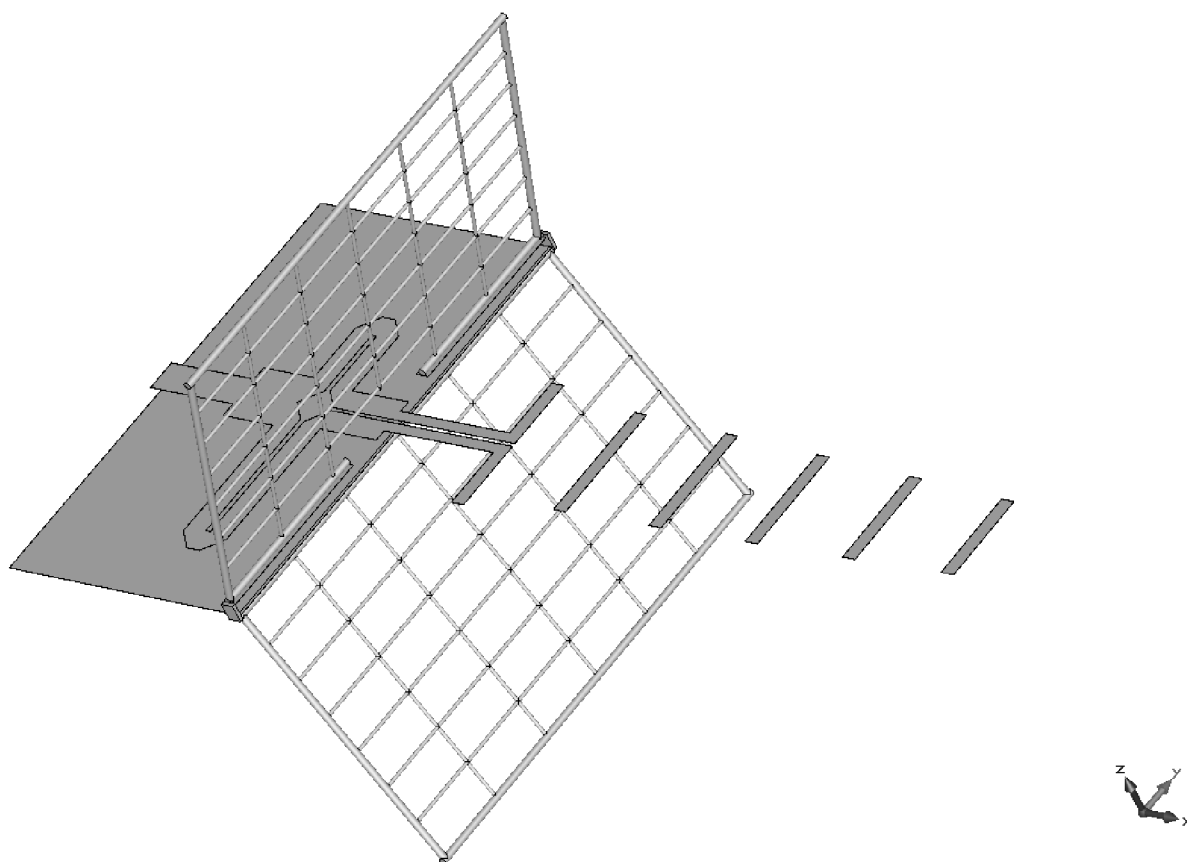
2.6 Kompletace Yagi antény

Posledním krokem je spojit anténu s balunem. Anténu je nutné vyladit. Optimalizují se hlavně šířky vedení balunu a délky fázového posunu. Taktéž je nutné nastavit požadovanou šířku pásma. Tato práce je hlavně o kompromisu mezi ideálními hodnotami antény a reálnými požadavky. Hlavním požadavkem je zisk 10 dBi v pracovním pásmu 5,15 – 5,725 GHz. Skrze rozměry antény je analýza antény náročná jak časově, tak i na výpočetní výkon. Optimalizované hodnoty rozměrů kompletní antény jsou zobrazeny v tabulce 8.

Tabulka 8. Rozměry kompletní antény v mm

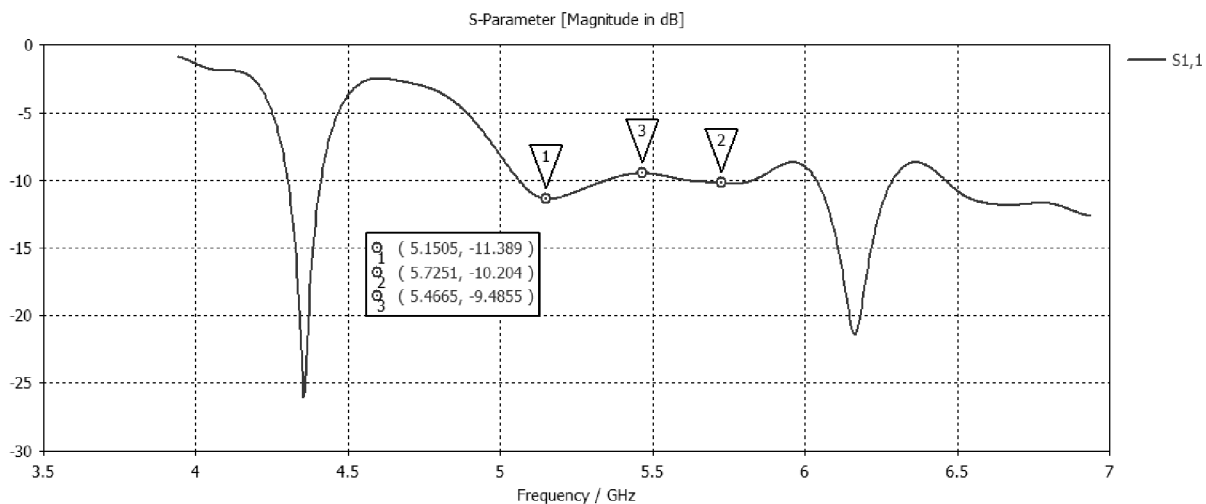
Výška průchodu	L0	L1	L2	L3	L4	L5	LD1	LD2	LD3
5,5	14	10	14,3	24,3	4	11	17,3	16,3	15,3
Šířka průchodu	LRy	LZ	m	s	Rozteč ok	D vnější	D vnitřní	LD4	LD5
16	65,6	21,4	2,5	0,5	5,9	1	0,5	14,3	12,8
Úhel	W	W1	W2	W3	W4	W5	W6	wR	WRx
140°	2	4,5	8,7	3,2	3,2	3,2	1,5	20,4	41,3

Pro nejširší mikropásek antény je vypočítána z (25) mezní frekvence antény, ta je 10 GHz. Kompletní anténa je zobrazena s průhledným substrátem na obrázku 37.

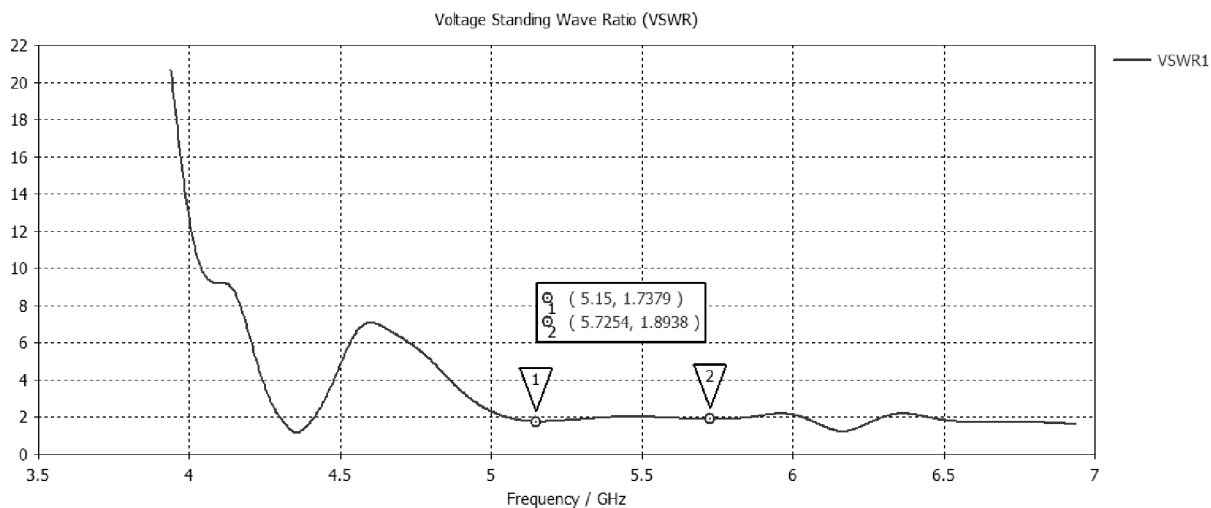


Obrázek 37. Finální vzhled antény bez substrátu

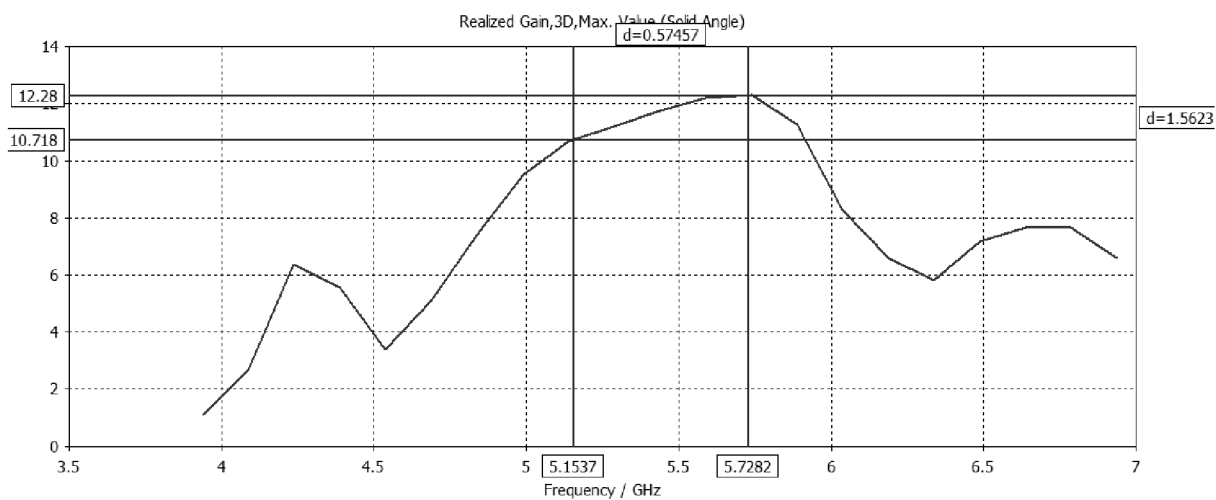
Činitel odrazu, SWR a zisk jsou zobrazeny na obrázcích 38 až 40.



Obrázek 38. Číselník odrazu finální antény

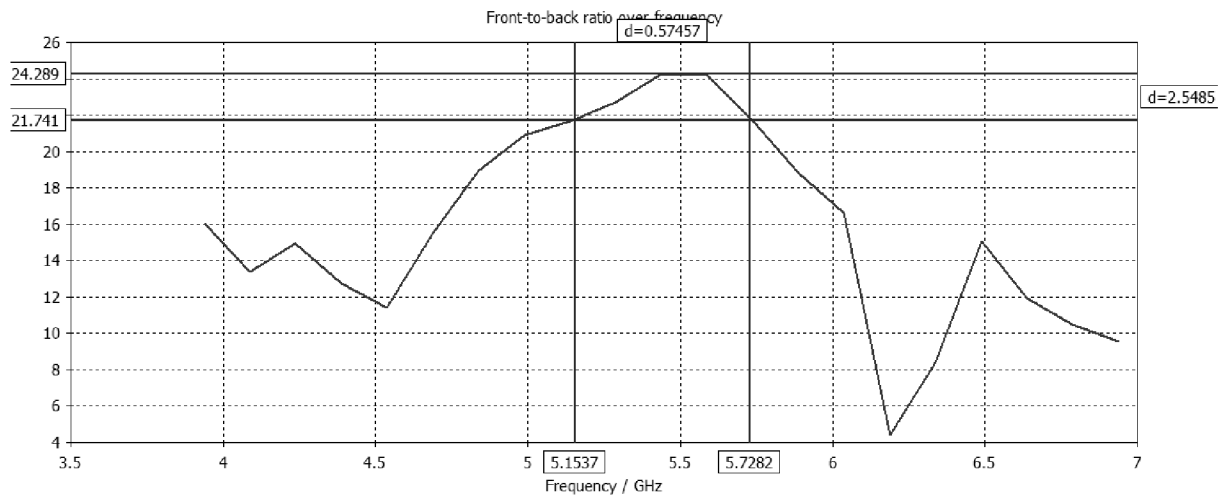


Obrázek 39. SWR finální antény

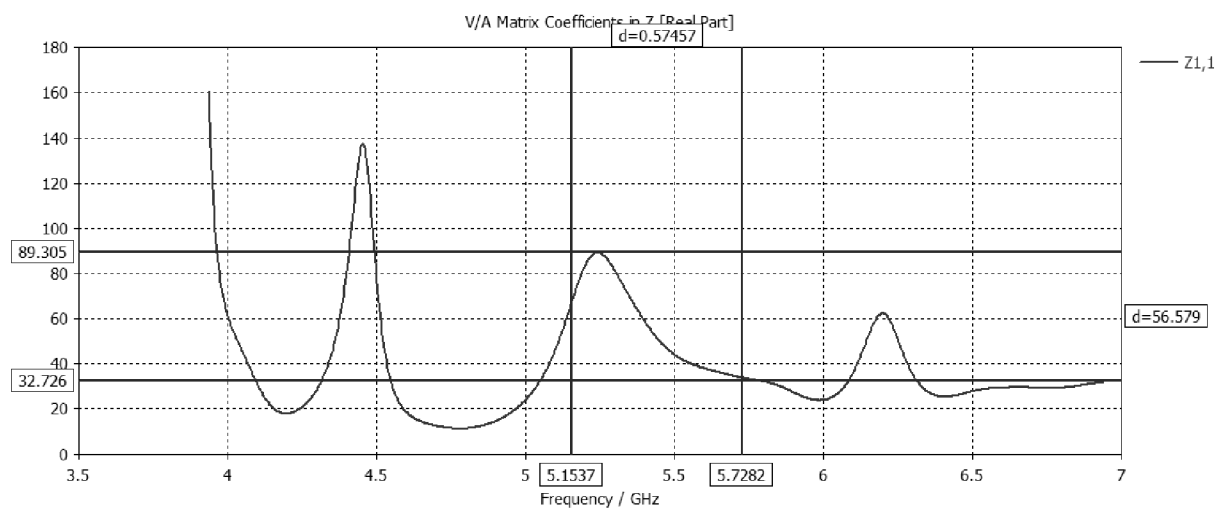


Obrázek 40. Zisk finální antény

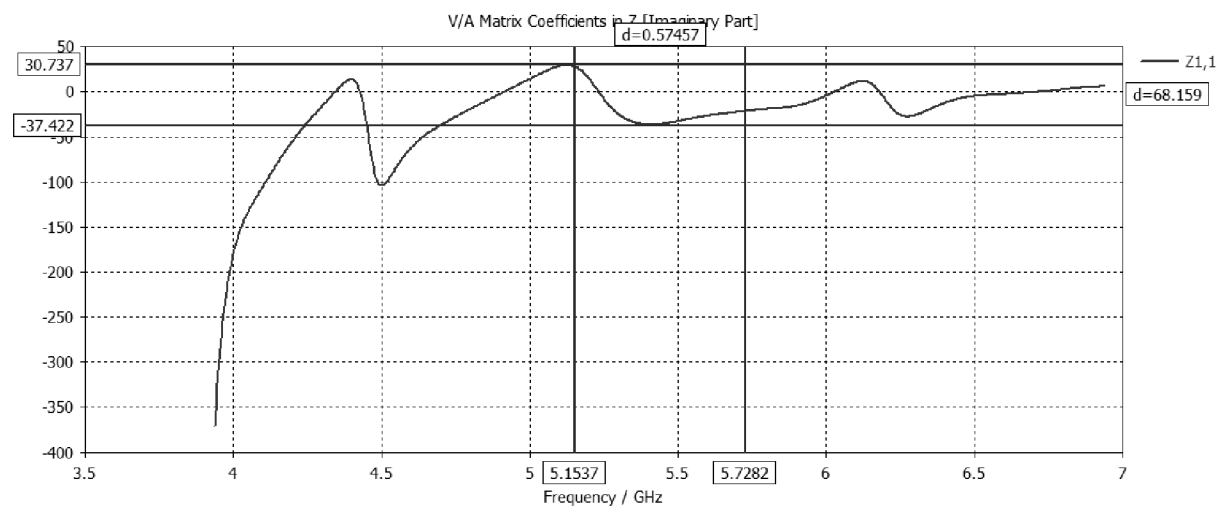
FBR, reální a imaginární hodnota impedance jsou zobrazeny na obrázcích 41 až 43.



Obrázek 41. FBR finální antény

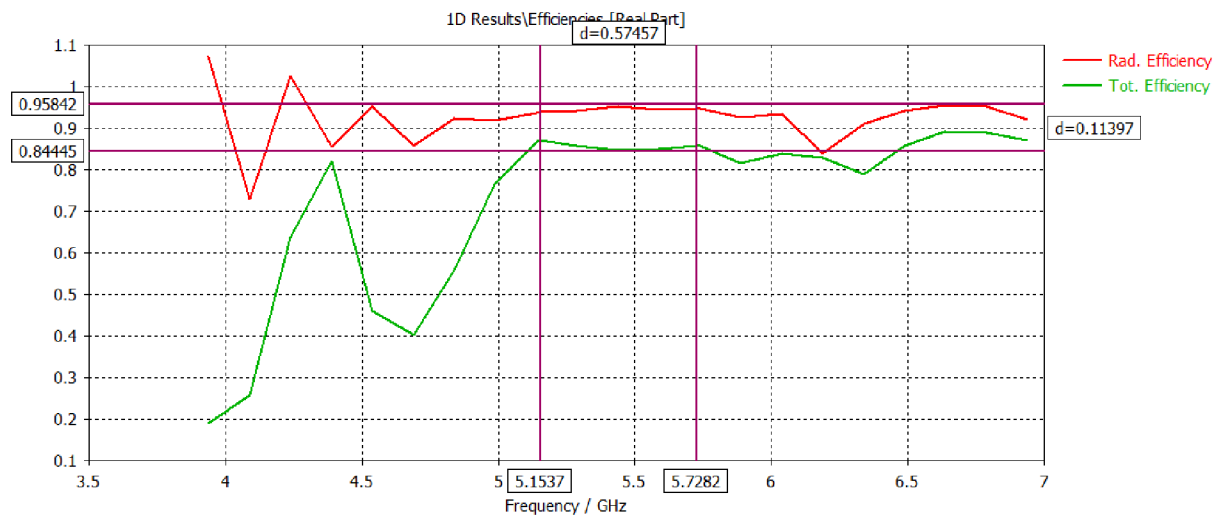


Obrázek 42. Reálná hodnota impedance finální antény

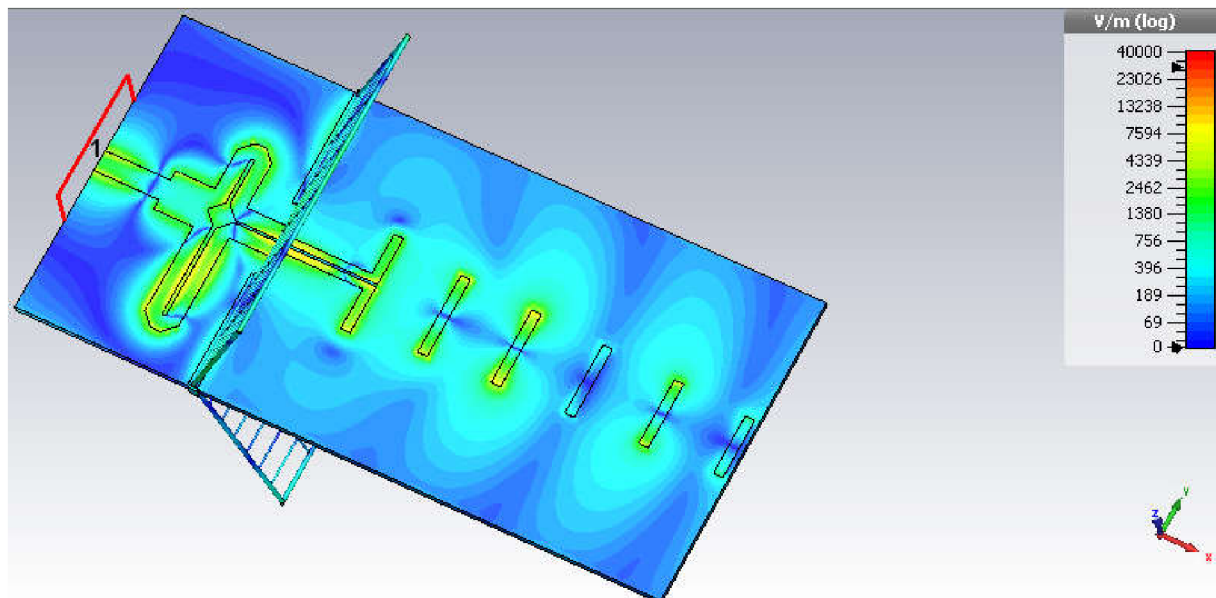


Obrázek 43. Imaginární hodnota impedance finální antény

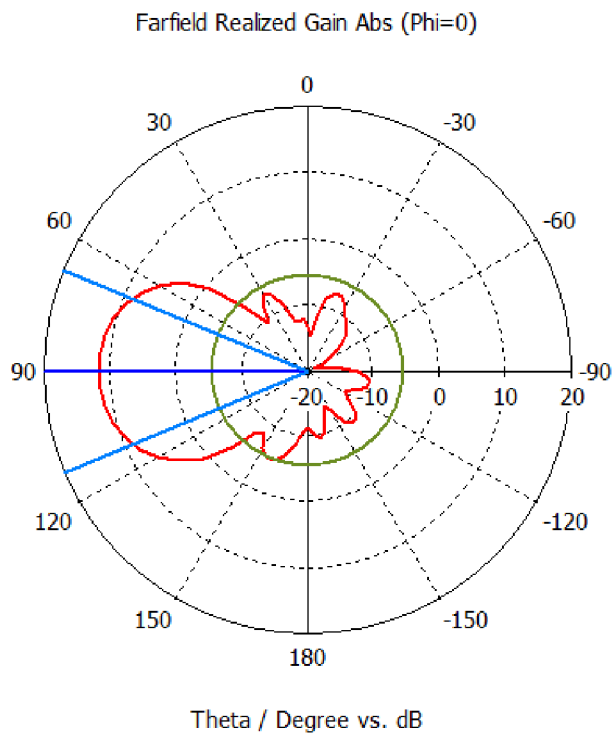
Účinnost antény, rozložení elektrického pole a směrové charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 43 až 46. Na obrázku 45 si lze prohlédnout fázi signálu v balunu.



Obrázek 44. Účinnost finální antény



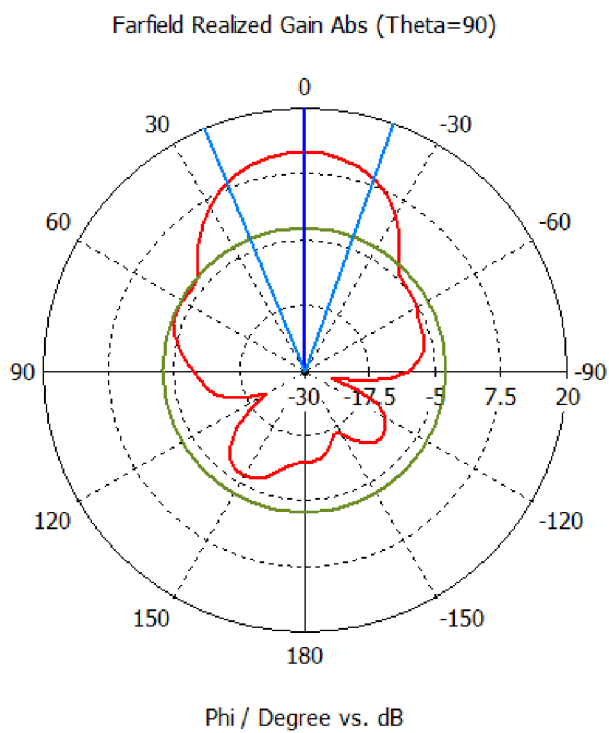
Obrázek 45. Rozložení elektrického pole antény na 5,4375 GHz



— farfield (f=5.4375) [1]

Frequency = 5.4375
 Main lobe magnitude = 11.7 dB
 Main lobe direction = 90.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 45.0 deg.
 Side lobe level = -17.2 dB

Obrázek 46. Směrová char. roviny E finální antény



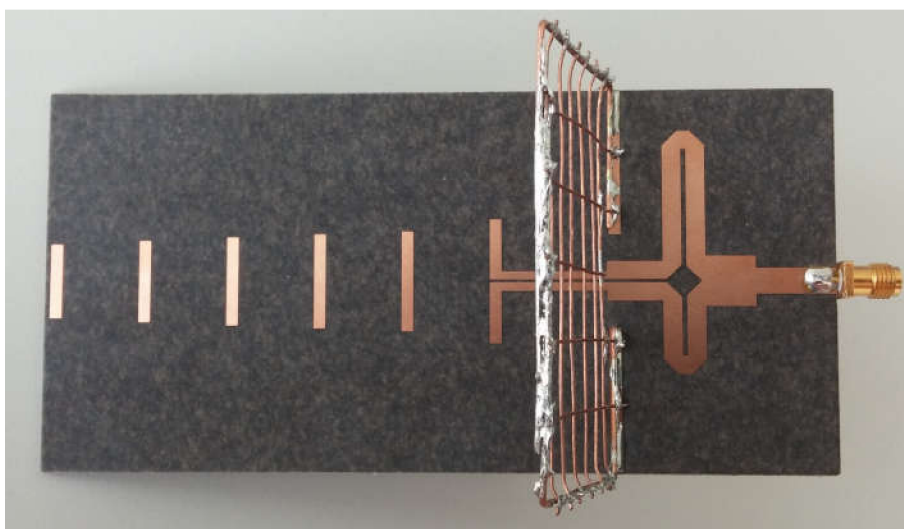
— farfield (f=5.4375) [1]

Frequency = 5.4375
 Main lobe magnitude = 11.7 dB
 Main lobe direction = 0.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 42.4 deg.
 Side lobe level = -14.6 dB

Obrázek 47. Směrová char. roviny H finální antény

3 REALIZACE A MĚŘENÍ

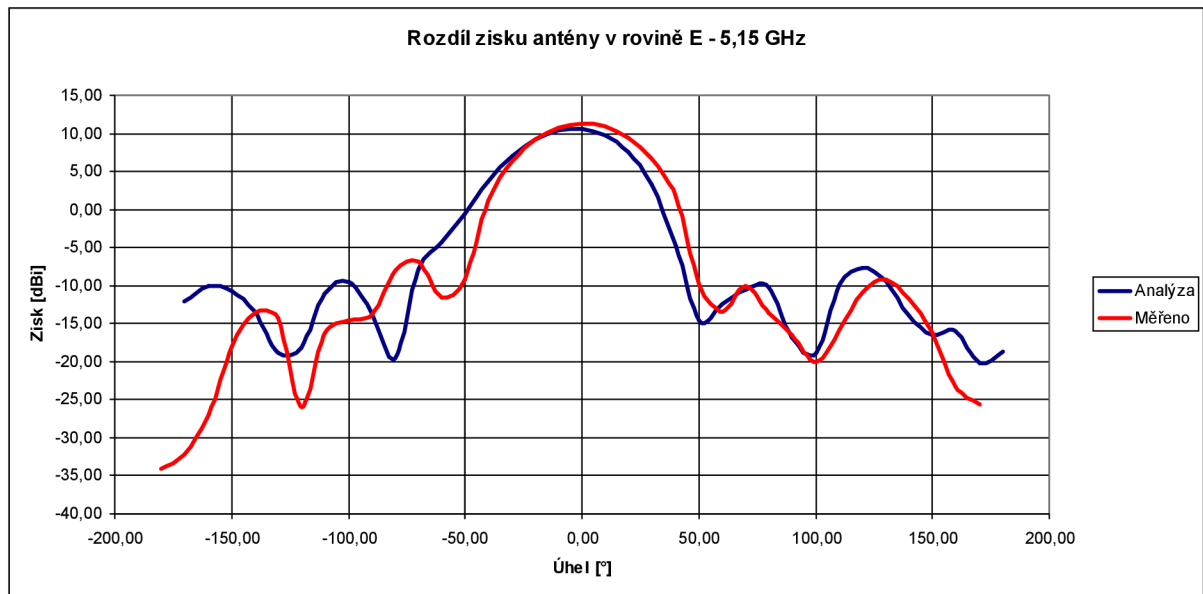
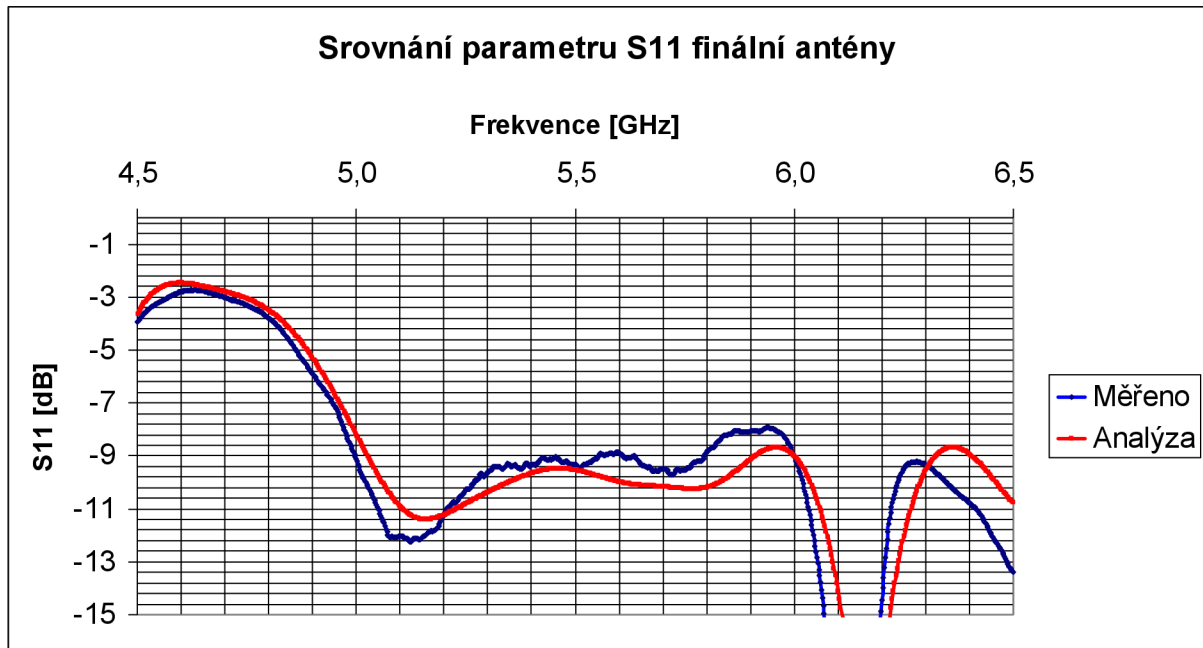
V této kapitole je rozebrána výroba, měření a výsledky finální antény. Horní i dolní motiv desky byl vyexportován do souboru gerber a zadán do výroby v dílně URELu. Drátový reflektor byl ručně vyroben měděnými dráty a spájen olovnatým cínem. Anténa byla pak zkompletována a změřena ve školní laboratoři SE7.102. Zde byly v bezodrazové komoře změřeny směrové charakteristiky a činitel odrazu byl změřen na vektorovém analyzátoru R&S®ZVL. Zhotovená anténa je zobrazena na obrázcích 48 a 49. Rozměry antény jsou 137 x 69 x 80 mm. Výsledky měření s porovnáním výsledků analýzy jsou zobrazeny na obrázcích 50 až 54.

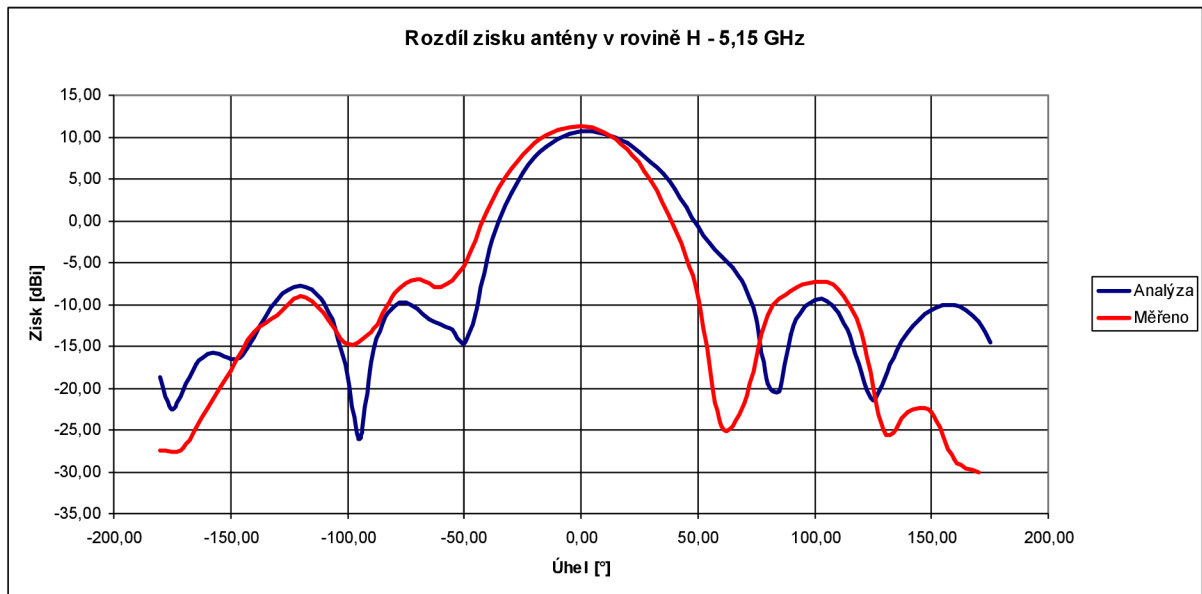


Obrázek 48. Horní strana antény

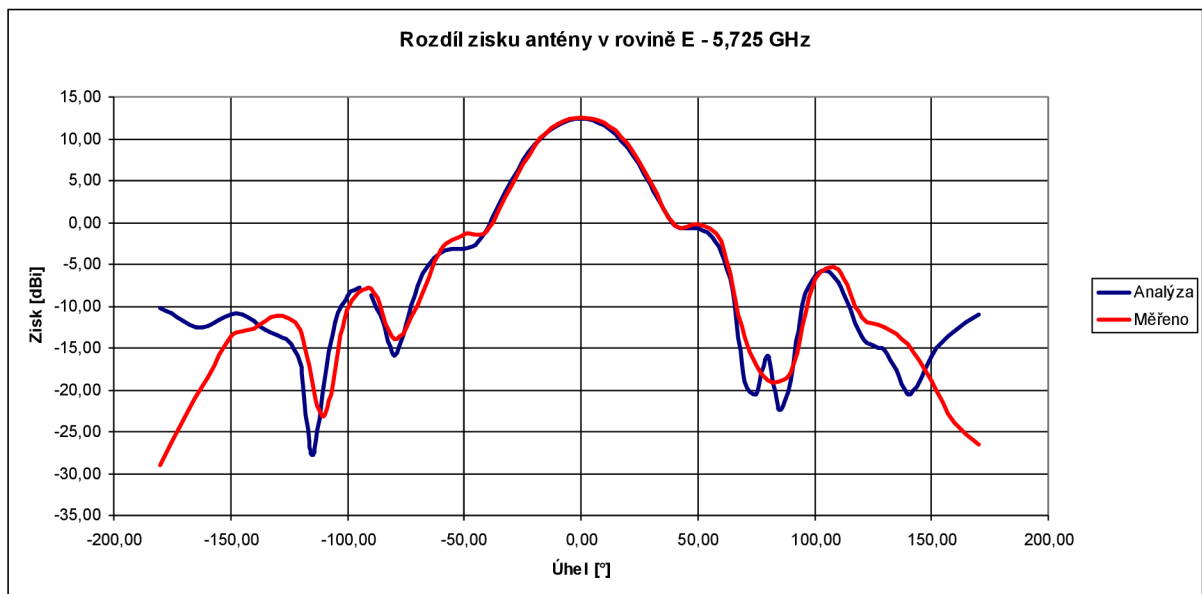


Obrázek 49. Dolní strana antény

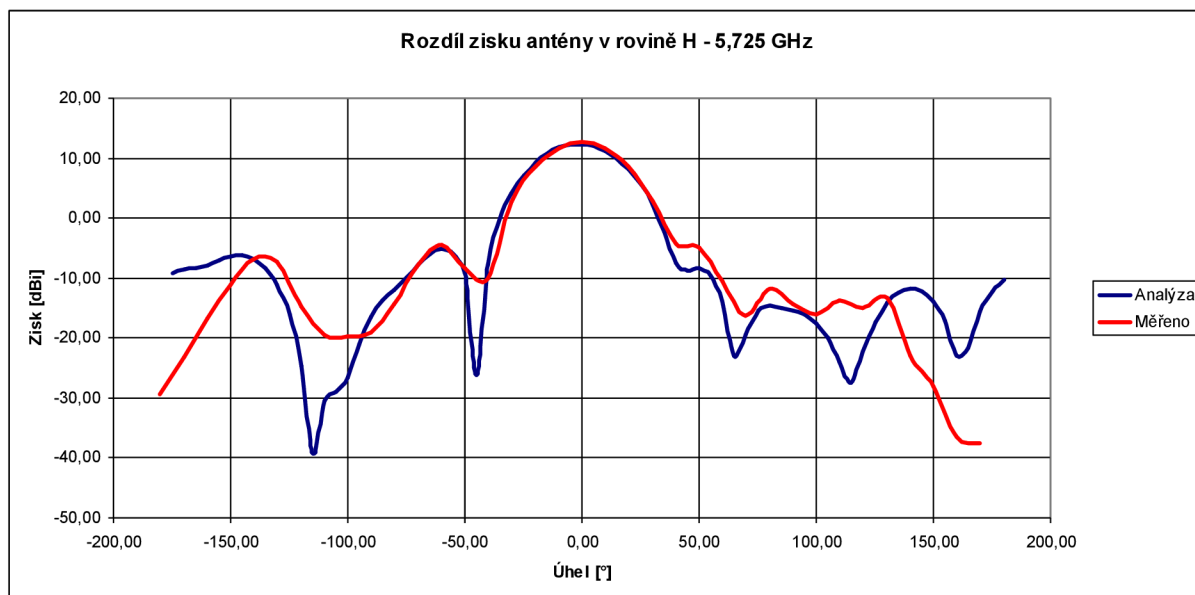




Obrázek 52. Srovnání zisku antény v rovině H - 5,15 GHz



Obrázek 53. Srovnání zisku antény v rovině E - 5,725 GHz



Obrázek 54. Srovnání zisku antény v rovině H - 5,725 GHz

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámení se s činností a popisem Yagi antén. Rozbor jednotlivých elementů antény a jejich vlivu na výsledné směrové charakteristiky je popsán v první kapitole. V teoretické části je rovněž popsána planární technologie, která byla použita pro výrobu antény.

Na základě teoretického rozboru bylo přistoupeno k návrhu Yagi antény pro 5 GHz Wi-Fi pásmo v planárním provedení s drátovým reflektorem. V úvodu je provedena rešerše dostupných antén pro toto pásmo a zvolena vhodná šířka pracovního pásma: 5,150 – 5,725 GHz. Dále je vyšetřován zisk planární antény v závislosti na počtu elementů a z výsledků je vybrán minimální zisk antény: 10 dBi v celém pásmu. Pak je již přistoupeno z návrhu planární antény, následované návrhem drátěného reflektoru a balunu. Pro analýzy byl použit software CST Microwave Studio. Výsledky jsou zobrazeny v grafech. Zde taktéž bylo potvrzeno, že návrh planární antény je podobný návrhu drátové a teoretické poznatky platí i zde.

Při návrhu finální antény byl kladen důraz na zisk antény a impedanční přizpůsobení. Anténa je vyrobena na substrátu IsoClad 933 technologií desek plošných spojů v dílně URElu. Změřena je v laboratoři SE7.102. Finální rozměry antény jsou zobrazeny v tabulce 8. Anténa má rozměry: 137 x 80 x 69 mm a je zobrazena na obrázku 48. Napájení balunem a CPS mikropásky umožnilo značně zvětšit šířku pásma. Drátěný reflektor zvýšil zisk antény v celém pásmu minimálně od 2 dB, zlepšil FBR o 10 a výrazně zmenšil úroveň postranních a zadního laloku. Minimální zisk antény je v pracovním pásmu téměř 11 dBi. Jediným nedostatkem je špatné impedanční přizpůsobení, to v celém pásmu nedosahuje minimální hodnoty činitele odrazu – 10 dB. Přesah je však maximálně na – 9 dB. Vzhledem ke své konstrukci je anténa značně křehká a nelze ji použít mimo interiéry. Celkově lze však diplomovou práci považovat za splněnou.

LITERATURA

- [1] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, c2005. ISBN 047166782X.
- [2] MILLIGAN, Thomas A. *Modern antenna design*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2005. ISBN 978-0-471-45776-3.
- [3] MOHAMED, Younes. *Design and Application of a New Planar Balun*. Texas, 2014. Master of science thesis. University of North Texas.
- [4] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-59-7.
- [5] *Praktická elektronika: Dipól+reflektor nebo dipól+direktor*. Praha: Amaro, 2015, 20(1). ISSN 1804-7173.
- [6] YAGI, Hidetsugu a Shintaro UDA. Projector of the Sharpest Beam of Electric Waves. *Jour. of IEE of Japan*. 1926, , 49 - 52.
- [7] HUANG, J. a A.C. DENSMORE. Microstrip Yagi array antenna for mobile satellite vehicle application. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. **39**(7), 1024-1030 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1109/8.86924. ISSN 0018926x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/86924/>
- [8] Y. Qian, W. R. Deal, N. Kaneda, and T. Itoh, "Microstrip-fed quasi-yagi antenna with broadband characteristics," *Electronics Lett.*, vol. 34, no. 23, pp. 2194–2196, 1998.
- [9] JOSEPH J. CARR. *Antenna toolkit*. 2nd ed. Oxford: Boston, 2001. ISBN 0080493882.
- [10] VHF/UHF Yagi Antenna Design. *Javascript® Electronic Notebook* [online]. 2004 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.k7mem.com/Electronic_Notebook/antennas/yagi_vhf.html
- [11] GUENTER, Hoch. Extremely Long Yagi Antennas. *VHF Communications Magazine*. 1982, **13**(3), 130 - 138.
- [12] *Planární širokopásmové antény*. Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny, mikrovlnná technika [online]. VUT Brno, 2010. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/cz/4-7-A.pdf>
- [13] GARG, Ramesh. *Microstrip antenna design handbook*. Boston, MA: Artech House, 2001. ISBN 0-89006-513-6.
- [14] HONG, Jia-Sheng. a M. J. LANCASTER. *Microstrip filters for RF/microwave applications*. New York: Wiley, c2001. ISBN 0-471-38877-7.
- [15] *PTFE/Nonwoven Fiberglass Laminates*, IsoClad, 2016.

- [16] *ETSI EN 301 893. Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive*. V1.7.2. Sophia Antipolis: ETSI, 2014.
- [17] FORMATO, Richard A. *Improving bandwidth of Yagi-Uda arrays* [online]. Woburn, 2012. Dostupné z: http://file.scirp.org/pdf/WET20120100007_25610161.pdf
- [18] SAINATI, Robert A. *CAD of microstrip antennas for wireless applications*. Boston: Artech House, c1996. ISBN 0890065624.
- [19] ALSLIETY, Mazen a Daniel ALOI. A Low Profile Microstrip Yagi Dipole Antenna for Wireless Communications in the 5 GHz Band. In: *2006 IEEE International Conference on Electro/Information Technology*. IEEE, 2006, s. 525-528. DOI: 10.1109/EIT.2006.252201. ISBN 0-7803-9592-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4017758/>
- [20] KARBALAEI, Hassan and col. Designing Yagi-Uda Antenna Fed by Microstrip Line and Simulated by HFSS. *6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT) proceedings*, Tbilisi, Georgia, 17-19 October 2012. Piscataway, NJ: IEEE, 2012. ISBN 9781467317405

Seznam zkratk

CEM	výpočetní elektromagnetismus
CPS	koplanární vedení
D	směrovost
DPS	deska plošných spojů
FBR	předozaďní poměr
G	zisk
LAN	lokální síť
MS	mikropásek
SWR	poměr stojatých vln
TEM	transverzálně elektromagnetická vlna
UREL	ústav radioelektroniky
WiFi	bezdrátová komunikace