

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Plošná anténní řada v pásmu X

Bc. Karel Košárek

Diplomová práce

2011

---

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel KOŠÁREK**

---

Osobní číslo: **I09402**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**

Název tématu: **Plošná anténní řada v pásmu X**

Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte plošnou anténní řadu se ziskem větším než 20 dBi v pásmu 9,2 až 10 GHz.

Osnova diplomové práce:

- 1) Analýza anténních prvků
- 2) Stanovení počtu prvků
- 3) Rozvod energie
- 4) Analýza vyzařovacích diagramů


Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy:  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


- [1] POZAR, D. M. Microwave Engineering, 2005, Hoboken, John Wiley & Sons.
- [2] MILLIGAN, T. A. Modern Antenna Design, 2nd ed. 2005, Hoboken, John Wiley & Sons.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.**  
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **14. prosince 2010**  
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2011**

  
prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



  
Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2011

## Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5.2011

Karel Košárek

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Vladimírovi Schejbalovi, CSc za vstřícný přístup, odborné vedení a množství rad, které přispěly k vypracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. Vítězslavovi Krčmářovi, Ph.D. a Bc. Vítovi Sádovskému z firem T-CZ a Era za pomoc při výrobě a měření antén a panu Vlastimilovi Kovaříkovi z firmy RETIA za dodání materiálu na zhotovení antén. Na závěr bych rád poděkoval rodině za podporu během celé doby studia.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá analýzou a návrhem anténní řady a vyzařovacích prvků, ze kterých je zkonstruována. V teoretické části je rozebrán princip funkce mikropáskových antén a postup jejich návrhu. Dále je v této části proveden rozbor způsobů napájení mikropáskových antén a děliče výkonu použité v plošných anténních řadách. V praktické části byly navrženy a zkonstruovány čtyři patch antény a bylo provedeno jejich měření. Na závěr byl proveden návrh plošné anténní řady včetně rozvodu energie.

## **Klíčová slova**

Patch anténa, plošná anténní řada, vyzařovací diagram, šířka pásma, Wilkinsonův dělič

## **Title**

X-band planar array antenna

## **Annotation**

This diploma thesis deals with antenna arrays analysis and design and with radiating elements of which is array constructed. The theoretical part focus on principle functions of microstrip antennas and their design process. Antenna feed types and power dividers are discussed further in this section. The practical part of thesis focus on design and construction of four patch antennas and their measurements. Design of planar antenna array was also made in this part, including power distribution.

## **Keywords**

Patch antenna, planar antenna array, pattern, bandwidth, Wilkinson power divider

## Obsah

Obsah .....	7
Seznam zkratek.....	8
Seznam symbolů.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Analýza anténních prvků.....</b>	<b>12</b>
1.1 Mikropáskové antény.....	12
1.1.1 Vyzařovací diagram mikropáskové antény .....	13
1.1.2 Šířka pásma a činitel jakosti mikropáskové antény.....	21
1.2 Obdélníková mikropásková patch anténa .....	25
1.3 Širokopásmová jednovrstvá patch anténa.....	30
<b>2 Anténní řady .....</b>	<b>32</b>
<b>3 Alternativní způsoby napájení mikropáskových antén .....</b>	<b>34</b>
<b>4 Děliče výkonu.....</b>	<b>36</b>
<b>5 Praktická realizace a měření mikropáskových antén.....</b>	<b>39</b>
5.1 Mikropásková anténa s šířkou 7mm. ....	39
5.2 Mikropásková anténa s šířkou 8mm. ....	45
5.3 Mikropásková anténa s šířkou 15mm .....	51
5.4 Širokopásmová plíšková patch anténa .....	57
<b>6 Stanovení počtu prvků anténní řady a návrh rozvodu energie .....</b>	<b>63</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>66</b>
Seznam literatury .....	68
Přílohy .....	69

## Seznam zkratk

X-POL	Cross-Polarization
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
PSV	Poměr stojatých vln
GPS	Global Positioning System
WLAN	Wireless Local Area Network
VD	Vyzařovací diagram

## Seznam symbolů

$\epsilon_r$	Relativní permitivita
H	Tloušťka podložky
W	Šířka zářiče
T	Tloušťka zářiče
L	Délka zářiče
$\Delta/H$	Prodloužení
$\epsilon_{eff}$	Efektivní permitivita
BW	Šířka pásma
$Z_0$	Impedance vedení
$\eta_{sw}$	Vypočtená účinnost antény
n	Index lomu substrátu patche
$P_r^h$	Výkon vyzářený prostorovou vlnou
$P_{SW}^h$	Výkon povrchových vln
$P_R$	Celkový výkon prostorové vlny
G	Vodivost
$R_e$	Impedance na okraji patche
$R_i$	Vstupní impedance $P_R$
VD	Vyzařovací diagram



## Seznam obrázků

Obrázek 1 Konstrukce anténní řady [7].....	12
Obrázek 2 Mikropáskové antény [1] .....	13
Obrázek 3 Rozptyl elektrického pole [2].....	15
Obrázek 4 Distribuce magnetických proudů [2].....	15
Obrázek 5 VD patche se vzduchovým substrátem [2] .....	17
Obrázek 6 VD patche se substrátem s $\epsilon_r = 2,2$ [2] .....	17
Obrázek 7 VD patche umístěného nad zemnicí rovinou o průměru $1\lambda$ [2].....	18
Obrázek 8 VD patche umístěného nad zemnicí rovinou o průměru $5\lambda$ (a) a průměru $2\lambda$ (b) [2] .....	20
Obrázek 9 Závislost šířky pásma na tloušťce substrátu a vlnové délce ve vakuu [2] .....	23
Obrázek 10 Závislost ztrát způsobených povrchovými vlnami na tloušťce substrátu [2]...	23
Obrázek 11 Napájení patche pomocí koaxiálního vedení [2].....	25
Obrázek 12 Rozložení impedance, napětí a proudu na patch anténě [7].....	27
Obrázek 13 Vliv vyzařování napájecího pinu na charakteristiku antény [2] .....	28
Obrázek 14 Graf přizpůsobení antény [2] .....	29
Obrázek 15 Smithův diagram pro patch zhotovený na dielektriku silném $0,05\lambda$ s dielektrickou konstantou 1,1 [2] .....	30
Obrázek 16 Implementace kapacitoru [2] .....	30
Obrázek 17 Širokopásmový patch [8] .....	31
Obrázek 18 Napájení pomocí koaxiálního vodiče.....	34
Obrázek 19 Napájení pomocí mikropáskového vedení.....	34
Obrázek 20 Buzení patche pomocí štěrbin [2] .....	35
Obrázek 21 Buzení patche pomocí štěrbin .....	35
Obrázek 22 Wilkinsonův dělič s rovnoměrným dělením výkonu [1] .....	36
Obrázek 23 Frekvenční odezva Wilkinsonova děliče se stejným poměrem dělení [1].....	37
Obrázek 24 Závislost PSV antény o šířce 8mm na kmitočtu .....	41
Obrázek 25 VD 7mm patche v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz.....	42
Obrázek 26 VD 7mm patche v azimutu na kmitočtu 9,6 GHz.....	43
Obrázek 27 VD 7mm patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz.....	43
Obrázek 28 VD 7mm patche v elevaci na kmitočtu 9,2 GHz .....	44
Obrázek 29 VD 7mm patche v elevaci na kmitočtu 9,6 GHz .....	44
Obrázek 30 VD 7mm patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz .....	45
Obrázek 31 Závislost PSV antény o šířce 8mm na kmitočtu .....	47
Obrázek 32 VD 8mm patche v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz.....	48
Obrázek 33 VD 8mm patche v azimutu na kmitočtu 9,6 GHz.....	48
Obrázek 34 VD 8mm patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz.....	49
Obrázek 35 VD 8mm patche v elevaci na kmitočtu 9,2 GHz .....	49
Obrázek 36 VD 8mm patche v elevaci na kmitočtu 9,6 GHz .....	50
Obrázek 37 VD 8mm patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz .....	50
Obrázek 38 Závislost PSV antény o šířce 15mm na kmitočtu .....	53

Obrázek 39 VD 15mm patche v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz.....	54
Obrázek 40 VD 15mm patche v azimutu na kmitočtu 9,6 GHz.....	54
Obrázek 41 VD 15mm patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz.....	55
Obrázek 42 VD 15mm patche v elevaci na kmitočtu 9,2 GHz .....	55
Obrázek 43 VD 15mm patche v elevaci na kmitočtu 9,6 GHz .....	56
Obrázek 44 VD 15mm patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz .....	56
Obrázek 45 Rozměry širokopásmového patche .....	57
Obrázek 47 Závislost S22 širokopásmové patch antény na kmitočtu .....	58
Obrázek 46 Graf přízpusobení širokopásmové patch antény – Smithův diagram .....	58
Obrázek 48 VD širokopásmového patche v azimutu na kmitočtu 9 GHz.....	59
Obrázek 49 VD širokopásmového patche v azimutu na kmitočtu 9,5 GHz.....	59
Obrázek 50 VD širokopásmového patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz.....	60
Obrázek 51 VD širokopásmového patche v elevaci na kmitočtu 9 GHz .....	61
Obrázek 52 VD širokopásmového patche v elevaci na kmitočtu 9,5 GHz .....	61
Obrázek 53 VD širokopásmového patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz .....	62
Obrázek 54 Vyzařovací diagram řady v azimutu na kmitočtu .....	63
Obrázek 55 Vyzařovací charakteristika řady 3D.....	64
Obrázek 56 Schematické zapojení děličů.....	65

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Směrovost patche [2].....	18
Tabulka 2 Parametry mikropáskové antény se šířkou 7mm.....	40
Tabulka 3 Závislost vypočítaného PSV7mmpatche na frekvenci .....	41
Tabulka 4 Parametry mikropáskové antény se šířkou 8mm.....	45
Tabulka 5 Závislost vypočítaného PSV8mmpatche na frekvenci .....	46
Tabulka 6 Parametry mikropáskové antény se šířkou 15mm.....	51
Tabulka 7 Závislost vypočítaného PSV15mmpatche na frekvenci .....	52

## Úvod

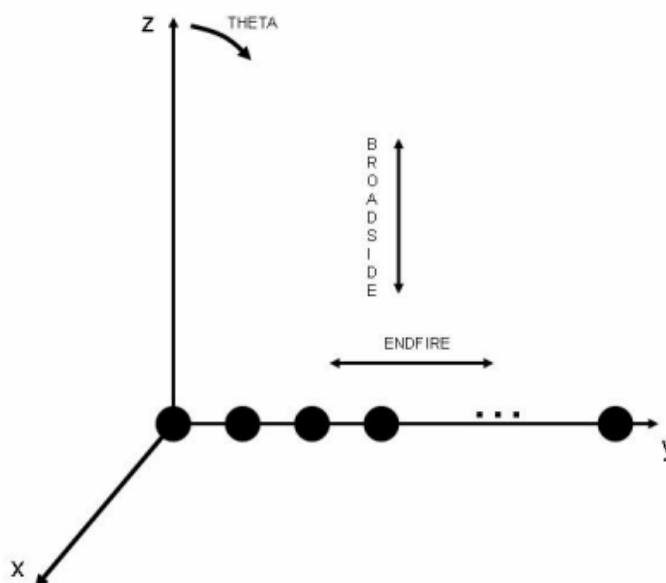
Pro některé aplikace nemají jednoprvkové antény dostatečný zisk nebo vhodný vyzařovací diagram. Spojením několika anténních prvků do takzvané anténní řady může být řešením daného problému. Prvky mohou být uspořádány tak, že vytvoří jedno nebo vícedimenzionální anténní pole. Každý anténní prvek má svou vyzařovací charakteristiku a celková vyzařovací charakteristika se mění, pokud spojíme několik takových prvků do jedné anténní řady. Anténní řady mohou být konstruovány pomocí různých vyzařovacích prvků, jako jsou například drátové antény, štěrby, tištěné dipóly nebo mikropáskové antény.

Hlavním cílem teoretické části této práce je analýza a návrh anténních prvků, konkrétně mikropáskových antén, což bude provedeno v kapitolách 2 až 4. Ve 3. kapitole bude rozebrán vyzařovací diagram, šířka pásma a činitel jakosti mikropáskové antény. V této kapitole budou také uvedeny vztahy pro návrh antény a metody přizpůsobení napájecí sondy. Klasické mikropáskové antény jsou poměrně úzkopásmové a proto dochází k vývoji různých způsobů rozšíření přenášeného pásma. Jeden model širokopásmové antény bude představen v kapitole 4. V kapitolách 5 a 6 bude pojednáno o anténních řadách a různých způsobech napájení mikropáskových antén a v závěru teoretické části práce budou zmíněny děliče výkonu pro anténní řady.

Hlavním cílem praktické části je zkonstruování několika typů patch antén a měření jejich charakteristik. Měření jsou zaměřena na vyzařovací charakteristiky, přizpůsobení a zisk antén a jsou provedena v bezodrazové komoře. Tato měření jsou uvedena a okomentována v 8. kapitole. Poslední 9. kapitola se zabývá stanovením počtu prvků anténní řady a je zde také uveden návrh rozvodu energie k jednotlivým prvkům.

# 1 Analýza anténních prvků

Anténní řady mohou být navrženy tak, aby vyzařovaly jako broadside nebo end-fire, tedy maximální zisk bude buď ve směru kolmém na plochu anténní řady, nebo bude maximální v ose anténní řady. Jak již bylo zmíněno v úvodu, anténní řady mohou být konstruovány pomocí různých vyzařovacích prvků, jako jsou například drátové antény, štěrby, tištěné dipóly nebo mikropáskové antény. Některé z těchto anténních prvků mohou být velmi výhodné z určitého úhlu pohledu, avšak mohou mít také celou řadu nevýhod. Mikropáskové anténní prvky jsou dobře známé pro jejich velice žádané fyzikální charakteristiky, jakou jsou například tenký profil, malá hmotnost, nízké náklady, tuhost, a možnost přizpůsobení tvaru povrchu tělesa, kam se budou montovat, čímž mohou být zároveň velmi nenápadné. Na druhé straně mají jednoduché mikropáskové antény různé nevýhody, jako je úzké frekvenční pásmo, parazitní vyzařování z napájecích vedení, vyšší úroveň příčné polarizace a nízká anténní účinnost, která značně závisí na permitivitě a tloušťce substrátu.



Obrázek 1 Konstrukce anténní řady [7]

## 1.1 Mikropáskové antény

Mikropáskové antény (často nazývané patch antény) jsou hojně používány v mikrovlnné technice kvůli jejich jednoduchosti a kompatibilitě s technologií tištěných spojů. Tuto technologii můžeme využít k vyleptání antény na vhodný podklad a tím můžeme produkovat levné, úzkoprofilové antény, jejichž výroba je lehce opakovatelná.

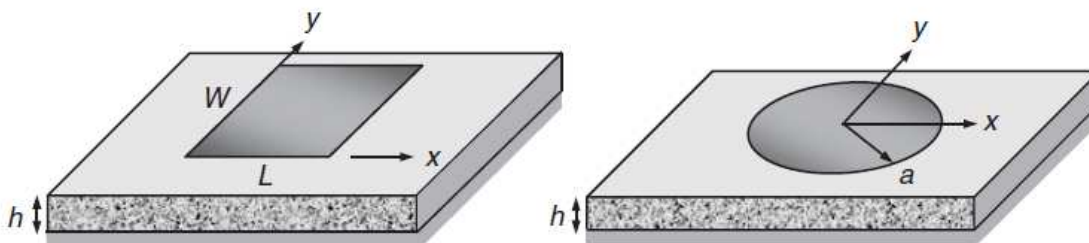
Anténa zhotovená na vhodném podkladu vydrží velké otřesy a tak není problém s jejím využitím v prostředích, kde se často vyskytují vibrace. Výrobci základnových stanic pro mobilní komunikace často vyrábí antény z kusu plechu a připevňují je různými způsoby přímo na nevodivé sloupky nebo pěnu za účelem snížení výdajů za nevodivý substrát a leptání antén. Tento způsob montáže antén také eliminuje problém s povrchovým vybušením vln při použití tlustých substrátů, které se používají pro zvětšení šířky pásma antény. [2]

Anténní pole mohou být na substrát vyleptány fotocestou, zároveň s jejich napájecí sítí, která se dá zhotovit pomocí mikropáskového vedení. Mikropásek poskytuje jednoduché spojení s aktivními zařízeními a dovoluje umístění předzesilovačů nebo distribuovaných vysílačů hned vedle anténních prvků. Mikropásek se skládá z kovového proužku umístěného na dielektrickém podkladu, který je z druhé strany pokrytý zemnicí rovinou. Mikropásek, například uvnitř přijímače, mívá také druhé stínění, které zabraňuje vzájemnému ovlivňování obvodů. [2]

Návrháři zvyšují šířku pásma antény tak, že například spojí několik patchů do jedné roviny nebo použitím vnitřních štěrbin nebo apertur. Těchto několik rezonátorů zvýší šířku pásma a v nejlepším případě bude anténa vyzařovat stejným způsobem.

### 1.1.1 Vyzařovací diagram mikropáskové antény

Malá velikost mikropáskové antény limituje možnosti řízení jejího vyzařovacího diagramu a proto musíme sdružovat patche do anténních polí. Obdélník nebo kruh jsou nejčastěji používané tvary mikropáskových antén a oba mají podobné vyzařovací charakteristiky.

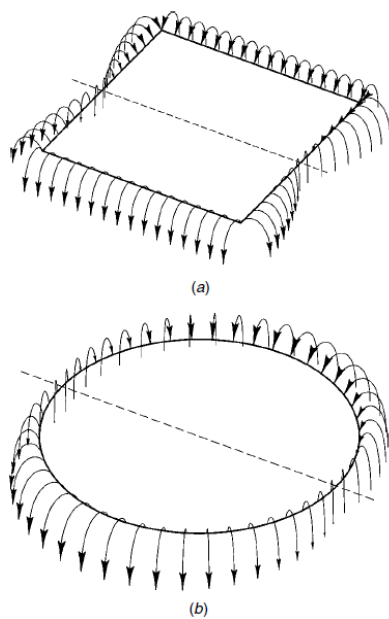


Obrázek 2 Mikropáskové antény [1]

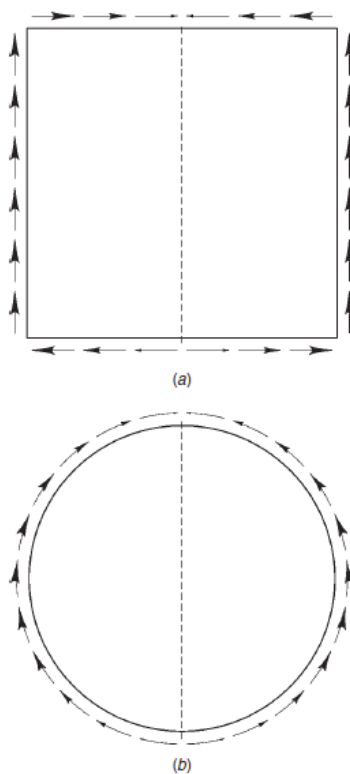
Antény tvořené spojením koplanárních patchů, za účelem rozšíření impedanční šířky pásma, budou vyzařovat v užších svazcích, ale základní patch má poměrně široký vyzařovací diagram. Pokud tedy sdružíme několik patchů do jedné roviny, můžeme očekávat, že se svazek začne zužovat nebo bude měnit svůj tvar, jelikož se směs vidů na jednotlivých zářičích začne měnit napříč použitým frekvenčním spektrem.

Patche se skládají z kovových plíšků zavěšených nad velkými zemními rovinami. Elektrické proudy protékají okolo antény zářičem a zemní destičkou a tyto elementy pak vyzařují. Pokud použijeme k buzení antény vertikální sondy, které poté napájíme z koaxiálního vedení, musíme navíc k výslednému vyzařovacímu diagramu přičíst záření sondy způsobené protékajícími proudy. Velikost antény můžeme redukovat přidáním vertikálních „zkracovacích“ plíšků [2] (čtvrt-vlnné patche) nebo zkratovacími piny umístěnými poblíž napájecího pinu a také všechny tyto elementy budou ovlivňovat výslednou anténní charakteristiku.

Problém výpočtu vyzařovací charakteristiky antény můžeme zjednodušit použitím magnetického pole vznikajícího podél okrajů. Obrázek 3 znázorňuje rozptyl elektrického pole okolo okrajů čtvercové a kruhové patch antény vybuzené vlnou s nejnižším videm. Velikosti šipek indikují amplitudu pole. Čtvercový patch má téměř uniformní pole podél dvou okrajů, které se označují jako šířka patche. Pole na zbývajících dvou okrajích mají sinusoidální tvar a tyto okraje jsou označovány jako délka patche. Pokud bychom patch rozdělili pomyslnou rovinou na dvě stejně velké části, jako je naznačeno čárkovanou čarou v obrázku, zjistíme, že se elektrické pole ztrácí podél této roviny v místech, kde rovina protíná okraje patche. Elektrická pole na okrajích rovnoběžných s pomyslnou rovinou mají obrácený směr, zatímco na okrajích kolmých na pomyslnou rovinu mají pole stejnou orientaci. Distribuce rozptylové pole u kruhového patche se mění podle  $\cos \Phi$ , kde  $\Phi$  je úhel podél okraje a je měřený od maxima elektrického pole.



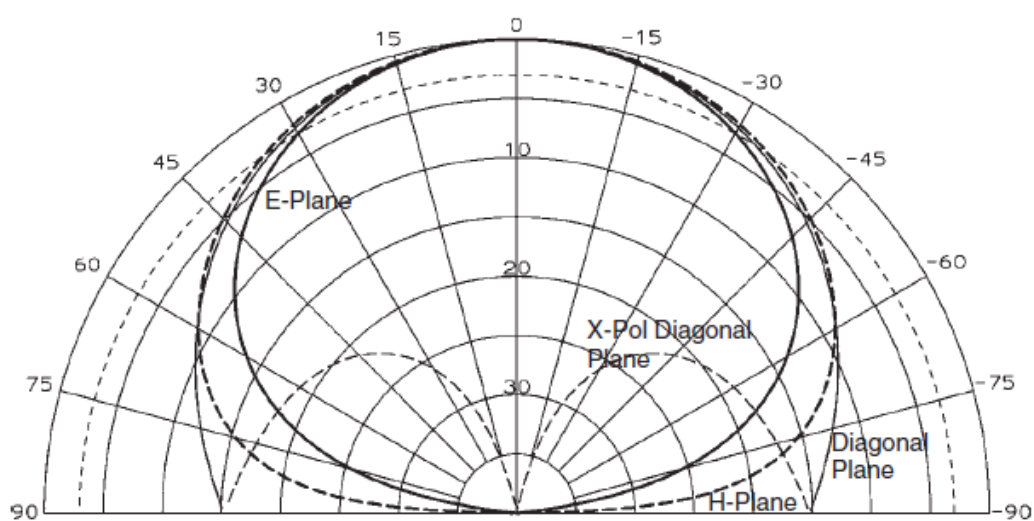
Obrázek 3 Rozptyl elektrického pole [2]



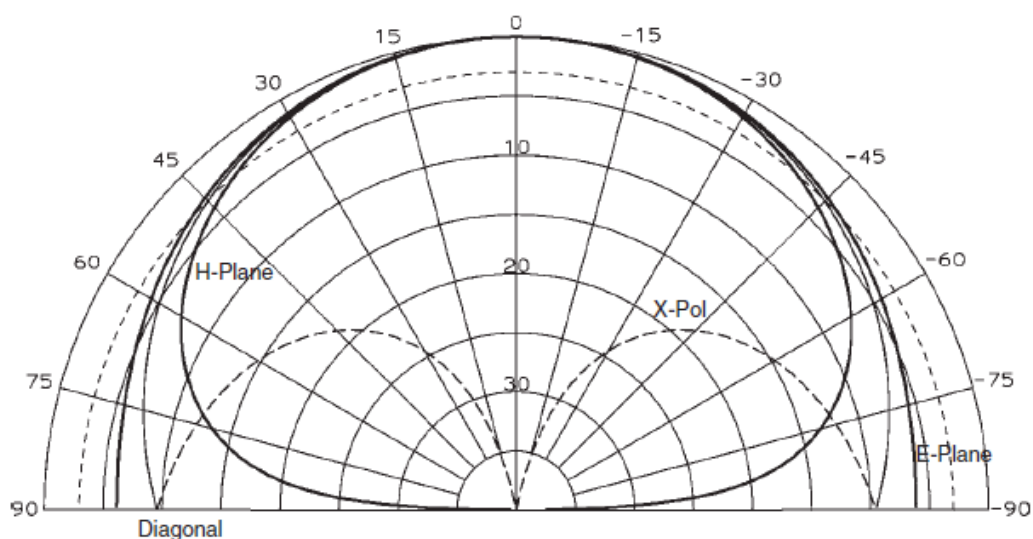
Obrázek 4 Distribuce magnetických proudů [2]

Pro analýzu vyzařovací charakteristiky můžeme magnetické proudy, nalezené podle rozptylových polí, nahradit elektrickými proudy protékajícími zářičem a zemnicí rovinou. Obrázek 4 znázorňuje distribuci magnetických proudů okolo okrajů zářiče. Velikost šipky opět indikuje amplitudu proudu. Použitím magnetických toků po obvodu antény můžeme převést výpočet vyzařovacího diagramu patche na výpočet ekvivalentní štěrbin. Dvouprvková anténní řada, vytvořená ze štěrbin s ekvivalentními rovnoměrnými magnetickými toky, vytváří stejné elektrické pole, jako obdélníkový patch. Při použití vidů prvního řádu jsou štěrbiny vzdáleny  $\lambda/2\sqrt{\epsilon_r}$  [2] a tak můžeme vypočítat vyzařovací charakteristiku ekvivalentní dvouprvkové řady. Magnetické toky podél délky zářiče se navzájem ze strany na stranu vyruší. Délka štěrbin určuje vyzařovací charakteristiku v rovině H a tato charakteristika má stejný tvar, jako charakteristika dipolu v E rovině. Obrázek 5. zobrazuje charakteristiku patche zavěšeného nad nekonečnou zemnicí rovinou a používajícího vzduch, jako dielektrikum. Anténní řada, tvořená dvěma štěrbinami, generuje nulu v E-rovině, protože jsou elementy vzdáleny  $\lambda/2$  [2]. H-rovina, která je v obrázku naznačena přerušovanou čarou, obsahuje nulu kvůli polarizaci štěrbin. Na obrázku je také zakreslena příčná polarizace, která je způsobena kombinací oddělených magnetických toků vznikajících podél délky zářiče a nevyrovnanou šířkou paprsku v hlavních rovinách. Představme si situaci, kdy se při návrhu mikropáskové antény snažíme zmenšit její rozměry. Tím k sobě přibližujeme dvě štěrbinu a to v důsledku způsobí rozšíření vyzařovací charakteristiky v E-rovině. Obrázek 6 zobrazuje vyzařovací diagram patche navrženého pro substrát s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 2,2$ . Rovina H si zachovává svoji nulu podél zemnicí roviny. Příčná polarizace v diagonální rovině vzroste z důvodu většího rozdílu v šířkách vyzařovacích charakteristik v rovinách E a H.





Obrázek 5 VD patche se vzduchovým substrátem [2]

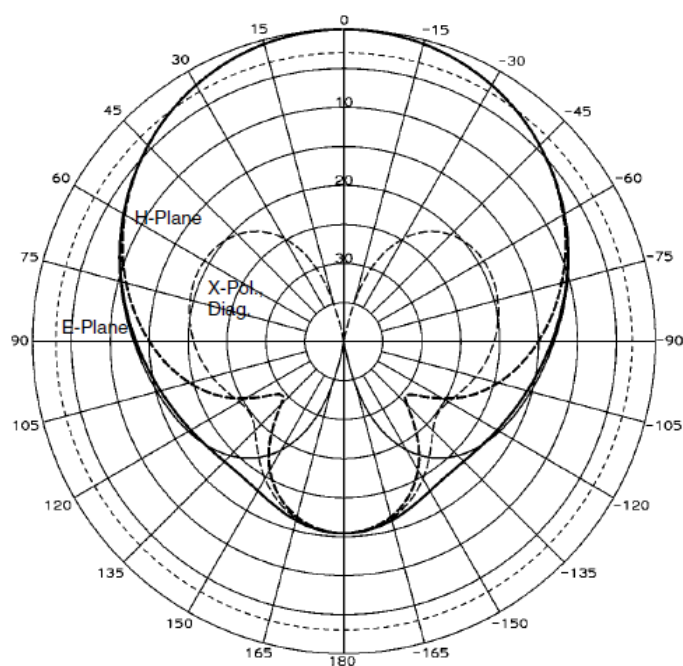


Obrázek 6 VD patche se substrátem s  $\epsilon_r = 2,2$  [2]

Tabulka 1 udává směrovost čtvercového a kruhového patche umístěného nad nekonečnou zemnicí rovinou vypočítanou z vyzářovací charakteristiky. Rozsah směrovosti patche je omezený. Zvětšením šířky obdélníkového patche dojde k zúžení šířky svazku v rovině H a tím se zvýší směrovost.

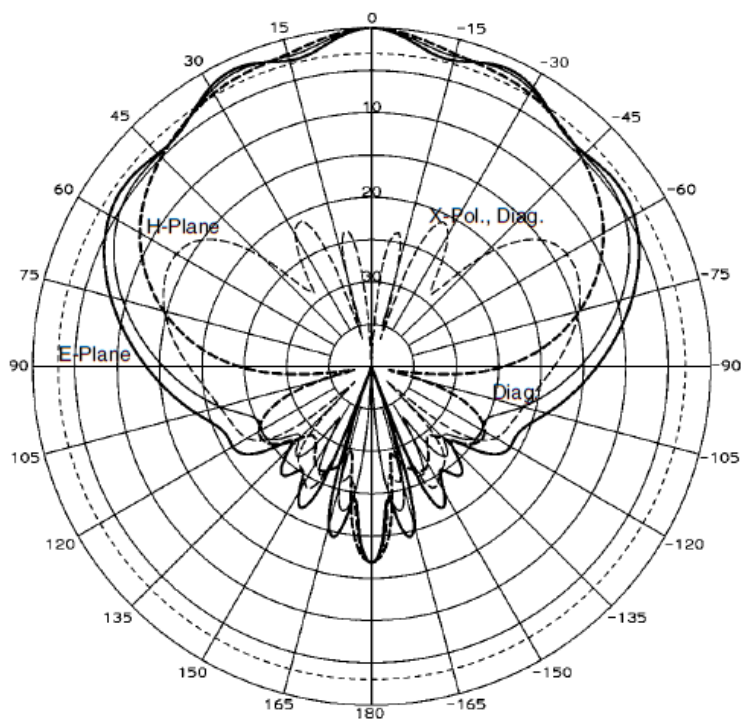
Tabulka 1 Směrovost patche [2]

Dielektrická konstanta	Čtvercový patch (dB)	Kruhový patch (dB)
1	8,4	9,8
2	7,7	7,6
3	7,2	6,7
4	7,0	6,2
6	6,7	5,8
8	6,5	5,5
10	6,4	5,4
16	6,3	5,1

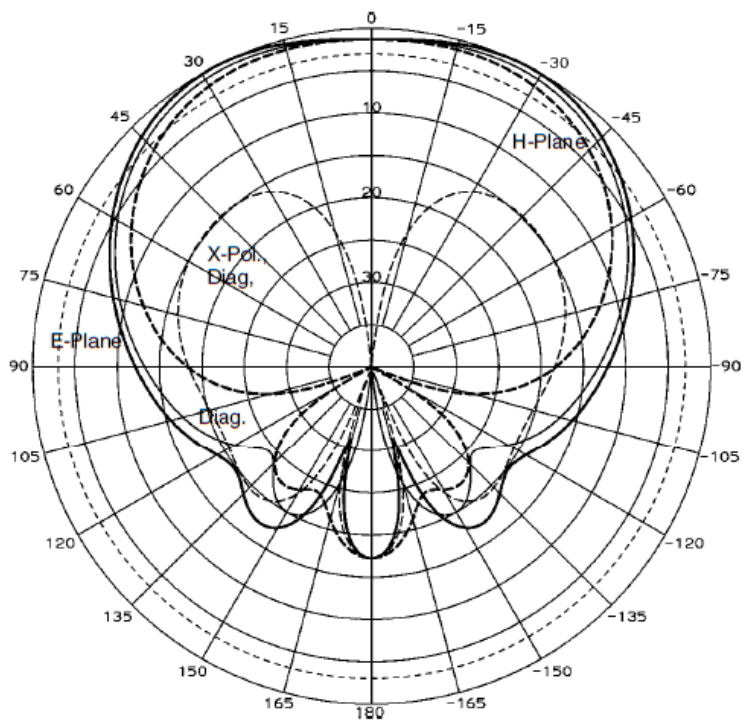


Obrázek 7 VD patche umístěného nad zemnicí rovinou o průměru  $1\lambda$  [2]

Obrázky 7-8 znázorňují charakteristiku čtvercového patche zhotoveného na substrátu s dielektrickou konstantou 2.21, který byl umístěný na kruhové zemní rovině o průměru  $5\lambda$ ,  $2\lambda$  a  $1\lambda$ . Při použití roviny o průměru  $5\lambda$  dochází k zvlnění vyzařovacího diagramu z důvodu přičítání okrajových difrakcí [2]. Dále je z vyzařovacích diagramů patrné, že při použití větší zemní roviny dochází k zmenšování úhlové vzdálenosti mezi jednotlivými laloky v zadním směru antény. Pro poloměry  $2\lambda$  a  $1\lambda$  dojde k významnému rozšíření charakteristiky v H-rovině, jelikož limitovaná zemní rovina již nadále nedokáže podporovat proudy, díky kterým okraje patche vyzařují jako štěrby. Ačkoli jsou šířky svazků v rovinách E i H téměř shodné pro patch se zemní rovinou  $2\lambda$  i pro patch umístěný nad nekonečně velkou rovinou, příčná polarizace vzrůstá u patche s nekonečnou zemní rovinou. Co se týče porovnání výkonů, má patch s rovinou  $1\lambda$  výkon větší o přibližně 1dB, než patch umístěný nad nekonečně velkou rovinou. Je to způsobeno tím, že se okrajové difrakce konstruktivně přičítají a výsledná šířka svazku se zužuje. [2]



(a)



(b)

Obrázek 8 VD patche umístěného nad zemnicí rovinou o průměru  $5\lambda$  (a) a průměru  $2\lambda$  (b) [2]

### 1.1.2 Šířka pásma a činitel jakosti mikropáskové antény

Anténní účinnost nejvíce ovlivňuje permitivita a tloušťka substrátu. Čím větší bude permitivita podkladu nebo čím větší bude tloušťka podkladu, tím více bude docházet k povrchovému vybuzení vln a tím bude klesat účinnost. Na druhou stranu, pokud bude substrát příliš tenký, bude efektivita klesat z důvodů vodivostních a dielektrických ztrát. [2] Šířka pásma závisí přímo úměrně na tloušťce substrátu a nepřímo úměrně na permitivitě substrátu. Čili větší šířky pásma dosáhneme použitím tlustších substrátů s nízkou permitivitou.

Mikropáskové antény vyzařují díky elektrickým proudům indukovaným na patchi, nebo analogicky magnetickým tokům okolo obvodu patche, a povrchovým vlnám indukovaným v dielektrické destičce. Rozptylové pole mezi patchem a zemnicí rovinou lehce vybudí povrchovou TM vlnu nejnižšího řádu, která začne vyzařovat, jakmile dorazí na okraj substrátu a toto vyzařování následně přispívá k normálnímu záření patche. Celkově jsou tedy povrchové vlny nežádoucí a jimi způsobené záření můžeme řídit například omezením plochy substrátu. Se vzrůstající šířkou substrátu a dielektrickou konstantou vzrůstá také energie povrchových vln. Do výpočtu impedanční šířky pásma mikropáskové antény musíme zahrnout jak přímo vyzářenou energii, tak energii vyzářenou povrchovými vlnami. Ve většině případů bereme záření způsobené povrchovými vlnami tak, že snižuje celkovou efektivitu vyzařování, ale u samostatného patche se substrátem s omezenou plochou se toto nežádoucí záření může projevit naopak konstruktivně. Povrchové vlny můžeme eliminovat použitím patche zhotoveného z kovového plíšku a zvolením vzduchu nebo lehkých pěnových materiálů jako dielektrika. Povrchové vlny jsou omezeny dielektrikem podobně jako kteroukoli jinou přenosovou linkou až na to, že pole exponenciálně slábne ve směru normály k povrchu a jelikož jsou vybuzeny podél okrajů patche majících konečnou délku, šíří se tyto vlny v horizontální rovině. Záření se šíří prostorem jako dvou dimenzionální vlna a pole slábne podle  $1/\sqrt{r}$ , kde  $r$  je horizontální vzdálenost od okraje. [2]

Byly odvozeny jednoduché vztahy pro výpočet impedanční šířky pásma, které zahrnují ztráty způsobené povrchovými vlnami. Jelikož mohou být substráty zároveň elektrické a magnetické, byl definován index lomu substrátu patche, který zahrnuje oba parametry [2]:  $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ . Myšlenka spočívá v tom, že poměr prostorové vlny a povrchové vlny může být nalezen pro jakoukoli malou anténu připevněnou k substrátu a pak může být tento poměr vztažen k patch anténě. Integrovaním hustoty energie vyzářené z horizontálního Hertzova dipólu umístěného ve výšce rovné tloušťce substrátu nad

zemnicí rovinou získáme výkon v uzavřené formě vyzářený prostorovou vlnou, který je daný tloušťkou substrátu  $h$  a konstantou šíření ve volném prostoru  $k$ :

$$P_r^h \cong k^2(kh)^2 \cdot 20\mu_r^2 C_1 \quad (2.1)$$

$$C_1 = 1 - \frac{1}{n^2} + \frac{0,4}{n^4} \quad (2.2)$$

Výkon povrchových vln vybuzených v substrátu pomocí Hertzova dipólu můžeme zjednodušit, pokud je substrát tenký:

$$P_{SW}^h = k^2(kh)^3 \cdot 15\pi\mu_r^3 \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)^3 \quad (2.3)$$

Efektivitu záření povrchových vln lze vyjádřit jako poměr vyzářeného výkonu k celkovému výkonu:

$$n_{SW} = \frac{P_r^h}{P_R^h + P_{SW}^h} = \frac{4C_1}{4C_1 + 3\pi kh\mu_r(1 - 1/n^2)^3} \quad (2.4)$$

Celkový výkon prostorové vlny vyzářené patchem získáme integrováním povrchových proudů tekoucích patchem:

$$P_R = P_R^h m_{eq}^2 = P_R^h \left( \iint_S J_S dx dy \right)^2 \quad (2.5)$$

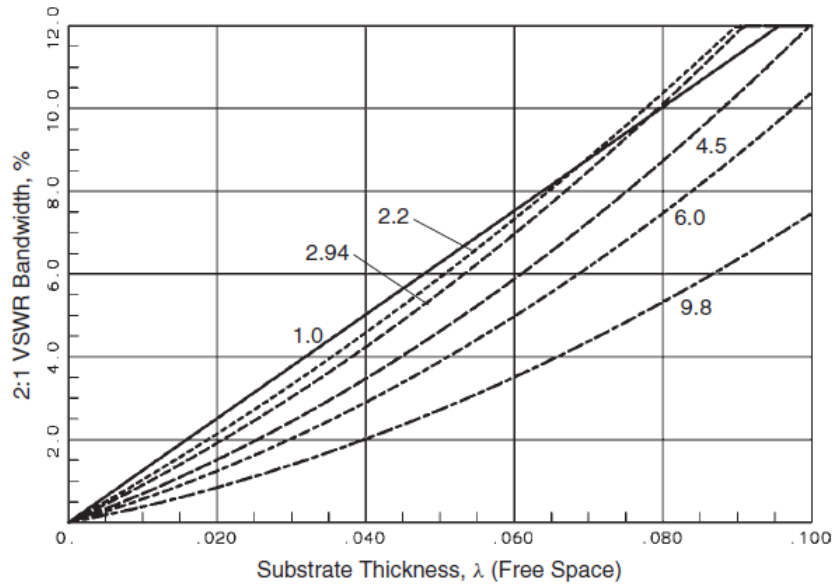
Pro obdélníkový patch může být vztah  $P_R$  ku  $P_R^h m_{eq}^2$  aproximován jednodušším vztahem, který je dán délkou rezonátoru  $L$ , šířkou  $W$  a konstantou šíření  $k$ :

$$p = 1 - \frac{0,16605(kW)^2}{20} + \frac{0,02283(kW)^4}{560} - \frac{0,09142(kL)^2}{10} \quad (2.6)$$

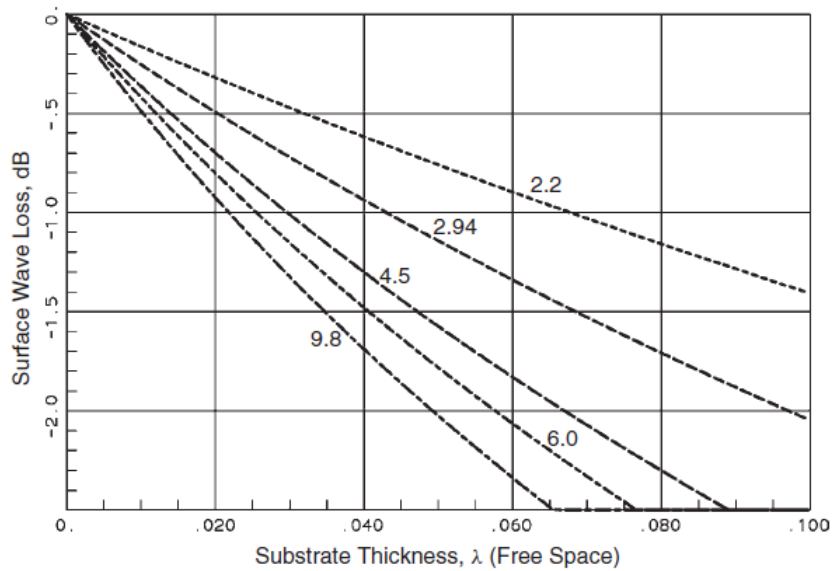
Poměr mezi maximem a minimem napětí 2 : 1 (VSWR - Voltage Standing Wave Ratio) obdélníkového patche je závislý na činiteli jakosti  $Q$ , který zahrnuje záření způsobené povrchovými i prostorovými vlnami:

$$BW = \frac{1}{\sqrt{2}Q} = \frac{16C_1 p}{3\sqrt{2}\eta_{SW}} \frac{1}{\epsilon_r} \frac{h}{\lambda_0} \frac{W}{L} \quad (2.7)$$

Obrázek 9 znázorňuje závislost šířky pásma pro PSV 2:1 na tloušťce substrátu a vlnové délce ve vakuu, z obrázku 10 je pak patrné, že vyzařování způsobené povrchovými vlnami se stává značnou součástí celkového záření při nárůstu šířky substrátu nebo dielektrické konstanty.



Obrázek 9 Závislost šířky pásma na tloušťce substrátu a vlnové délce ve vakuu [2]



Obrázek 10 Závislost ztrát způsobených povrchovými vlnami na tloušťce substrátu [2]

Máme-li mikropáskovou anténu tvořenou pouze jedním rezonátorem, můžeme šířku pásma vypočítat také ze znalosti  $VSWR$  a  $Q$ :

$$BW = \frac{(VSWR - 1)}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (2.8)$$

Faktor jakosti  $Q$  je další způsob vyjádření efektivnosti a je tvořen kombinací vyzařování prostorové vlny  $Q_R$  a povrchové vlny  $Q_{SW}$ :

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{rad}} = \frac{1}{Q_R} + \frac{1}{Q_{SW}} = \frac{P_R + P_{SW}}{\omega W_T} \quad (2.9)$$

$W_T$  je energie akumulovaná v patchi a v povrchové vlně a  $\omega = 2\pi f$  je úhlová frekvence. Vztah pro efektivitu záření povrchových vln lze vyjádřit také pomocí  $Q$ :

$$\eta_{SW} = \frac{Q}{Q_R} = \frac{Q_{rad}}{Q_R} \quad (2.9)$$

Vyzařování způsobené povrchovými vlnami neuvažujeme jako rozptylové ztráty, ale jako potenciaálně nekontrolovatelné záření. Dielektrické a vodivostní ztráty sice zvyšují impedanční šířku pásma patch antény, ale snižují její zisk. Tyto ztráty se vyjadřují pomocí  $Q_d$  a  $Q_c$  a po jejich určení bude možné vypočítat efektivitu patch antény:

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.10)$$

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma} \quad (2.11)$$

Kde  $\tan \delta$  je ztrátový úhel, který vyjadřuje ztráty v dielektriku a  $\sigma$  je měrná vodivost patche. Celkový činitel jakosti  $Q_T$  je pak dán součtem převrácených hodnot:

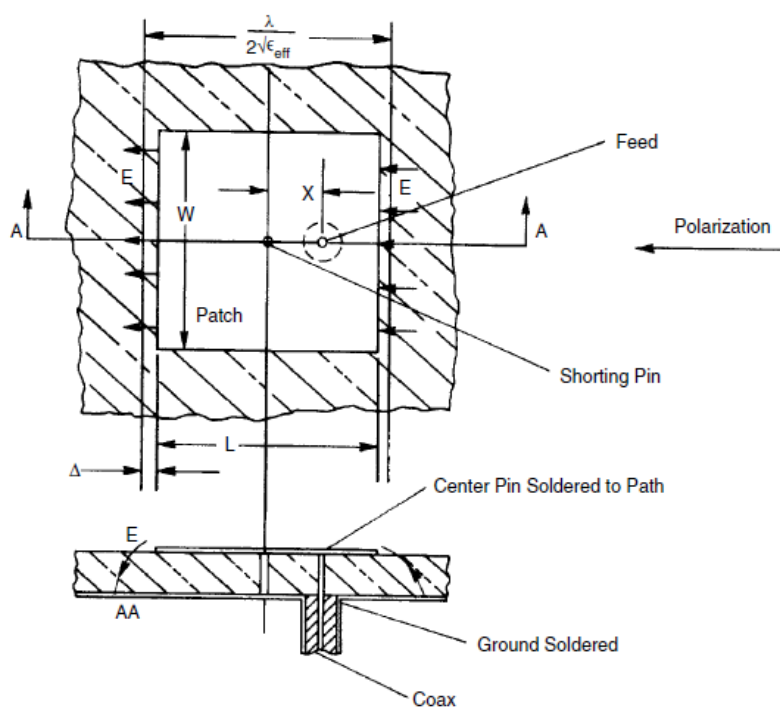
$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_R} + \frac{1}{Q_{SW}} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} \quad (2.12)$$

Pokud se pokusíme vyrobit patch anténu na tenkém substrátu,  $Q_d$  a  $Q_c$  způsobí pokles efektivitu vyzařování, ale impedanční šířka pásma vzroste díky rozptylům vzniklým uvnitř mikropáskové antény. Všechny vztahy uvedené v této kapitole byly převzaty z [2].



## 1.2 Obdélníková mikropásková patch anténa

V této části budou uvedeny vztahy pro návrh obdélníkové mikropáskové antény. Tyto vztahy se dají použít pro konstrukci jednovrstvého patche, avšak v praxi se pro návrhy těchto antén používají profesionální komerční nástroje, u kterých odpadá nutnost provádět drobné úpravy na již zhotovených mikropáscích v podobě doladování rozměrů, které se provádí například tak, že se nožem odstraňují malé části kovové folie. Antény mohou být také vyráběny s laditelnými prvky, avšak práce potřebná k jejich naladění zvyšuje výslednou cenu produktu. Laditelné prvky se také nehodí pro anténní řady, u kterých není dobrý přístup k vstupním portům jednotlivých antén. Metody typu „odříznutí a vyzkoušení“ se navíc stávají poměrně obtížnými, pokud se rozhodneme přidat další vrstvy antény za účelem zvýšení šířky pásma, takže jediným východiskem je použití numerických metod.



Obrázek11 Napájení patche pomocí koaxiálního vedení [2]

Obdélníkové patch antény mohou být navrhovány pomocí modelu přenosového vedení, který je vhodný pro antény se střední šířkou pásma. Patche se šířkou pásma menší než 1% nebo větší než 4% vyžadují dutinovou analýzu pro dosažení přesných výsledků, avšak model přenosového vedení je schopen pokrýt většinu návrhů. Anténa bude vyzařovat

vlnu  $TM_{10}$  s nejnižším videm, pokud bude délka patche rovna polovině vlnové délky [2]. Na obrázku 11 je patch, který je zesponu napájen koaxiálním vedením.

Z rozptylových polí dochází k vyzařování a tyto pole prodlužují efektivní otevřený okruh za okraje patche. Prodloužení lze určit podle [2]:

$$\frac{\Delta}{H} = 0,412 \frac{\varepsilon_{eff} + 0,300}{\varepsilon_{eff} - 0,258} \cdot \frac{W/H + 0,262}{W/H + 0,813} \quad (2.13)$$

Kde  $H$  značí tloušťku substrátu,  $W$  udává šířku nerezonanční strany patche a  $\varepsilon_{eff}$  je efektivní dielektrická konstanta mikropáskového vedení, které má stejnou šířku, jako patch. Tato konstanta může být zjednodušeně vyjádřena [2]:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10H}{W}\right)^{-1/2} \quad (2.14)$$

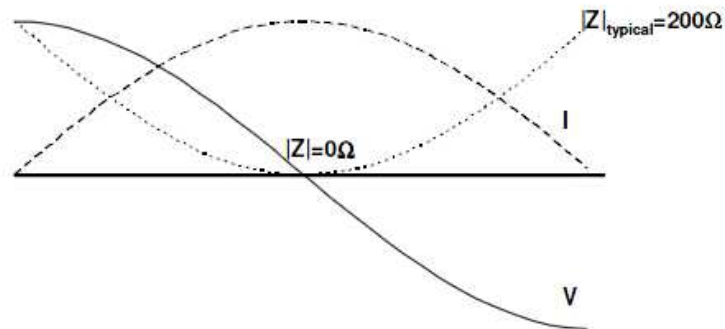
Kde  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita substrátu. Model přenosového vedení představuje patch jako nízko-impedanční mikropáskové vedení, jehož šířku určuje impedance a efektivní dielektrická konstanta.

Pokud známe činitel zkrácení, efektivní dielektrickou konstantu a relativní permitivitu substrátu, můžeme určit šířku  $W$  a délku  $L$  patche podle [2]:

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.15)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\varepsilon_{eff}}} - 2\Delta \quad (2.16)$$

Impedance antény se mění v závislosti na poloze napájecího pinu v rozsahu od  $0 \Omega$  ve středu patche do mezní hodnoty impedance  $R_e$  na okraji patche (obrázek 12).



Obrázek 12 Rozložení impedance, napětí a proudu na patch anténě [7]

Přibližně se tato změna dá vyjádřit podle vztahu [2]:

$$R_i = R_e \sin^2 \frac{\pi x}{L} \quad (2.17)$$

$$0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (2.18)$$

Kde  $R_i$  je vstupní impedance a  $x$  je vzdálenost od středu patche. Impedance  $R_e$  na okraji patche se dá určit podle následujících vztahů [2]:

$$G = \frac{\pi W}{120\pi_0} \left[ 1 - \frac{(kh)^2}{24} \right] \quad (2.19)$$

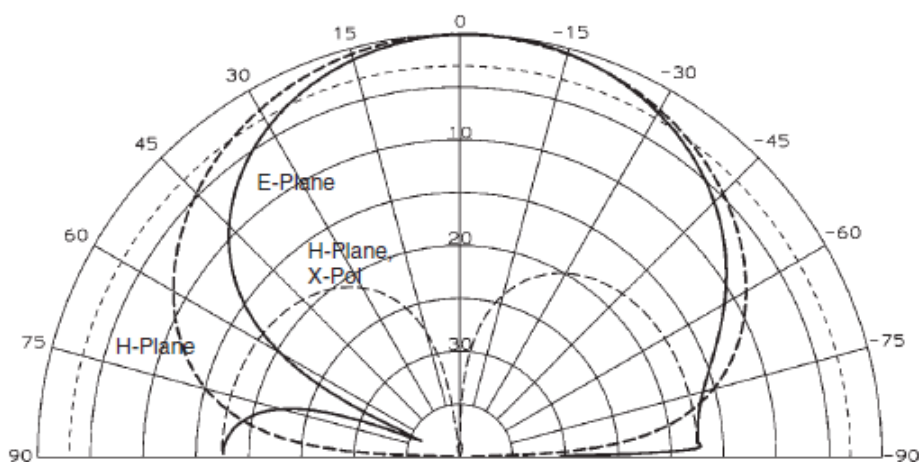
$$R_e = \frac{1}{2G} \quad (2.20)$$

Kde  $G$  je vodivost strany  $W$  patche. Při návrhu si zvolíme takovou vstupní impedanci  $R_i$ , která nám bude vyhovovat (nejčastěji 50 nebo 100Ω), a podle té nalezneme polohu napájecího bodu [2]:

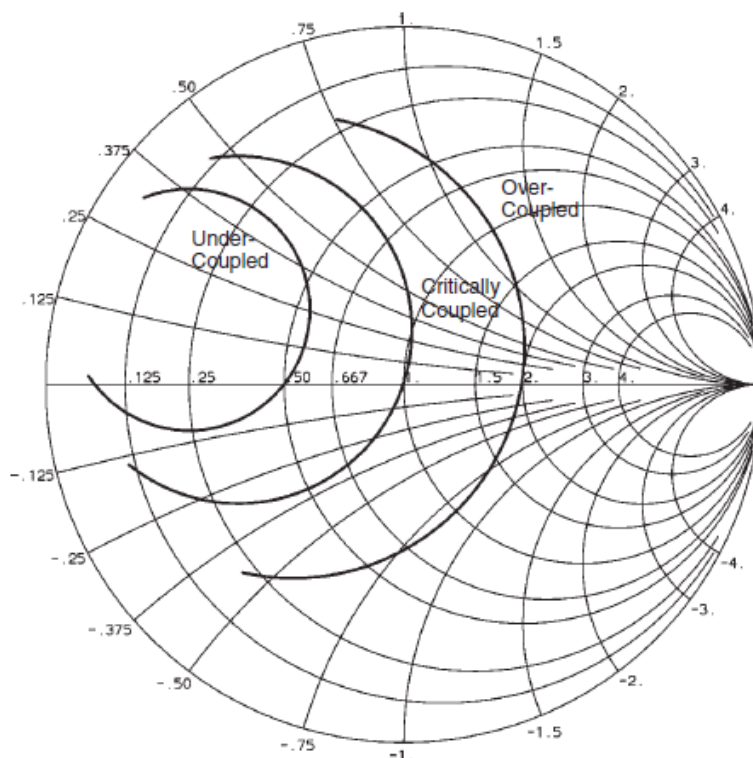
$$x = \frac{L}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{\frac{R_i}{R_e}} \quad (2.21)$$

Proudy tekoucí napájecím pinem způsobí, že tento pin bude vyzařovat jako monopól a toto vyzařování se bude přičítat k vyzařovacímu diagramu antény. Obrázek 13 zobrazuje tuto situaci. Patch by normálně nevyzařoval podél zemnicí roviny v rovině E, ale z důvodu vyzařování napájecího pinu dojde ke zkruslení výsledného diagramu. Na jedné

straně se vyzařování sčítá a na druhé se odečítá od diagramu v E rovině. Rovina H nyní obsahuje příčnou polarizaci. Vyzařování napájecího pinu můžeme redukovat přidáním druhého napájecího pinu, který bude na protější polovině patche ve stejné vzdálenosti od středu, jako původní napájení [2]. Tento způsob vyžaduje externí napájecí síť, která výkon rovnoměrně rozdělí mezi dva porty s fázovým posunem  $180^\circ$ . Problém takto uspořádaného napájení je ten, že významná část výkonu je vázána mezi dva přívody ekvivalentního mikrovlnného obvodu patche a tím dochází ke snížení jeho účinnosti. Napájecí sonda, která prochází skrz substrát, se chová jako by k ní byla sériově připojena cívka. Pod rezonančním kmitočtem má anténa induktivní charakter a její odpor je téměř nulový. S rostoucím kmitočtem dojde k přibližování se k paralelní resonanci a indukance a odpor začnou vzrůstat. Při kmitočtech vyšších, než je rezonanční kmitočet, má anténa kapacitní charakter. Toto chování odpovídá pohybu impedance po Smithově diagramu ve směru hodinových ručiček (obrázek 14). Zvyšování vstupního odporu posouváním napájecího bodu způsobí nárůst křivky rezonanční frekvence. Křivka v levé části bývá označována jako podkriticky spřažená, jelikož se neuzavírá přes střed Smithova diagramu, a křivky uprostřed a v pravé části označujeme jako kriticky a nadkriticky spřažené.

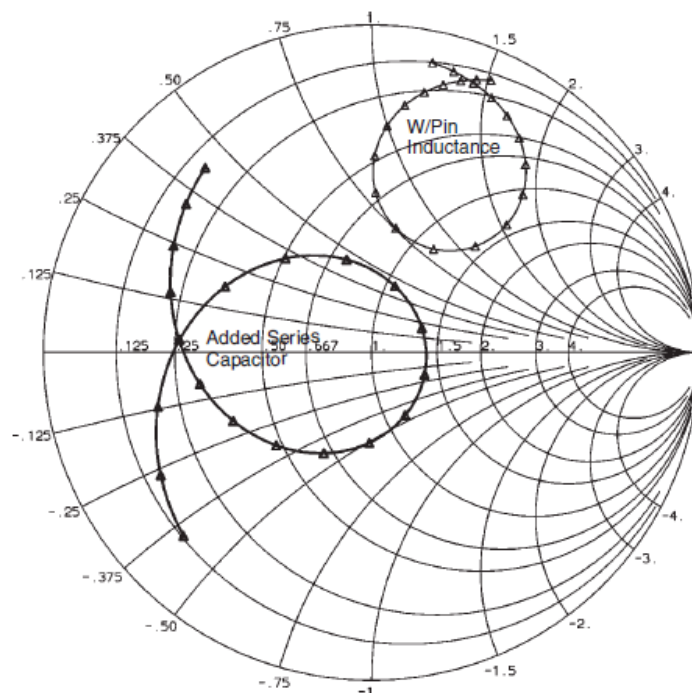


Obrázek 13 Vliv vyzařování napájecího pinu na charakteristiku antény [2]

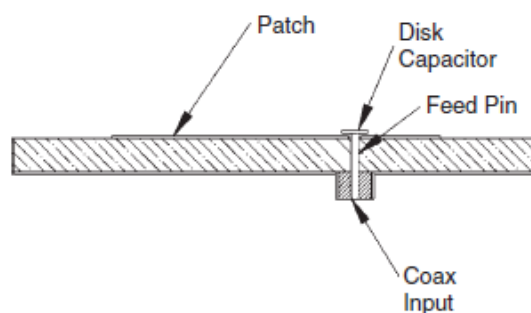


Obrázek 14 Graf přizpůsobení antény [2]

Na obrázku 15 je zachycen diagram pro patch zhotovený na dielektriku silném  $0,05\lambda$  s dielektrickou konstantou 1,1, který zahrnuje induktanci napájecího pinu. Křivka odezvy leží nad reálnou osou a nikdy ji neprotíná, má tedy stále induktivní charakter. Tuto odezvu můžeme vyladit pomocí sériového kapacitoru s reaktancí  $-j50$  uprostřed kmitočtového rozsahu [2]. Tím se charakteristika stane nadkriticky spřaženou a začne se stáčet okolo středu Smithova diagramu. Obrázek 16 zachycuje implementaci kapacitoru v podobě destičky připojené na konec napájecího vedení. Napájecí vedení prochází otvorem v zářiči, takže napájení probíhá přes kapacitor, který může být také umístěný pod patchem na odděleném substrátu.



Obrázek 15 Smithův diagram pro patch zhotovený na dielektriku silném  $0,05\lambda$  s dielektrickou konstantou 1,1 [2]

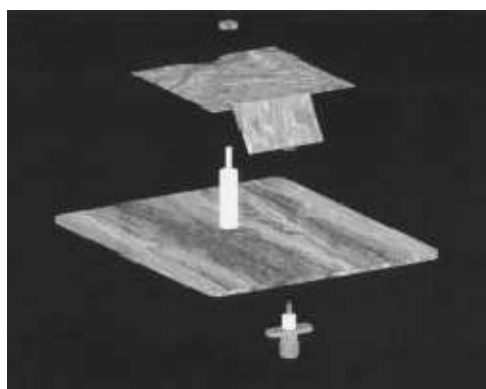


Obrázek 16 Implementace kapacitoru [2]

### 1.3 Širokopásmová jednovrstvá patch anténa.

Typická jednovrstvá patch anténa vytištěná na dielektrickém podkladu má úzké kmitočtové pásmo, což je způsobeno hlavně omezeními použitého substrátu. Z hlediska efektivity a ceny, nemůže být substrát ve většině případů příliš silný. Za účelem zvýšení šířky pásma patche se mohou použít doplňkové rezonátory s různým nastavením a v odlišných kombinacích, avšak ani tak nepřesáhne šířka pásma takového patche 40-50%. V článku [8] byl představen nový typ zářiče. Vlastní patch je zavěšený nad zemnicí

rovinou pomocí nevodivého válečku a je napájený tří dimenzionálním přechodem připojícím patch ke kolmému konektoru (obrázek 17). Typická šířka pásma takového zářiče bývá okolo 90%, a pokud je připojen k velké zemnicí rovině, bývá jeho předozadní poměr větší, než 25 dB. Vlastní zářič může být zavěšený poměrně vysoko nad zemnicí rovinou, čímž se zvýší šířka substrátu a dojde k zvětšení šířky pásma. Použitím 3D přechodu dojde k přizpůsobení zářiče a zároveň se zabrání přílišnému prodloužení napájecí sondy. Nevýhodou tohoto typu zářiče je vyšší úroveň příčné polarizace, která se ovšem dá eliminovat v anténní řadě. V článku [5] byla představena speciální konfigurace napájení pro anténní řady se sudým počtem prvků, které jsou rovnoměrně rozmístěny podél os řady. Jednotlivé anténní zářiče jsou vzájemně zrcadlově otočené a jsou napájeny signály se stejnou amplitudou, avšak s fází otočenou o  $180^\circ$ , a tím se bude příčná polarizace dvou prvků navzájem rušit. Tento způsob rozmístění a napájení prvků je přizpůsobitelný a může být použit s různými modifikacemi podle požadavků na výsledný systém.



Obrázek 17 Širokopásmový patch [8]

## 2 Anténní řady

Fázované anténní řady sestávají z množství pevných anténních prvků (elementů), které jsou koherentně napájené a používají proměnné fáze nebo časové zpoždění nastavitelné pro každý prvek (občas lze měnit i amplitudu). To umožní vytvářet požadované vyzařovací diagramy a směřovat svazky do požadovaných směrů. Fázové řady jsou velice drahé. S rozvojem technologií se očekává, že jejich cena bude klesat. Současně požadavky na lepší vlastnosti, jako jsou nižší postranní laloky a širší pásma drží jejich cenu vysoko (obecně cena velkých aperturových antén bývá 10 – 40% ceny celého systému a fázované řady bývají o 25 – 40% dražší) [1]. Anténní postranní laloky lze řídit rozložením amplitud v apertuře. Pro fázové řady lze kontrolovat amplitudu každého elementu individuálně, a tedy lze docílit dobré ovládní. Pro spojitě apertury vyzařovací diagram ve vzdálené zóně je Fourierova transformace rozložení na apertuře. Pro řady se berou vzorky spojitě rozložení v každém diskretním místě (diskretní transformace). Rovnoměrné ozáření má sice největší zisk (a proto i nejužší vyzařovací diagram), ale za cenu nejvyšších postranních laloků. S potlačením amplitud na okrajích klesá zisk, rozšiřuje se hlavní svazek, ale zmenšují se postranní laloky. Konstruktor tedy volí účinnou a realizovatelnou funkci, která poskytuje nízké postranní laloky a minimální ztráty na zisku.

Každý prvek řady vyzařuje vektorový směrový diagram, který závisí jak na úhlu, tak i vzdálenosti v blízkosti elementu. Pro velké vzdálenosti od prvku se chová jako zdroj kulové vlny násobené vektorovou funkcí úhlu  $f_i(\theta, \phi)$ , zvanou diagramem prvku. I když tato funkce závisí na typu použitého prvku, lze pro vzdálené pole psát [1]

$$E_i(r, \theta, \phi) = f_i(\theta, \phi) \exp(-jkR_i)/R_i \quad (3.1)$$

kde  $R_i$  je vzdálenost mezi prvkem a bodem pozorování. Pokud se diagram určuje ve velmi velké vzdálenosti od řady, pak se exponent může aproximovat vzhledem ke vzdálenosti  $R$ , měřené od libovolného středu souřadnic. Protože  $R_i^2 = R^2 + r_i^2 - 2Rr_i$  dostaneme pro velké vzdálenosti  $R_i \approx R - r^0 r_i$ , kde  $r_i$  je polohový vektor a  $r^0$  je jednotkový vektor [1].

$$\frac{\exp(-jkR_i)}{R_i} = \frac{\exp(-jkR_i)}{R} \exp(jkr^0 \cdot r_i) \quad (3.2)$$



Pro vzdálené pole můžeme psát obecně [1]

$$E_i(r) = f_i(\theta, \phi) \frac{\exp(-jkR_i)}{R} \sum_{i=1}^N a_i \exp(jkr^0 \cdot r_i) \quad (3.3)$$

kde  $R_i$  je vzdálenost mezi prvkem a bodem pozorování. To má velice obecný tvar s neznámým diagramem prvku v přítomnosti celé řady. Koeficienty  $a_i$  jsou vložené váhy (proudy nebo napětí) přicházejícího signálu. Obecně jsou vektorové diagramy prvků různé pro každý prvek, i když se používají stejné prvky vlivem interakcí prvky blízko okrajů řady. Pokud předpokládáme stejné diagramy, je [1]

$$E_i(r) = \frac{\exp(-jkR_i)}{R} \sum_{i=1}^N a_i f_i(\theta, \phi) \exp(jkr^0 \cdot r_i) \quad (3.4)$$

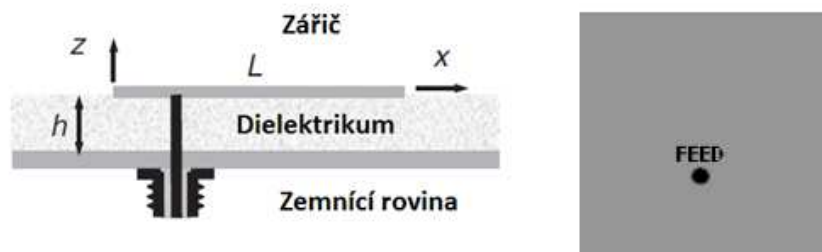
Obvykle se neuvažuje člen  $\exp(-jkR)/R$ , protože uvažujeme (či měříme) diagram na kouli s konstantním poloměrem a pak je tento člen pouze normalizační konstanta. Proto se obvykle uvažuje diagram jako součin vektorového diagramu prvku  $f_i(\theta, \phi)$  a skalárního činitele řady  $F(\theta, \phi)$  kde [1]

$$F(\theta, \phi) = F(k_x, k_y) = \sum_{i=1}^N a_i \exp(jkr^0 \cdot r_i) \quad (3.5)$$

$$kr^0 = k_x x^0 + k_y y^0 + k_z z^0, k_x = k \sin\theta \cos\phi, k_y = k \sin\theta \sin\phi, k_z = k \cos\theta$$

### 3 Alternativní způsoby napájení mikropáskových antén

Existují různé způsoby napájení mikropáskové antény. Pro samostatné prvky se nejčastěji používá napájení pomocí koaxiálního vodiče (obrázek 18) a pro aplikace vyžadující použití anténních řad se nejčastěji používá mikropáskové napájecí vedení.



Obrázek 18 Napájení pomocí koaxiálního vodiče

Napájení pomocí koaxiální sondy patří mezi klasické způsoby, které často využívají aplikace jako GPS nebo WLAN. Tento způsob napájení byl přiblížen v kapitole obdélníková mikropáskové patch anténa a v této části budou rozebrány jiné možné způsoby napájení patch antény.

Dalším způsobem připojení patche je přivedení mikropáskového vedení k jeho okraji, jak je to znázorněno na obrázku 19 vpravo.

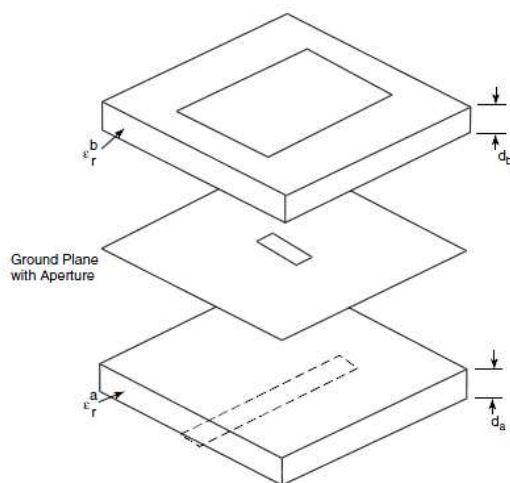


Obrázek 19 Napájení pomocí mikropáskového vedení

Při použití tohoto způsobu napájení je opět nutné provést impedanční přizpůsobení pomocí výřezu, protože impedance na okraji patche bývá poměrně vysoká (typicky několik set  $\Omega$ ). Výhodou tohoto uspořádání je možnost umístit mikrovlnné obvody na stejný substrát poblíž zářiče a tím se vyhnout vícevrstvé struktuře antény. Také může dojít k paralelnímu spojení anténních elementů do jednovrstvé anténní řady. Samotný impedanční měnič má opět sklony k vyzařování a tím může dojít k narušení vyzařovací charakteristiky. Příklad tohoto měniče je na obrázku 19 vlevo, což je vlastně kombinace antén z obrázků 18 a 19 vpravo. Byl použit stejný bod napájení jako na obrázku 18, ve kterém je požadovaná vstupní impedance. K tomuto bodu přivedeme výřezem

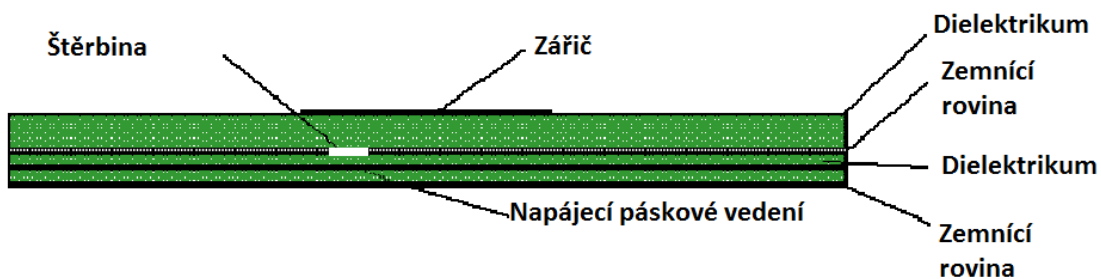
mikropáskové napájecí vedení. Výřez sice zdeformuje vyzařovací charakteristiku anténního elementu, ale na druhou stranu můžeme k anténě přímo připojit obvody se standardní impedancí [7].

Jak již bylo uvedeno dříve, impedanční šířka patche činí v nejlepších případech několik procent. Vyzařovaná šířka pásma bývá obvykle mnohem větší a dosahuje až 50%. Obvyklou metodou rozšíření šířky pásma je přidání štěrbin do substrátu patch antény. Tato štěrbina je vyříznuta v zemnicí rovině pod zářičem a je buzena z mikropáskového nebo páskového vedení, které je vedeno přes štěrbinu, jak je zakresleno na obrázku 20.



Obrázek 20 Buzení patche pomocí štěrbin [2]

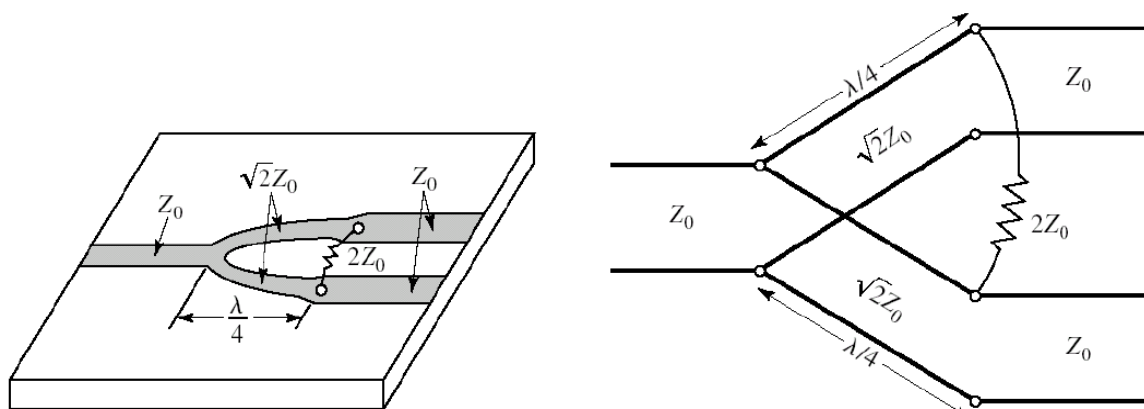
Pokud se rozhodneme pro napájení mikropáskem, můžeme tím snížit předozadní poměr antény. U napájení páskovým vedením je ale situace jiná, protože je napájecí linka umístěna mezi dvěma zemnicími rovinami a tím tolik nedochází k zpětnému vyzařování (obrázek 21). U takto napájeného patche může být poměrně snadno dosaženo impedanční šířky pásma 10% [2], ale návrh takovéto struktury už je složitější.



Obrázek 21 Buzení patche pomocí štěrbin

## 4 Děliče výkonu

Děliče výkonu jsou pasivní mikrovlnné komponenty, které slouží pro dělení vstupního signálu do dvou nebo i více signálů s nižší energií. Nejčastěji dochází k rovnoměrnému rozdělení signálu, avšak existují také děliče s různými poměry dělení. V této části práce bude rozebrán nejjednodušší dělič ve formě trojbranu, kdy jedna brána slouží pro vstup a dvě pro výstup. Typickými zástupci této kategorie jsou například T spojení, odporové děliče nebo Wilkinsonovy děliče. T spojky jsou bezztrátové, avšak jejich porty nelze impedančně přizpůsobit a navíc mezi výstupními branami není žádná izolace. Odporové děliče mohou být konstruovány tak, aby byly přizpůsobeny na všech portech. Ani u tohoto typu děliče nedojde k oddělení výstupních portů a navíc se polovina výkonu přemění na teplo. Wilkinsonův dělič je přizpůsobený bezztrátový trojbran, který má oddělené oba výstupní porty. Wilkinson může mít libovolné dělení výkonu, ale v této části práce bude uvažován pouze případ rovnoměrného (3dB) dělení (obrázek 22).



Obrázek 22 Wilkinsonův dělič s rovnoměrným dělením výkonu [1]

Obvod je realizován ze dvou čtvrtvlnných vedení, které jsou na jednom konci spojena a na jejich volných koncích, které tvoří výstupní brány, je k nim připojen rezistor o impedanci  $2Z_0$ . Čtvrtvlnná vedení transformují impedanci  $50\Omega$  na dvojnásobek, a tím zajišťují, že při zakončení výstupních bran impedancí  $50\Omega$  je obvod impedančně přizpůsoben. Rezistor  $100\Omega$  zajišťuje přizpůsobení výstupních vedení a při přenosu ve zpětném směru zlepšuje izolační odpor výstupních bran. Jinými slovy: Tento odpor se neuplatní, pokud je v obvodu vše řádně přizpůsobeno. Pokud by připojená zátěž nebyla správně přizpůsobena a došlo k odrazu části energie, odpor  $2Z_0$  by tuto energii pohltil. Obvodové vlastnosti ideálního Wilkinsonova děliče lze vyjádřit pomocí následujících s-parametrů [1]:

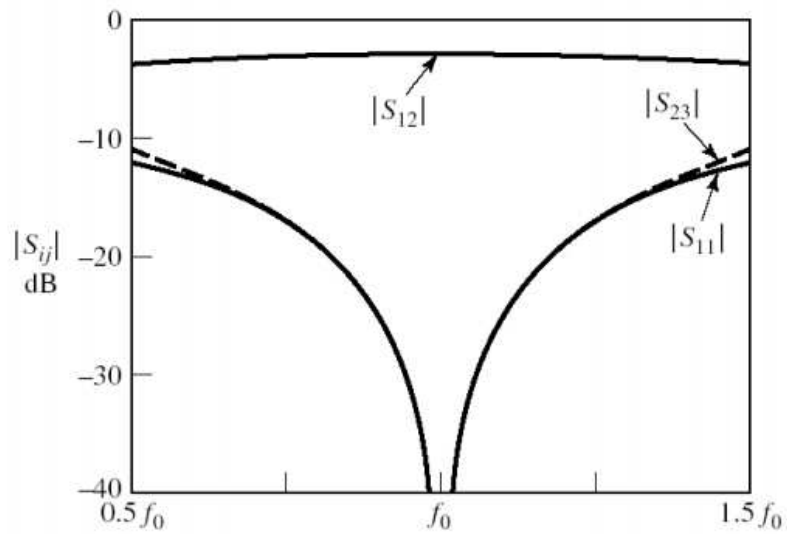
$$S_{11} = 0$$

$$S_{22} = S_{33} = 0$$

$$S_{12} = S_{21} = -j/\sqrt{2}$$

$$S_{13} = S_{31} = -j/\sqrt{2}$$

$$S_{23} = S_{32} = 0$$



Obrázek 23 Frekvenční odezva Wilkinsonova děliče se stejným poměrem dělení [1].

Vztah pro  $S_{22}$  a  $S_{33}$  platí, pokud jsou výstupní porty přizpůsobené, vztah pro  $S_{12}$  a  $S_{21}$  platí díky symetrii z důvodu reciprocity, vztah pro  $S_{13}$  a  $S_{31}$  platí, protože výstupní porty jsou symetrické. V práci [1] jsou odvozeny základní vlastnosti obvodu. Vychází se z vlnových rovnic obvodu, jejichž řešením se dojde k poznatku, že vlnová impedance vedení  $\lambda/4$  by měla být

$$Z_0 = \sqrt{n} \cdot R_0 \quad (5.1)$$

kde  $n$  je počet větví děliče a  $R_0$  je externí zatěžovací odpor, na který byl dělič navržen. Pokud si představíme jednu větev děliče, jako zdroj napětí  $V_s$  s vnitřní impedancí  $Z_s$  připojený na vstup impedančně přizpůsobeného vedení délky  $\lambda/4$  s charakteristickou impedancí  $Z_0$  a činitelem odrazu  $\Gamma_s$ , můžeme pro velikost napěťové vlny šířící se po vedení směrem k zátěži najít vztah

$$V = \frac{V_s}{2} (1 - |\Gamma_s|) \quad (5.2)$$

Pro dělič, který má dvě větve podle obrázku 22 bude napětí na připojených zátěžích stejné a bude platit

$$V_{g2} = V_{g3} = 2V_0 \quad (5.3)$$

kde  $V_{g2}$  a  $V_{g3}$  jsou napětí na výstupních branách děliče a  $V_0$  je napětí přivedené na vstup děliče.

## 5 Praktická realizace a měření mikropáskových antén.

První krok při návrhu mikropáskových zářičů byl volba materiálu, jelikož od jeho vlastností se odvíjí další výpočty. Z hlediska dostupnosti a finanční výhodnosti jsem se rozhodl použít ArlonAD450, ačkoli tento materiál nemá úplně ideální předpoklady ke konstrukci antén pro pásmo 9,2 až 10GHz. Relativní permitivita  $\epsilon_r$  Arlonu je dost vysoká a její hodnota je 4,5. Ztrátový úhel  $\tan \delta$  je při kmitočtu 10GHz roven 0,0035, šířka substrátu je 1,185mm a šířka vlastního zářiče je 0,035mm. Při znalosti těchto parametrů bylo možné určit přibližné rozměry zářičů pro střed kmitočtového pásma 9,6GHz podle vztahů uvedených v předchozí kapitole. Pro výpočet dalších parametrů jsem použil program MSANCAD [9]. Do programu se nejprve zadala relativní permitivita, tangens delta a tloušťka podložky, tloušťka zářiče a námi zvolená šířka zářiče. Poté se zapsala rezonanční frekvence, což byl střed zadaného kmitočtového pásma, a požadovaná impedance vedení. Program následně vypočítal délku zářiče, souřadnici bodu napájení, předpokládanou šířku pásma a účinnost antény a také odhadovaný poměr stojatých vln. Rozhodl jsem se pro zkonstruování tří modelů mikropáskové antény s různou šířkou a jednoho plechového modelu širokopásmové patch antény, aby bylo možné lépe porovnat jejich vlastnosti. U všech antén jsem změřil vyzařovací charakteristiky v azimutu (E rovina) a v elevaci (H rovina) a také jsem provedl měření přizpůsobení a zisku jednotlivých antén. Všechna měření, kromě přizpůsobení, byla provedena v bezodrazové komoře.

### 5.1 Mikropásková anténa s šířkou 7mm.

Prvním navrženým anténním prvkem byl patch o zvolené šířce 7mm. V tabulce 2 jsou uvedeny jeho další dané rozměry, jako například tloušťka zářiče, což je síla plíšku umístěného na substrátu. V tabulce jsou také uvedeny dopočítané rozměry zářiče a vlastnosti dielektrika.

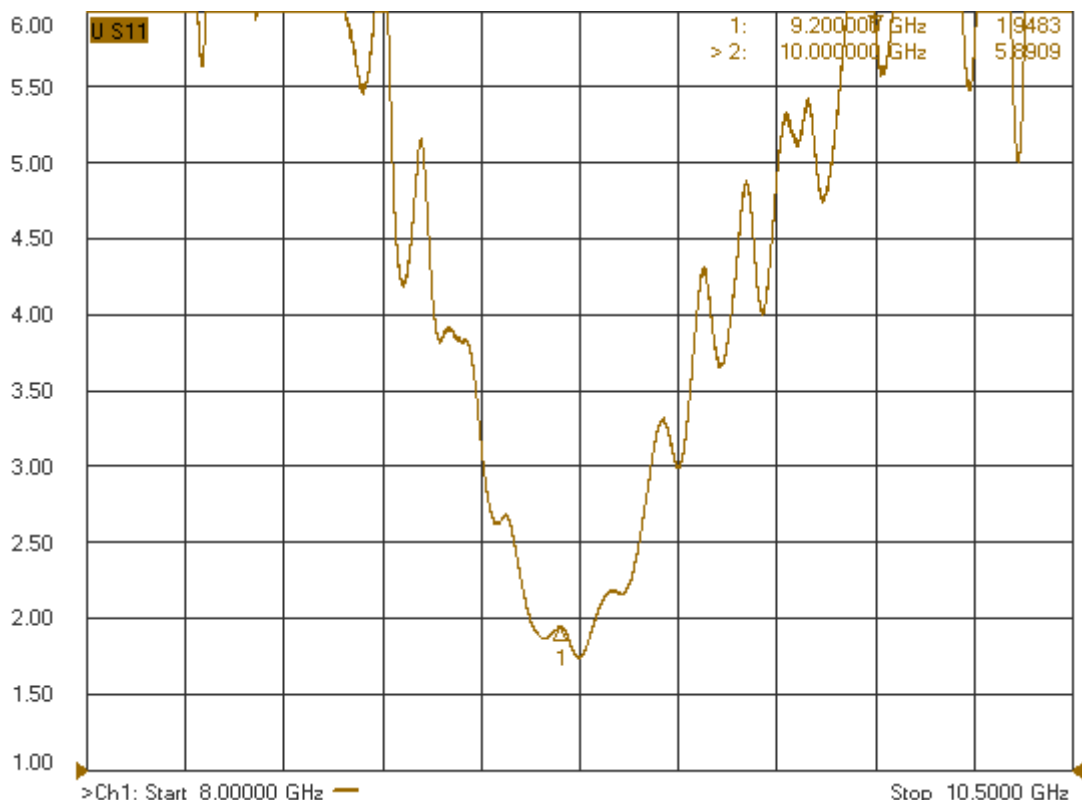
Na obrázku 24 je znázorněno změřené přizpůsobení této antény. Pro poměrně úzký rozsah kmitočtů okolo 9 GHz je anténa dobře přizpůsobena, jelikož se PSV drží pod hodnotou 2. Se vzrůstajícím kmitočtem se anténa stává hůře přizpůsobenou, neboť uprostřed kmitočtového pásma dosahuje PSV hodnoty 4 a na okraji pásma již překročí PSV úroveň 6. Naměřené přizpůsobení se odlišuje od vypočítaného, které je uvedeno

v tabulce 3, ale už při výpočtu bylo jasné, že anténa nebude přizpůsobena v celém kmitočtovém rozsahu.

Tabulka 2 Parametry mikropáskové antény se šířkou 7mm

Relativní permitivita $\epsilon_r$	4,5
Tan $\delta$ podložky	0,0035
Tloušťka podložky H [mm]	1,185
Šířka zářiče W [mm]	7
Tloušťka zářiče T [mm]	0,035
Délka zářiče L [mm]	6,592
Prodloužení $\Delta/H$	0,487
Efektivní permitivita $\epsilon_{eff}$	4,046
Vypočtená šířka pásma BW [%]	4,53
Vypočtená účinnost antény $\eta_{sw}$ [%]	97,68
Impedance vedení $Z_0$ [ $\Omega$ ]	50
Souřadnice napájecí sondy x [mm]	2,461
Souřadnice napájecí sondy y [mm]	3,5





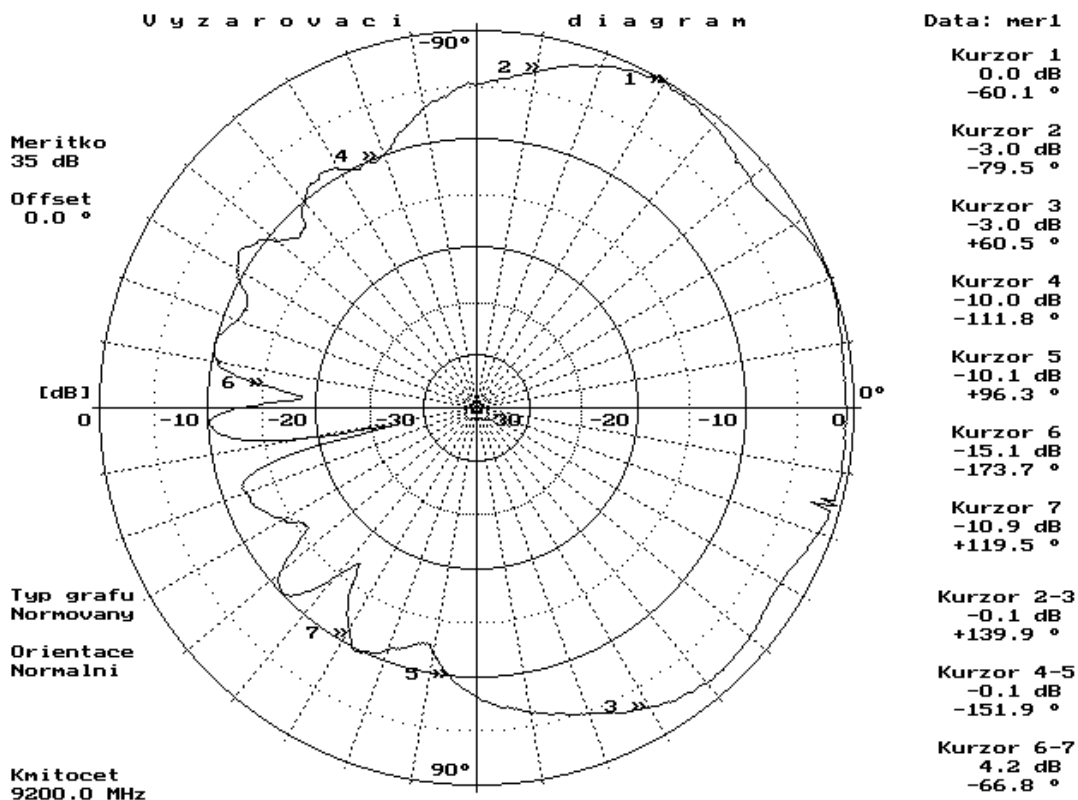
Obrázek 24 25 Závislost PSV antény o šířce 8mm na kmitočtu

Tabulka 3 Závislost vypočítaného PSV 7mm patche na frekvenci

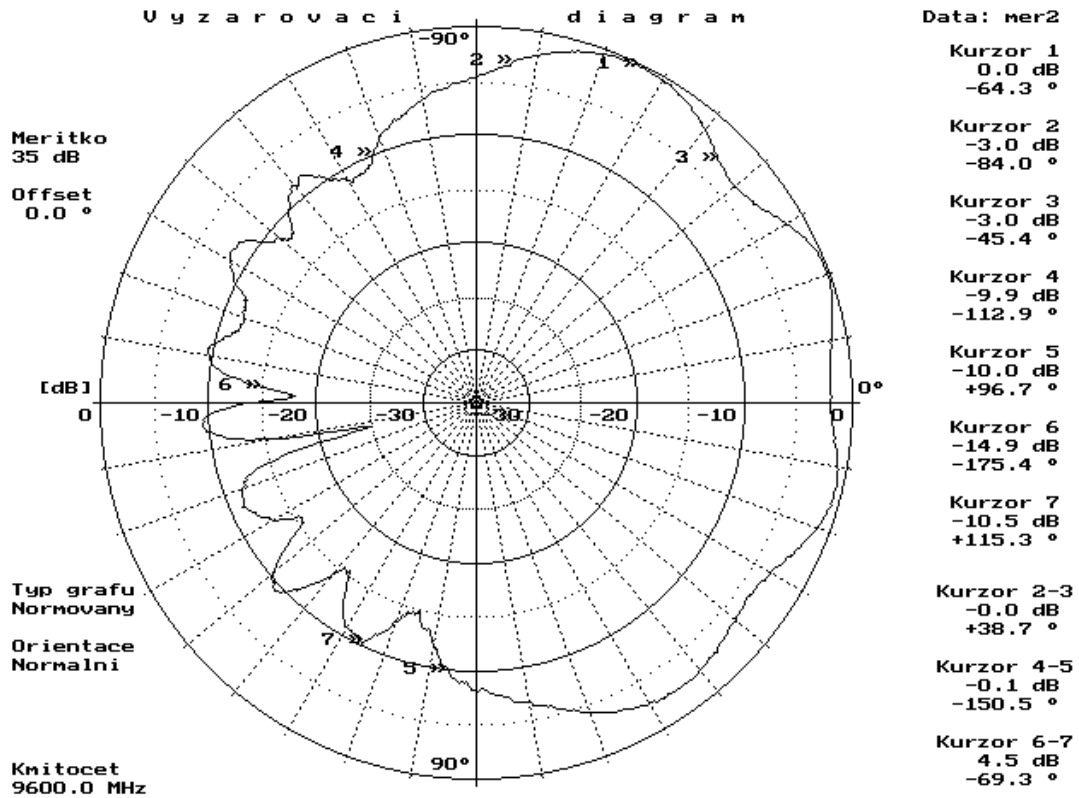
Frekvence [GHz]	Vypočítané PSV
9,2	7,29
9,3	5,24
9,4	3,65
9,5	2,46
9,6	1,65
9,7	1,29
9,8	1,67
9,9	2,44
10	3,52

Obrázky 25-30 zobrazují vyzářovací diagramy patche. Anténa byla měřena v bezodrazové komoře na třech kmitočtech a na každém kmitočtu se zjišťovala vyzářovací charakteristika v azimutu i v elevaci. Na obrázku 25 je zachycen vyzářovací diagram antény v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz. Na tomto kmitočtu je anténa ještě dobře přizpůsobena a tak má diagram odpovídající tvar. Z obrázku je patrné, že předozadní poměr antény je 10dB a šířka hlavního laloku je 140° (lze odečíst pomocí kurzorů 2 a 3). Se vzrůstajícím kmitočtem se v hlavním laloku začne projevovat zvlnění charakteristiky a ve směru maxima dochází k propadu, tím se zmenšuje předozadní poměr antény a tento fakt má vliv na pokles zisku antény na vyšších kmitočtech. Zisk antény se měřil v požadovaném kmitočtovém rozsahu a porovnával se s charakteristikou normálu (příloha 1). Anténa dosáhla nejvyššího zisku 4,13 dBi na kmitočtu 9,2 GHz (viz příloha 2)

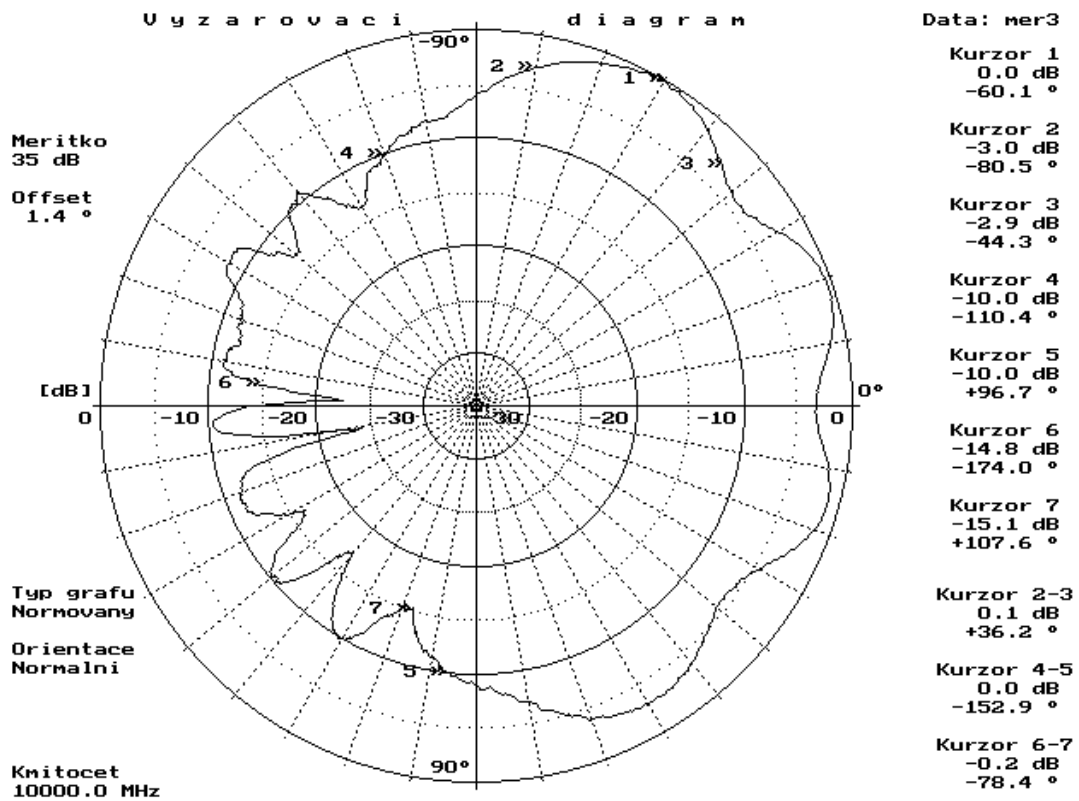
Na obrázku 28. je vyzářovací diagram antény v elevaci na kmitočtu 9.2 GHz. Šířka hlavního laloku je 96,3° a předozadní poměr je 19dB. Se vzrůstajícím kmitočtem opět dojde ke zkreslení diagramu, ale toto zkreslení není tak výrazné, jako v případě azimutu.



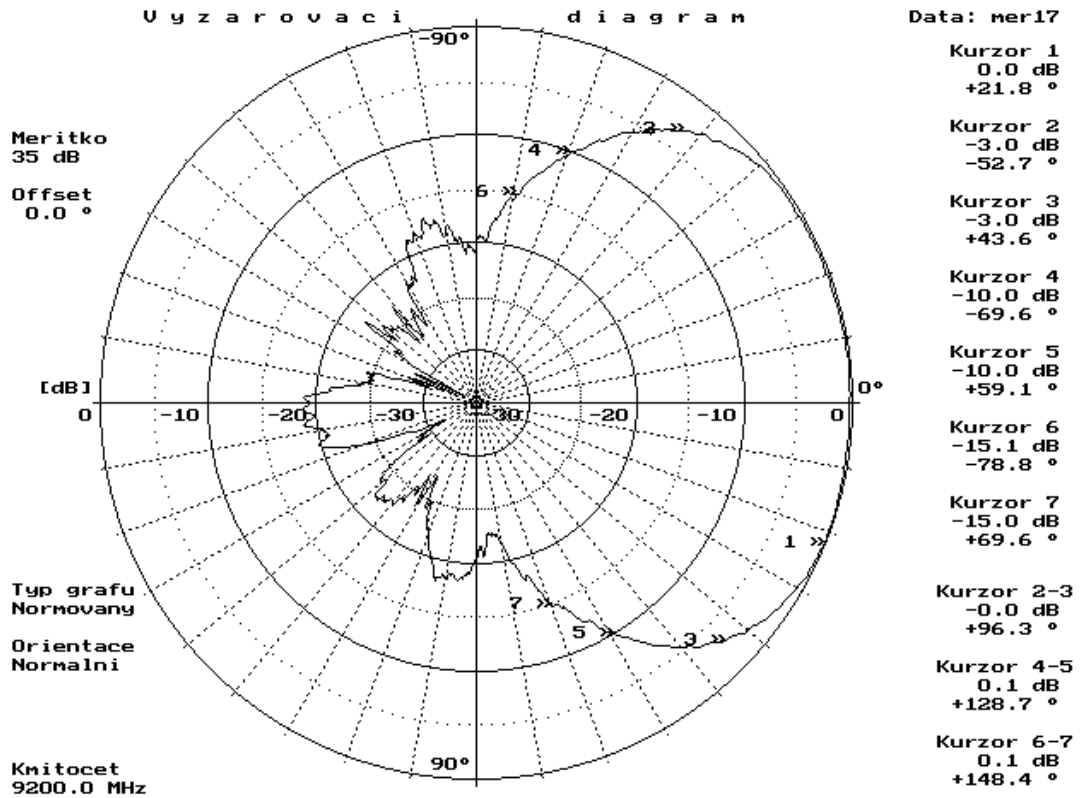
Obrázek 26 VD 7mm patche v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz



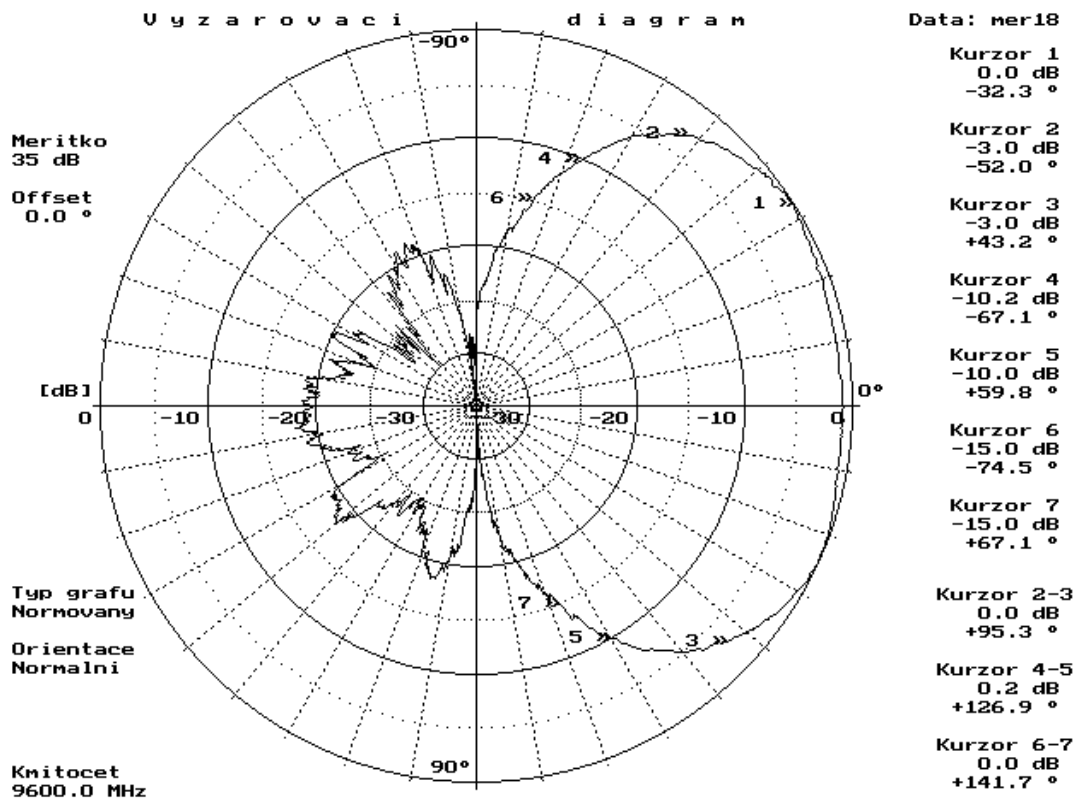
Obrázek 27 VD 7mm patche v azimutu na kmitočtu 9,6 GHz



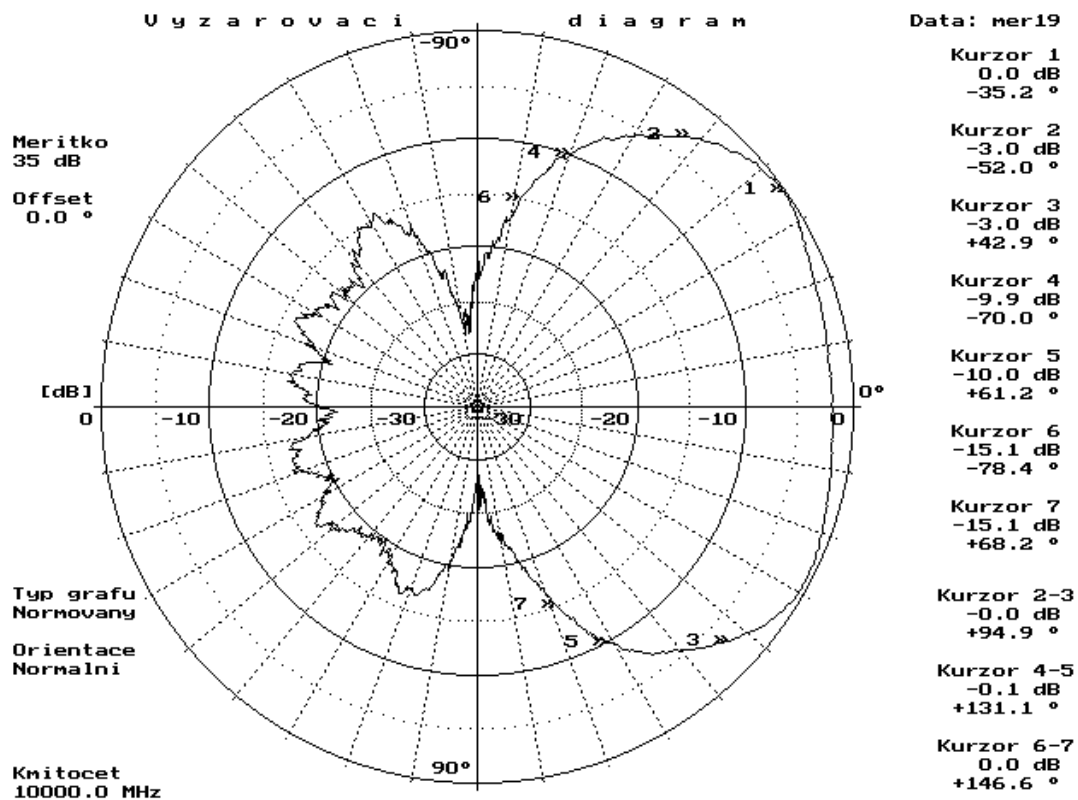
Obrázek 28 VD 7mm patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz



Obrázek 29 VD 7mm patche v elevaci na kmitočtu 9,2 GHz



Obrázek 30 VD 7mm patche v elevaci na kmitočtu 9,6 GHz



Obrázek 31 VD 7mm patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz

## 5.2 Mikropásková anténa s šířkou 8mm.

Dalším navrženým modelem antény byl patch o šířce 8mm. V tabulce 4 jsou uvedeny jeho dané a dopočítané rozměry. Hodnoty relativní permitivity,  $\tan \delta$  podložky, tloušťky podložky, tloušťky zářiče a impedance vedení zůstávají stejné, jako v předchozím případě. Vlivem rozšíření zářiče došlo ke změně polohy napájecí sondy, prodloužení a vypočítané délce patche.

Tabulka 4 Parametry mikropáskové antény se šířkou 8mm

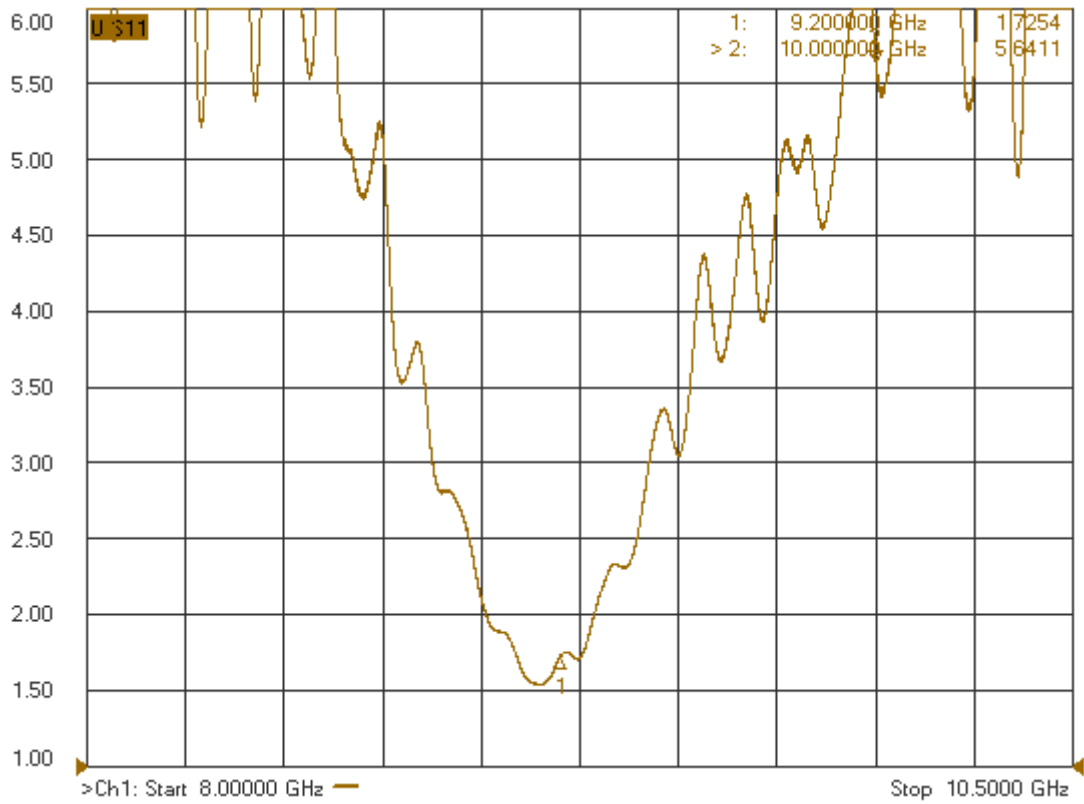
Relativní permitivita $\epsilon_r$	4,5
Tan $\delta$ podložky	0,0035
Tloušťka podložky H [mm]	1,185
Šířka zářiče W [mm]	8
Tloušťka zářiče T [mm]	0,035
Délka zářiče L [mm]	6,493

Prodloužení $\Delta/H$	0,494
Efektivní permitivita $\epsilon_{\text{eff}}$	4,095
Vypočtená šířka pásma BW [%]	5,12
Vypočtená účinnost antény $\eta_{\text{sw}}$ [%]	97,92
Impedance vedení $Z_0$ [ $\Omega$ ]	50
Souřadnice napájecí sondy x [mm]	2,309
Souřadnice napájecí sondy y [mm]	4

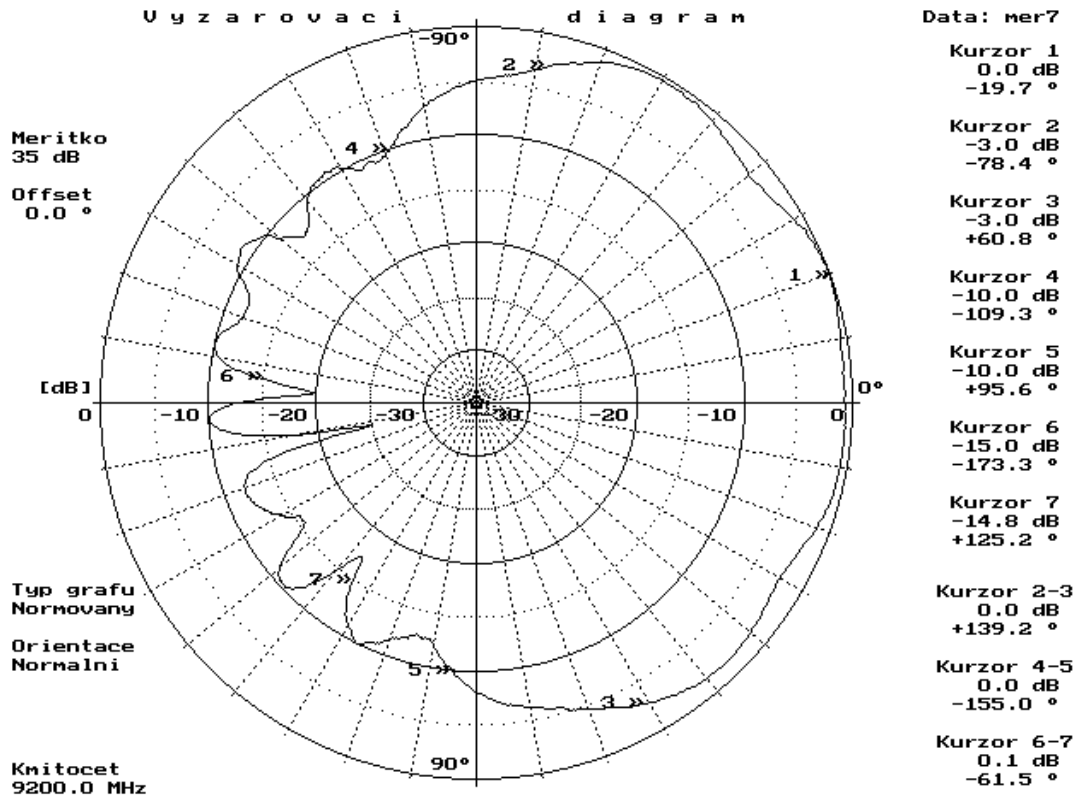
Tabulka 5 Závislost vypočítaného PSV 8mm patche na frekvenci

Frekvence [GHz]	Vypočítané PSV
9,2	6,51
9,3	4,77
9,4	3,39
9,5	2,36
9,6	1,65
9,7	1,31
9,8	1,60
9,9	2,25
10	3,15

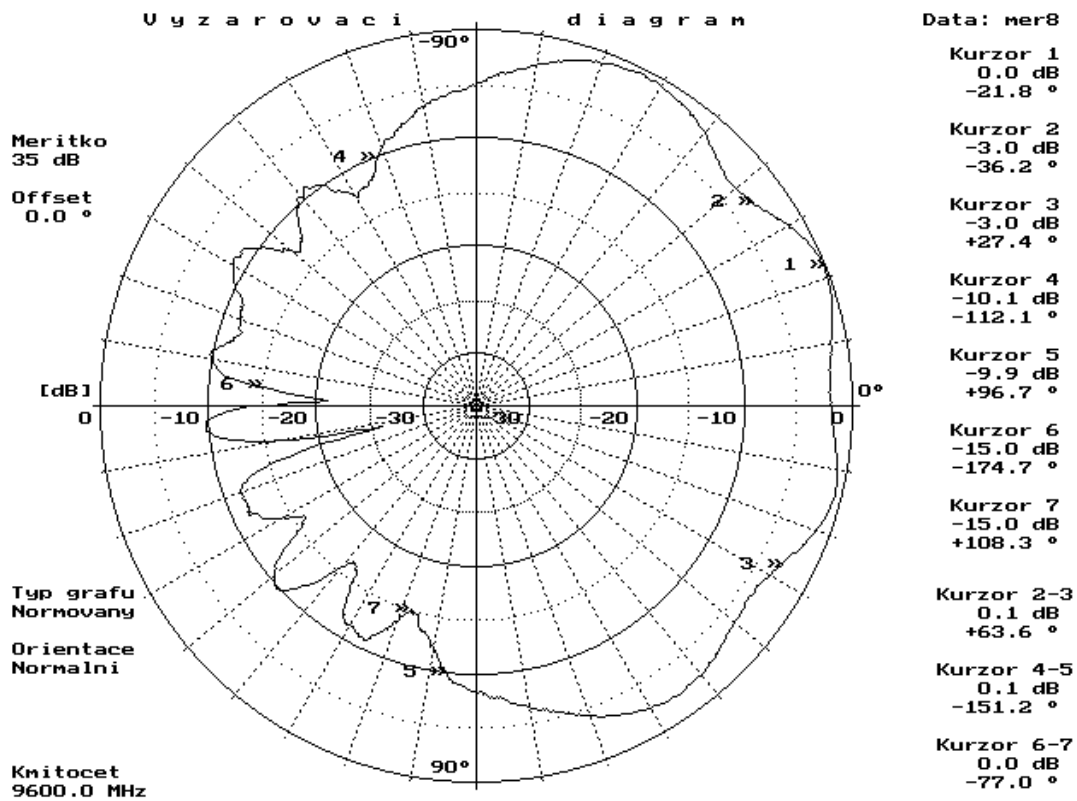
V porovnání s předešlým patchem dosahuje tato anténa nižších hodnot PSV, měla by tedy být lépe přizpůsobena. Pokud bychom brali anténu jako uspokojivě přizpůsobenou pro hodnoty PSV menší než 2, byla by tato anténa přizpůsobená přibližně v pásmu 280MHz (bráno podle naměřených hodnot), což je sice více, než u předcházejícího patche, avšak stále je to malá hodnota, vzhledem k požadovanému kmitočtovému rozsahu anténní řady. Obrázky 32-34 zobrazují vyzářovací diagram patche v azimutu (E rovina). Se vzrůstajícím kmitočtem je opět patrné zvlnění charakteristiky antény.



Obrázek 32 Závislost PSV antény o šířce 8mm na kmitočtu

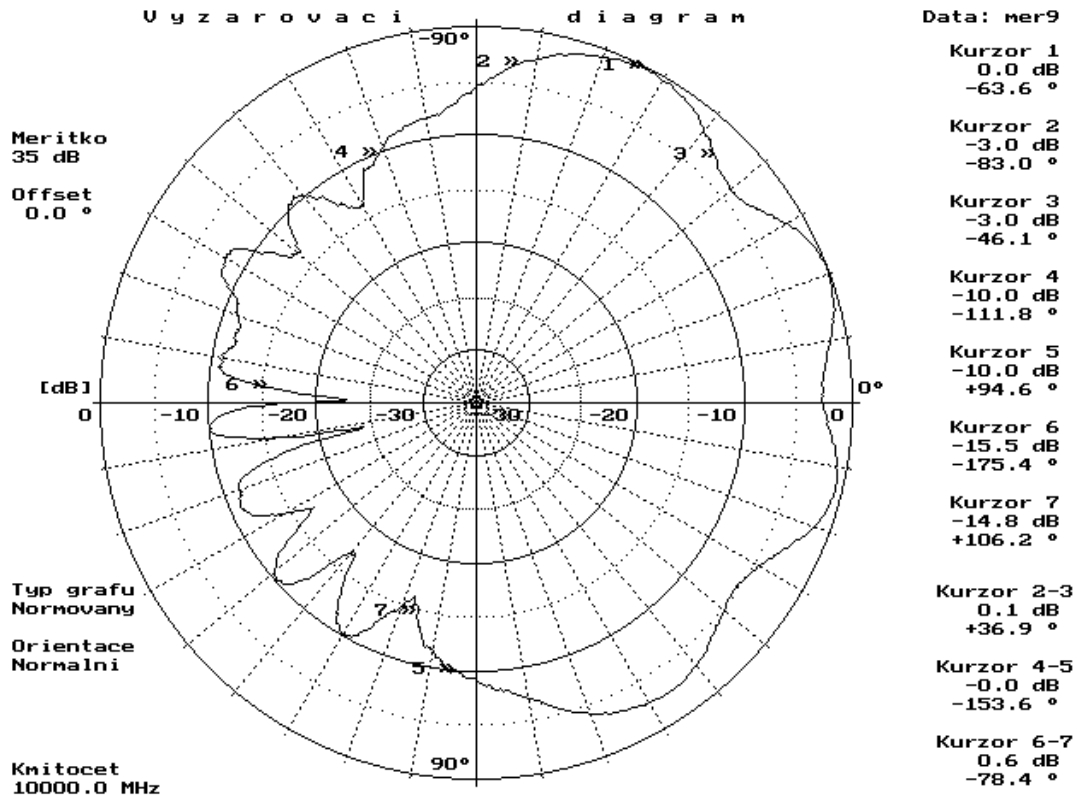


Obrázek 33 VD 8mm patche v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz

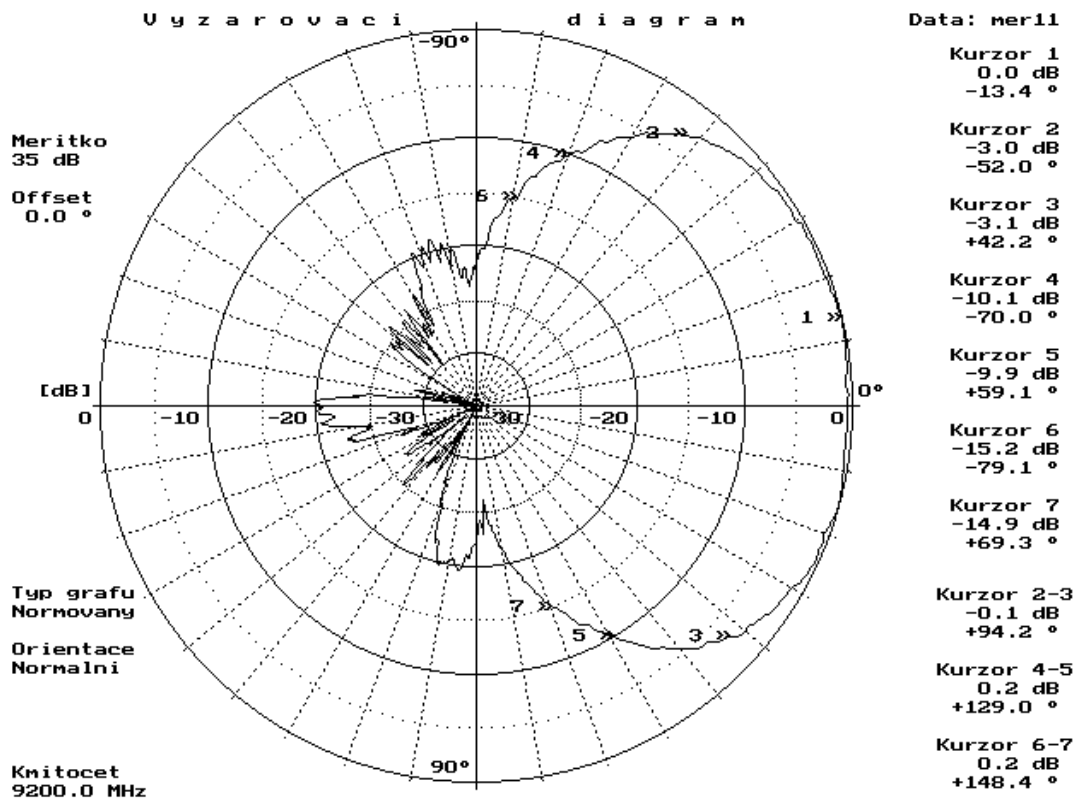


Obrázek 34 VD 8mm patche v azimutu na kmitočtu 9,6 GHz

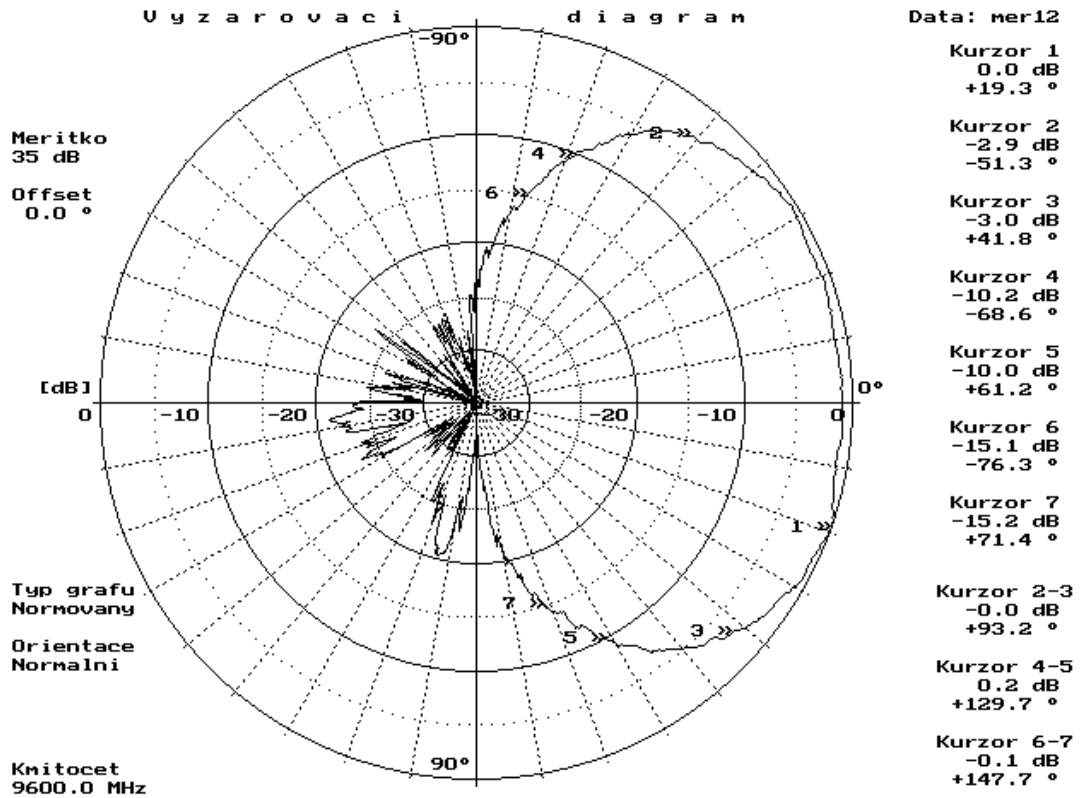




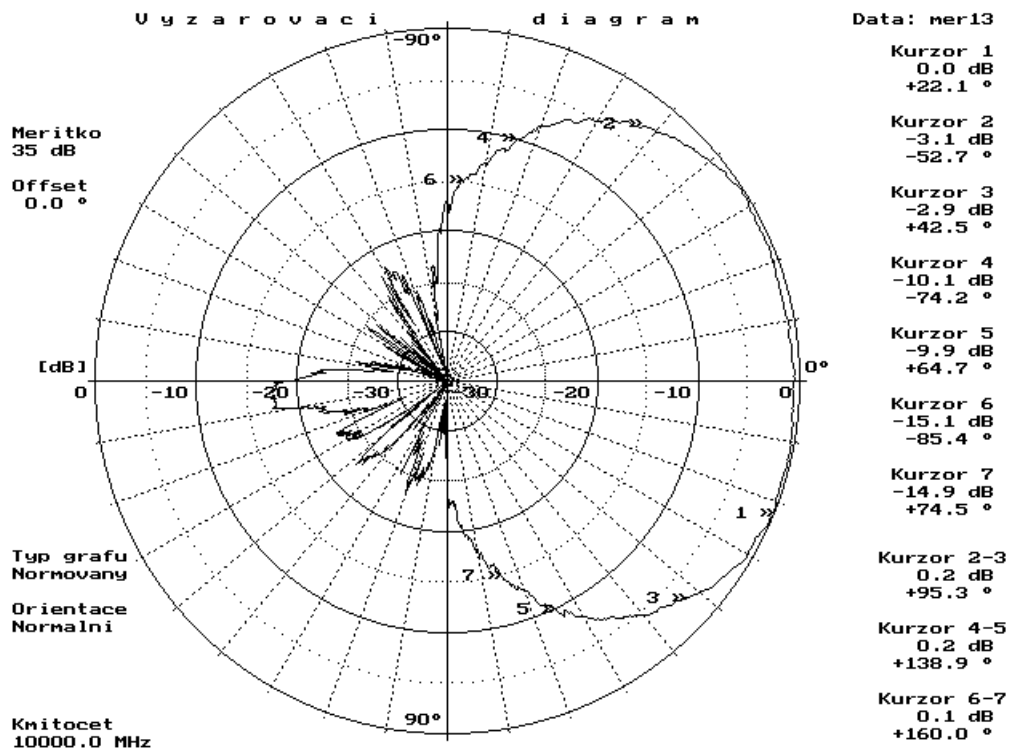
Obrázek 35 VD 8mm patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz



Obrázek 36 VD 8mm patche v elevaci na kmitočtu 9,2 GHz



Obrázek 37 VD 8mm patche v elevaci na kmitočtu 9,6 GHz



Obrázek 38 VD 8mm patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz

Obrázky 35-37 zachycují vyzařovací diagram 8mmpatche v elevaci (H rovina). Šířka hlavního laloku se pohybuje okolo  $94^\circ$  a předozadní poměr je 20dB. Tvar charakteristiky, šířka hlavního laloku i předozadní poměr zůstávají v celém kmitočtovém rozsahu přibližně konstantní. Tento model patch antény má také celkově větší zisk, než předešlý model. Nejvyšší byl opět na kmitočtu 9,2 GHz a činil 4,53 dBi a se vzrůstajícím kmitočtem opět klesal až na hodnotu -2,35dBi na frekvenci 10GHz (viz příloha 3).

### 5.3 Mikropásková anténa s šířkou 15mm

Posledním navrženým modelem tohoto typu byl patch o šířce 15mm. Jeho další parametry jsou uvedeny v tabulce 6.

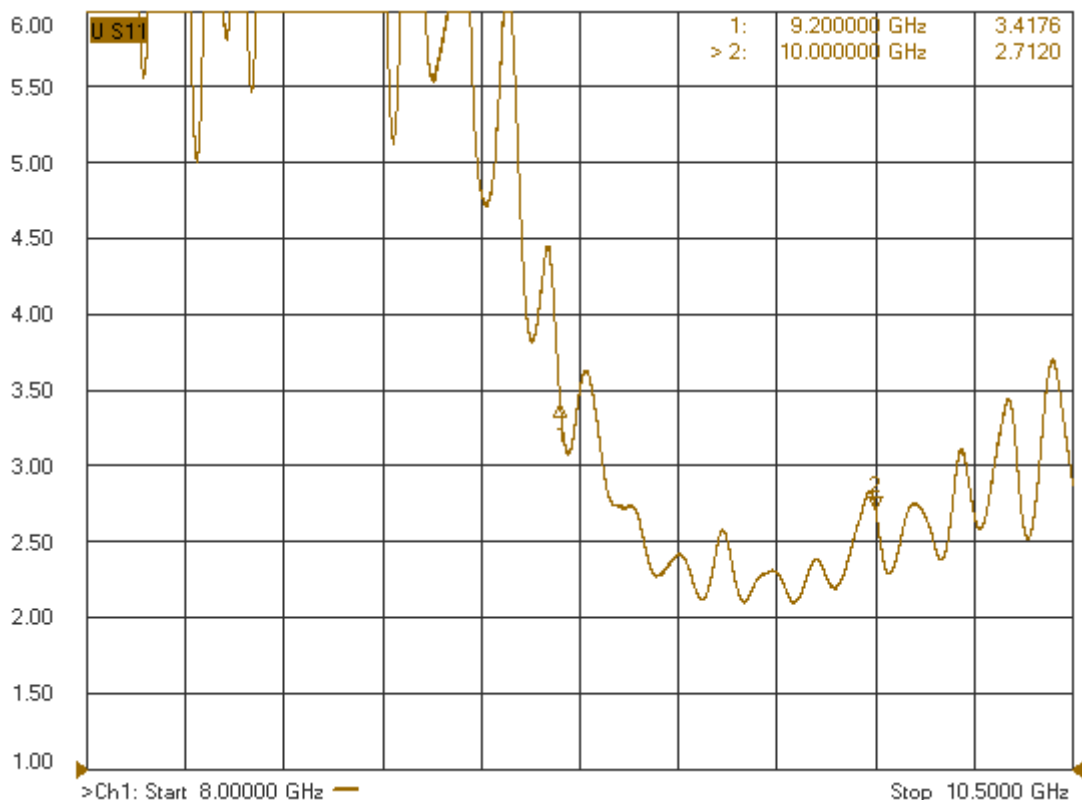
Tabulka 6 Parametry mikropáskové antény se šířkou 15mm

Relativní permitivita $\epsilon_r$	4,5
Tan $\delta$ podložky	0,0035
Tloušťka podložky H [mm]	1,185
Šířka zářiče W [mm]	15
Tloušťka zářiče T [mm]	0,035
Délka zářiče L [mm]	6,112
Prodloužení $\Delta/H$	0,514
Efektivní permitivita $\epsilon_{eff}$	4,284
Vypočtená šířka pásma BW [%]	7,61
Vypočtená účinnost antény $\eta_{sw}$ [%]	98,51
Impedance vedení $Z_0$ [ $\Omega$ ]	50
Souřadnice napájecí sondy x [mm]	1,401
Souřadnice napájecí sondy y [mm]	7,5

Tabulka 7 Závislost vypočítaného PSV 15mm patche na frekvenci

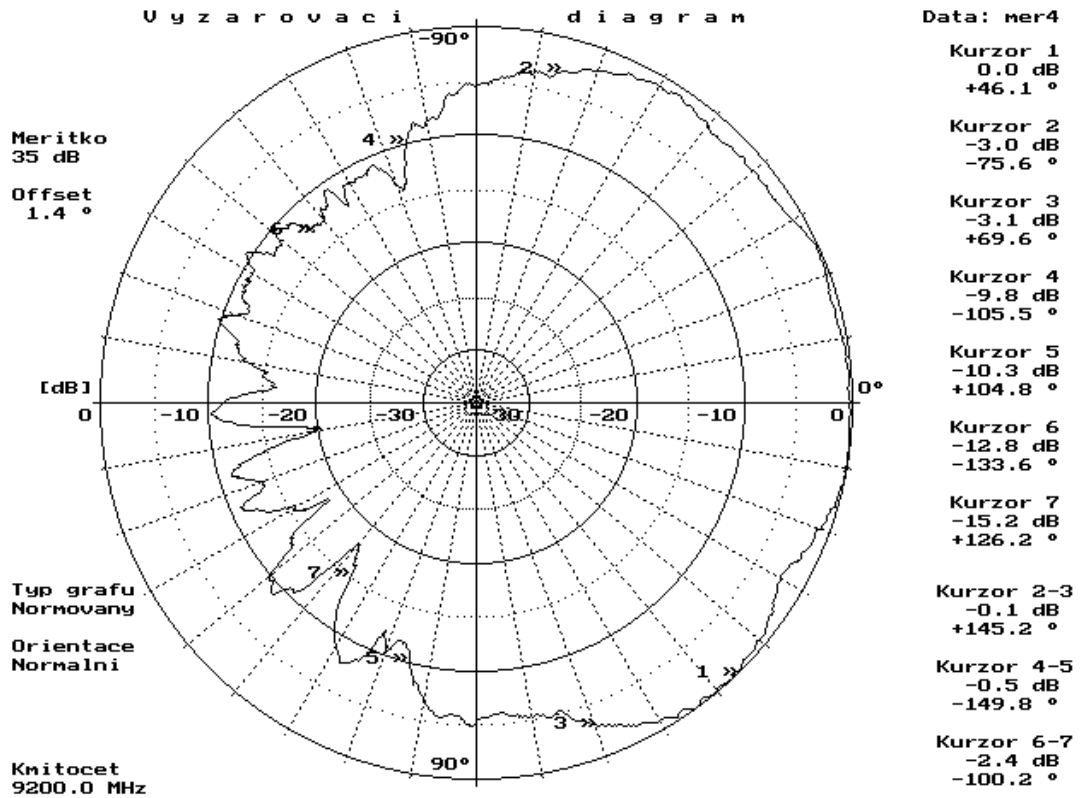
<b>Frekvence [GHz]</b>	<b>Vypočítané PSV</b>
9,2	4,1
9,3	3,16
9,4	2,42
9,5	1,84
9,6	1,45
9,7	1,33
9,8	1,56
9,9	1,99
10	2,55

Z hlediska vypočítané šířky pásma, účinnosti a PSV se jevil tento model patche jako nejlepší. Praktická měření již však nedopadla tak dobře. Na obrázku 38 je zachyceno změřené přizpůsobení antény. V rozsahu kmitočtu 9,4 – 10GHz je PSV relativně konstantní. V porovnání s předchozími modely patchů, zde dochází pouze k drobnému kolísání, avšak celkově je hodnota PSV tohoto modelu antény vysoká.

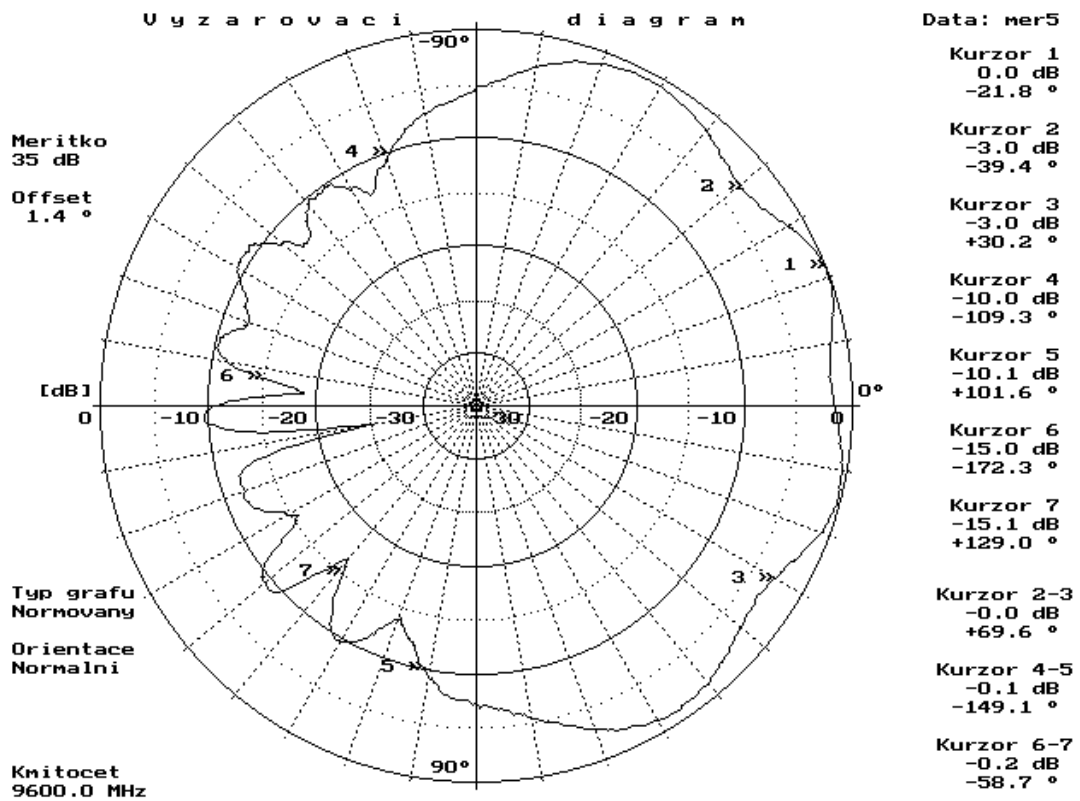


Obrázek 39 Závislost PSV antény o šířce 15mm na kmitočtu

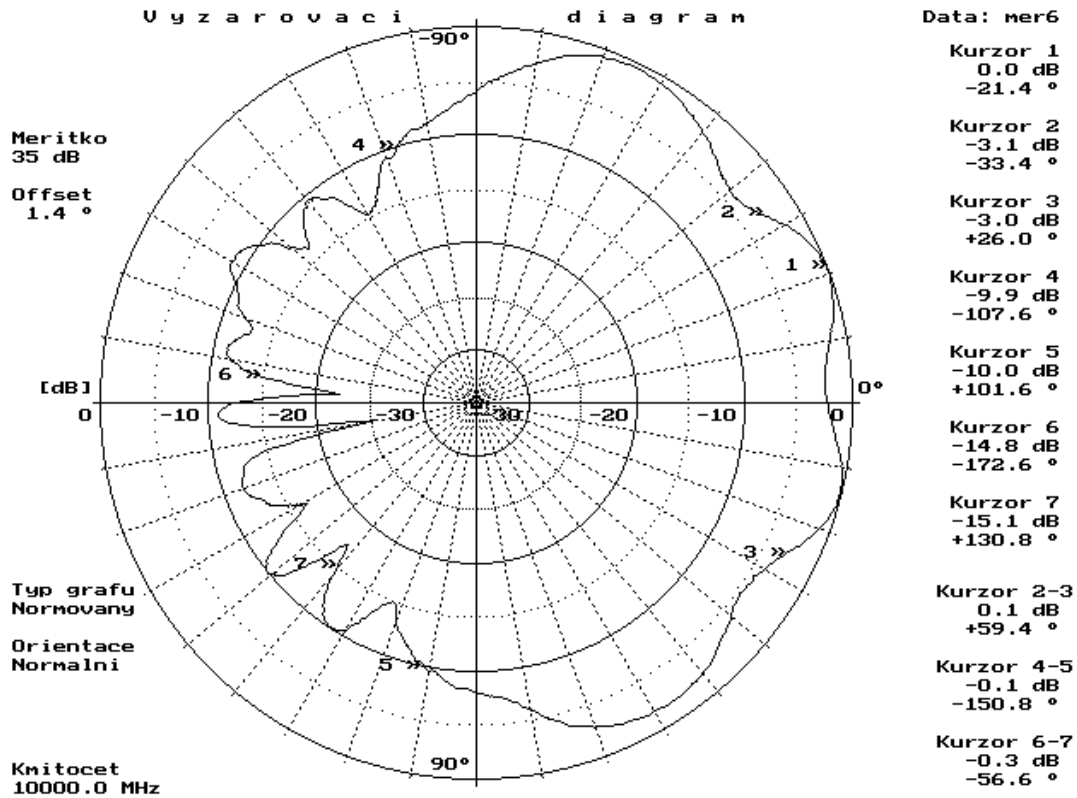
Obrázky 39-41 zachycují vyzařovací diagram 15mm patche v azimutu (E rovina) a obrázky 42 až 44 vyzařovací diagram v elevaci (H rovina). V zásadě se neliší od předcházejících modelů, pouze v elevaci má tento model o  $10^\circ$  užší šířku hlavního svazku. Tento patch měl velice malý zisk, na kmitočtu 9,2GHz činil -6,07dBi. Zhruba od kmitočtu 9,4GHz se zisk zvýšil a držel se na poměrně konstantní hodnotě a na kmitočtu 10GHz byl zisk 2.25GHz (viz příloha 4).



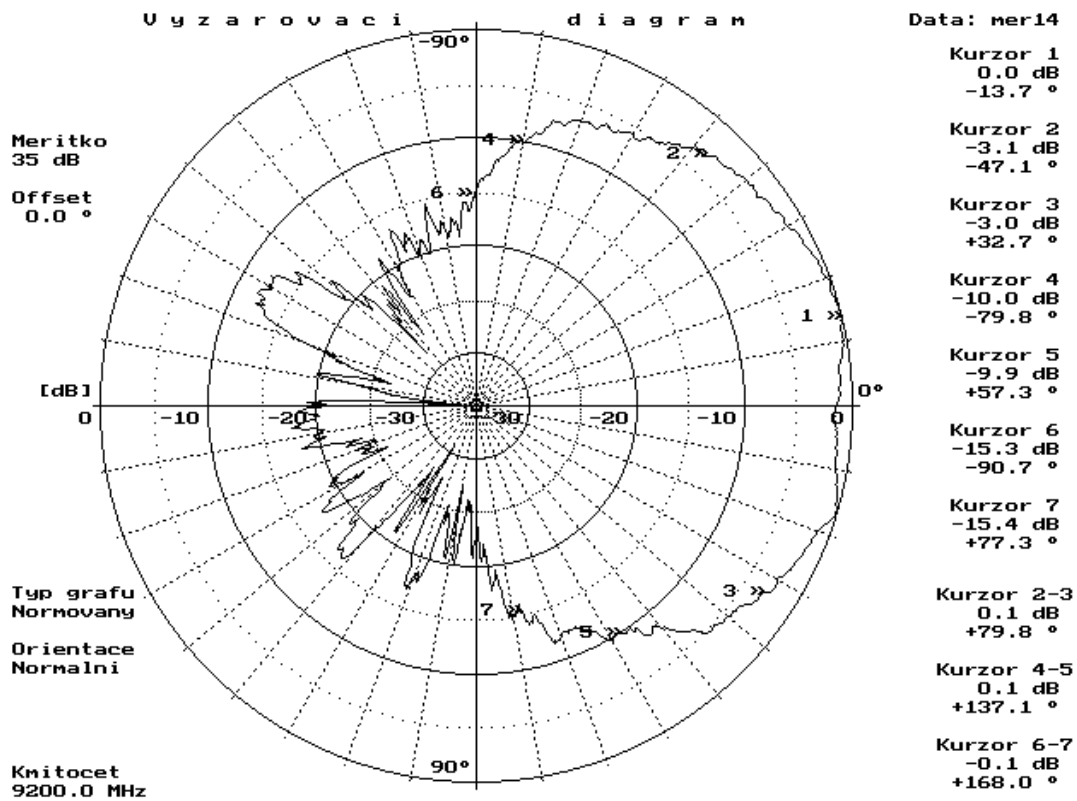
Obrázek 40 VD 15mm patche v azimutu na kmitočtu 9,2 GHz



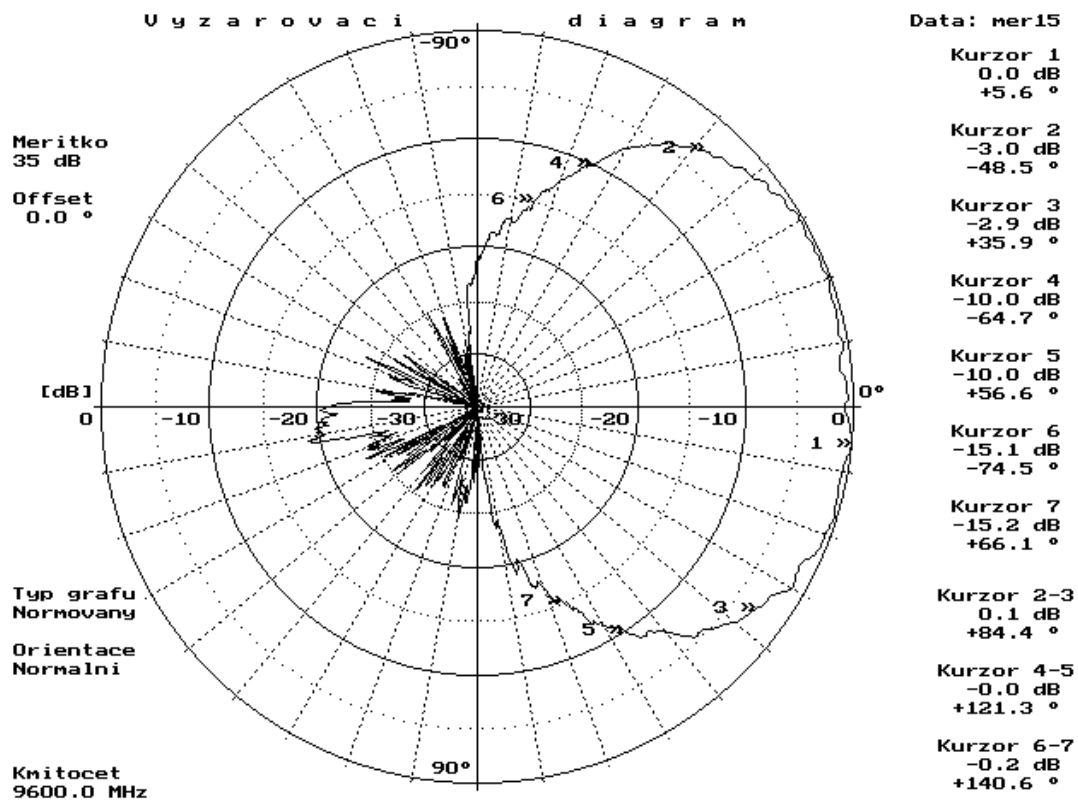
Obrázek 41 VD 15mm patche v azimutu na kmitočtu 9,6 GHz



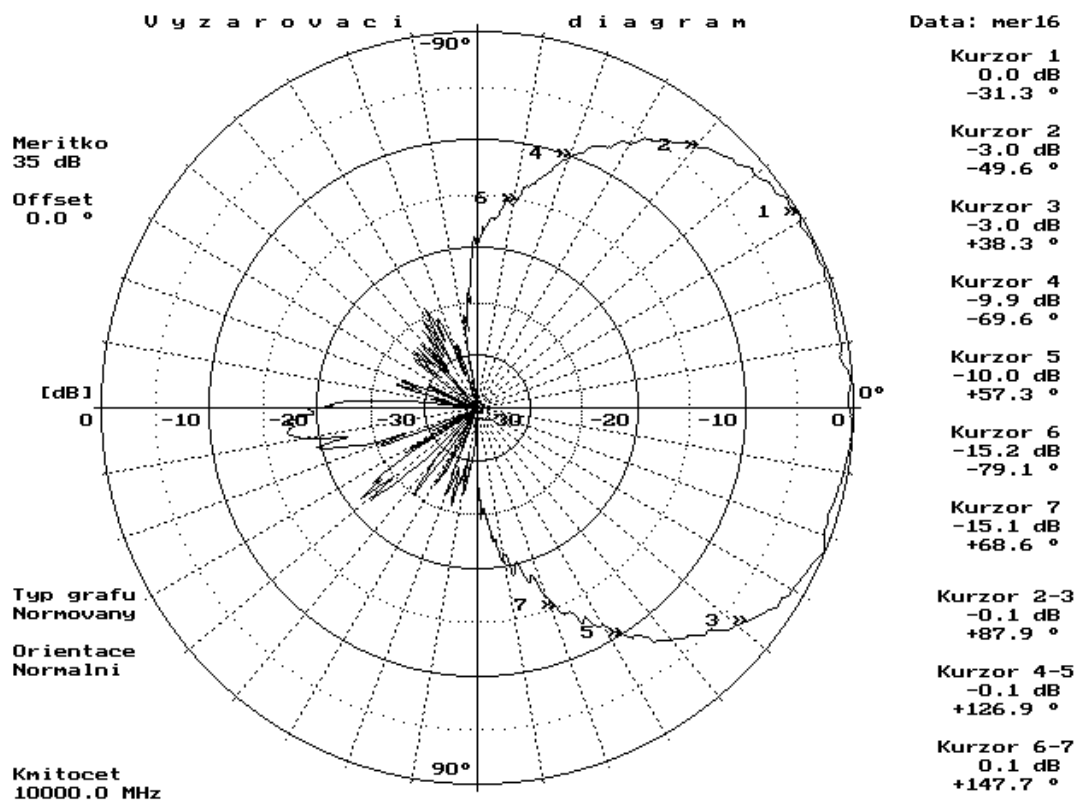
Obrázek 42 VD 15mm patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz



Obrázek 43 VD 15mm patche v elevaci na kmitočtu 9,2 GHz



Obrázek 44 VD 15mm patche v elevaci na kmitočtu 9,6 GHz

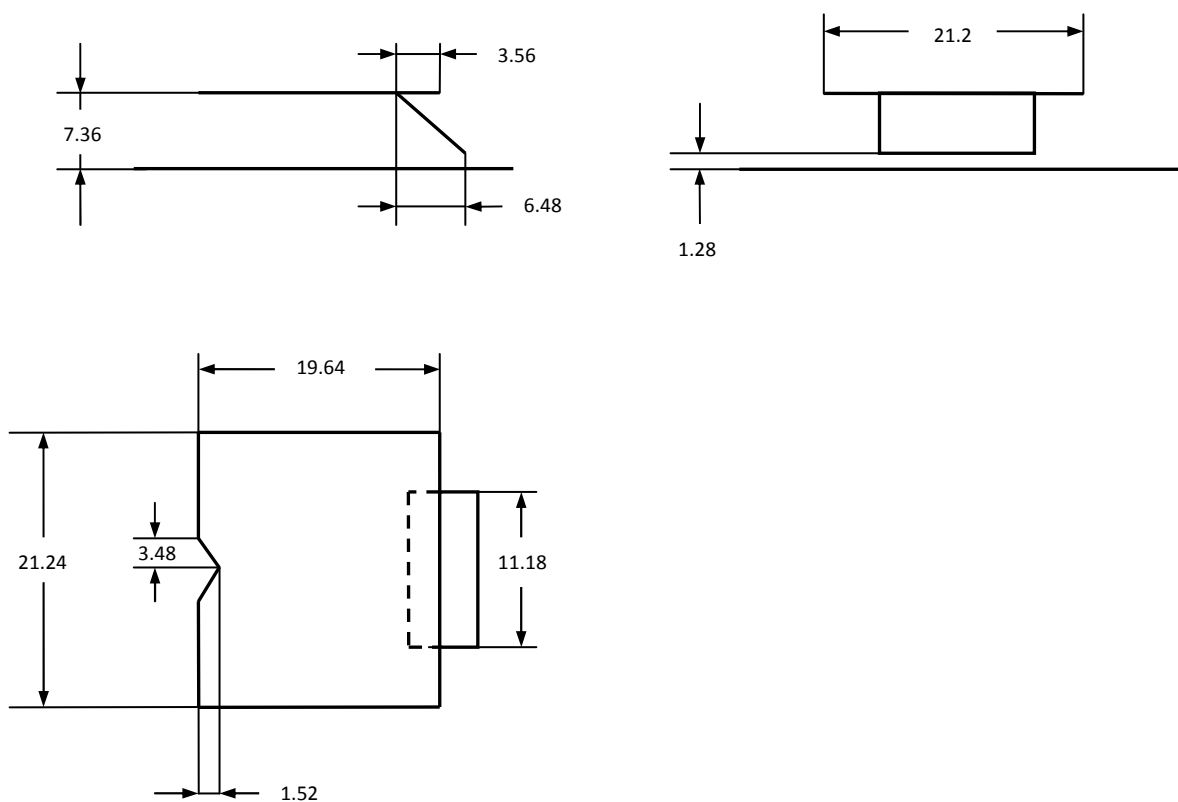


Obrázek 45 VD 15mm patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz



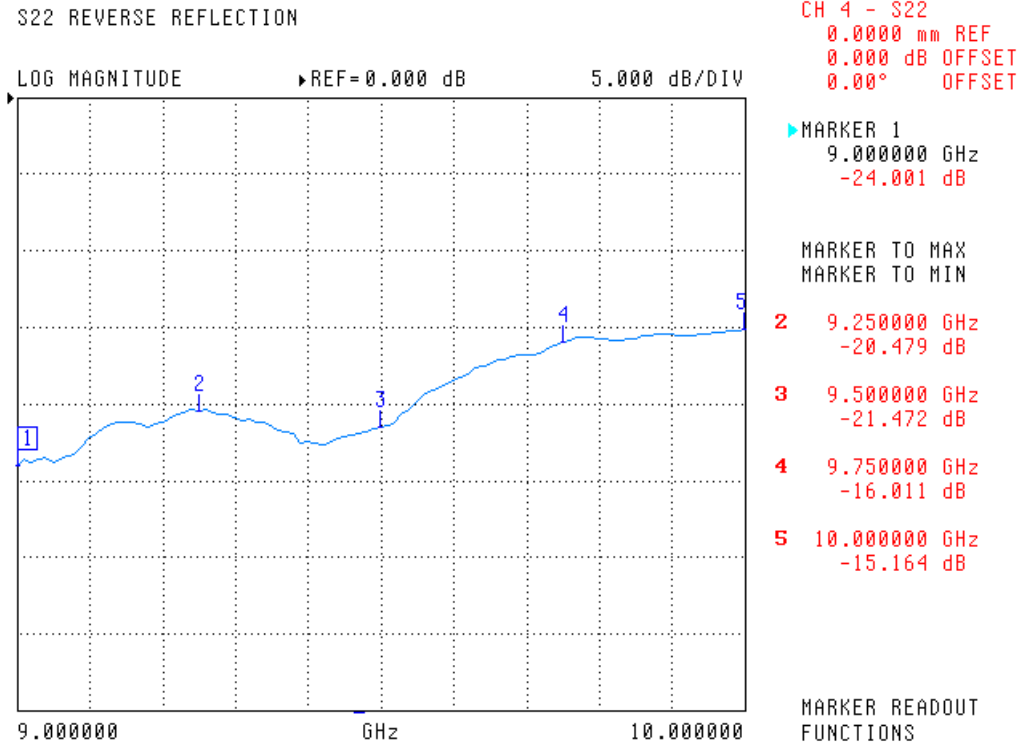
## 5.4 Širokopásmová plíšková patch anténa

Anténa představená ve výše zmíněném článku pracovala v pásmu 2.2 až 4.3 GHz a při návrhu jsem vycházel z jejích rozměrů, které jsem musel přibližně 2,5krát vydělit, abych se dostal na mnou požadované pásmo. Celá anténa je zkonstruovaná z kovových plíšků a jako substrát byl místo vzduchu použit polystyren, jelikož má podobné vlastnosti a zároveň tím odpadla nutnost konstruovat nevodivý váleček, který by přidržoval zářič nad zemnicí rovinou. Na obrázku 45 je znázorněn technický výkres, podle kterého se anténa konstruovala.

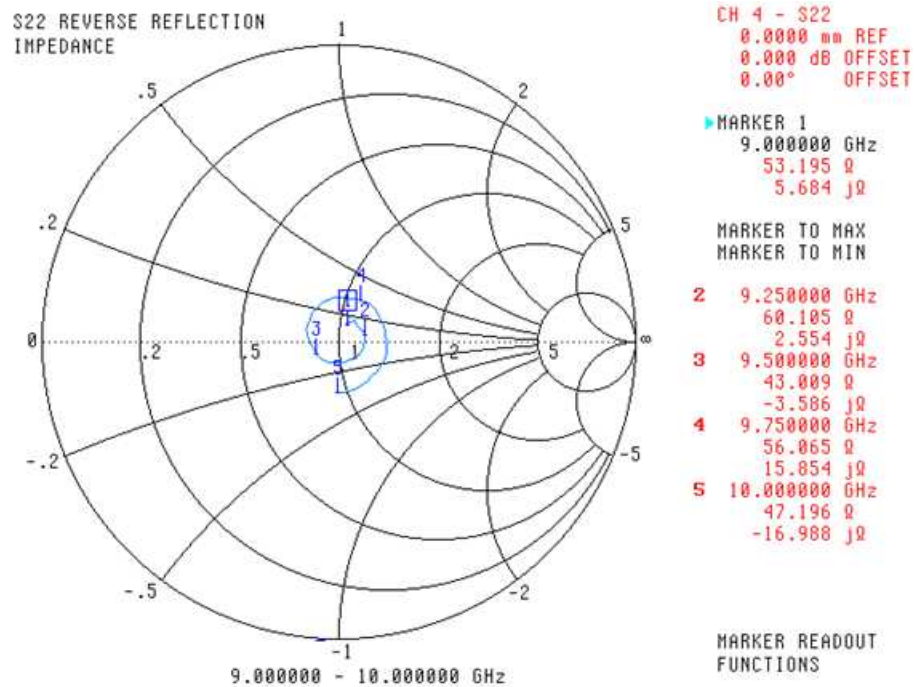


Obrázek 46 Rozměry širokopásmového patche

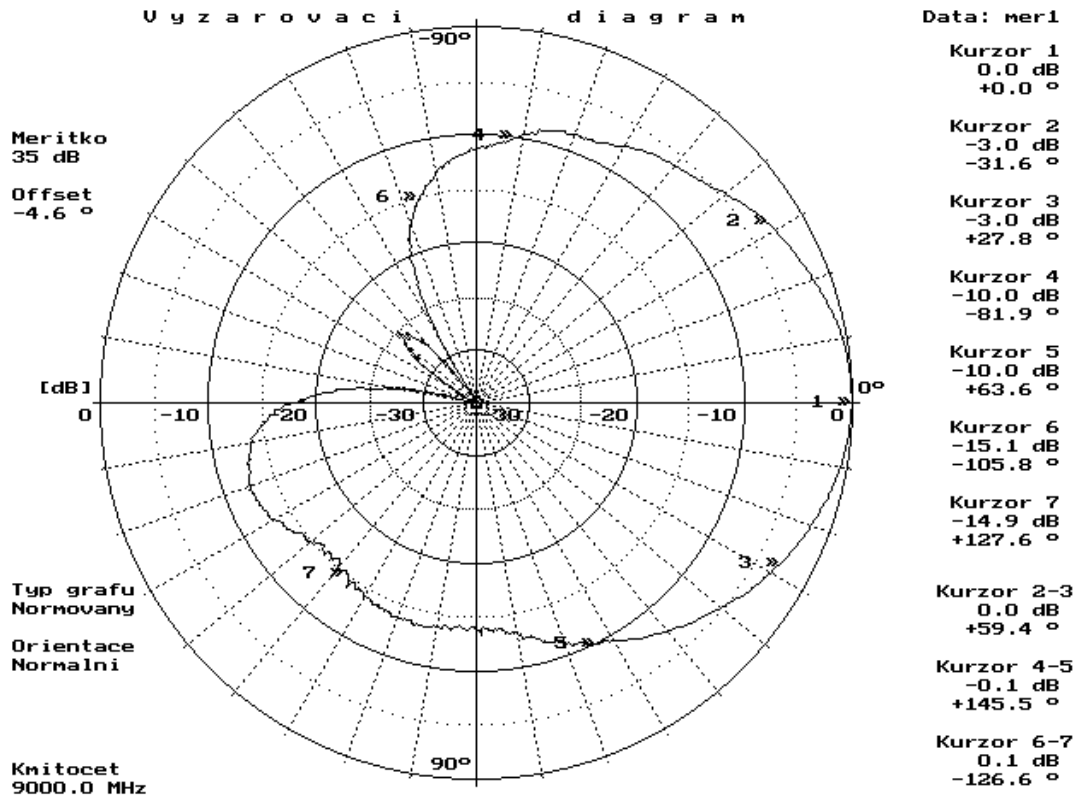
Na obrázcích 46 a 47 je zobrazeno naměřené přizpůsobení antény. Na frekvenci 10GHz je přizpůsobení -15 dB a na frekvenci 9 GHz je -24dB, což jsou hodnoty velmi dobré. Tento model patche má tedy lepší přizpůsobení, než předešlé modely konstruované z Arlonu.



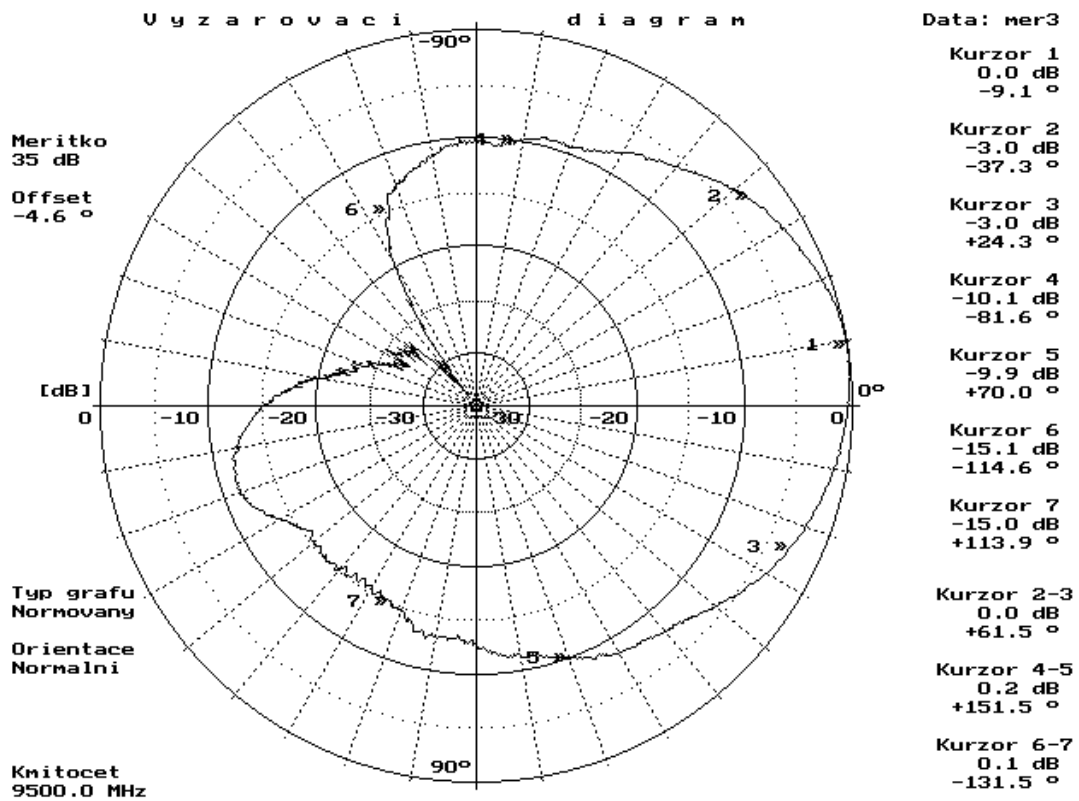
Obrázek 48 Závislost S22 širokopásmové patch antény na kmitočtu



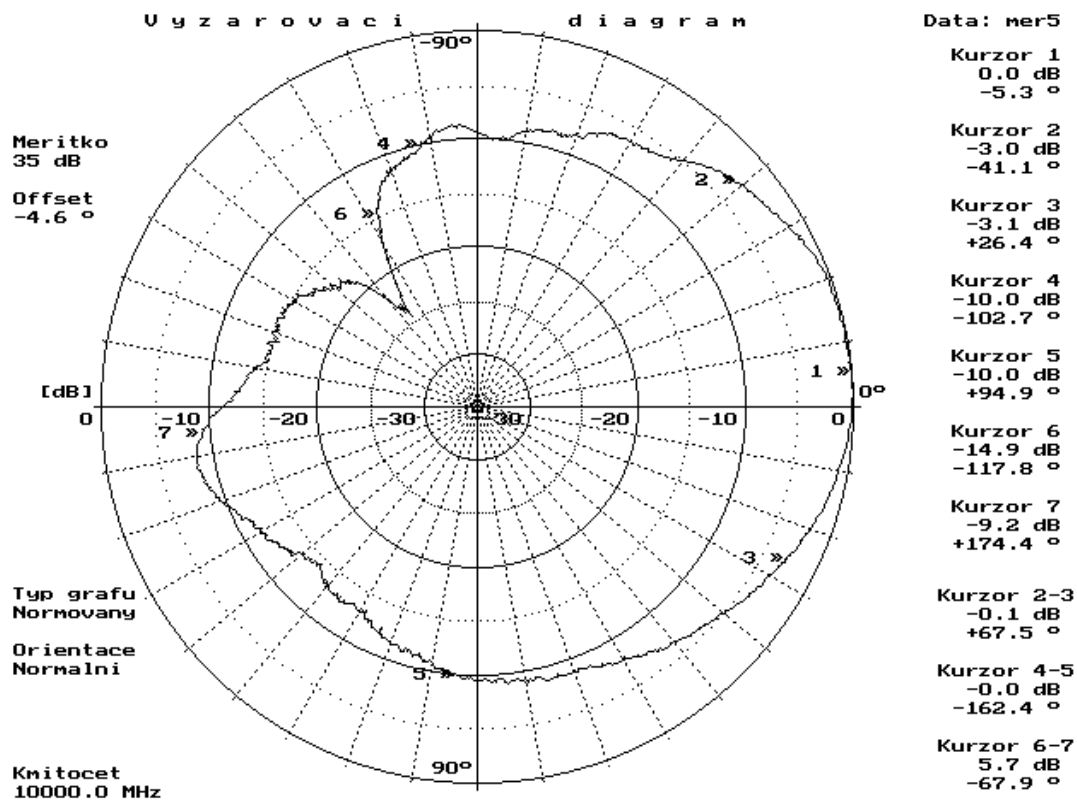
Obrázek 47 Graf přizpůsobení širokopásmové patch antény – Smithův diagram



Obrázek 49 VD širokopásmového patche v azimutu na kmitočtu 9 GHz

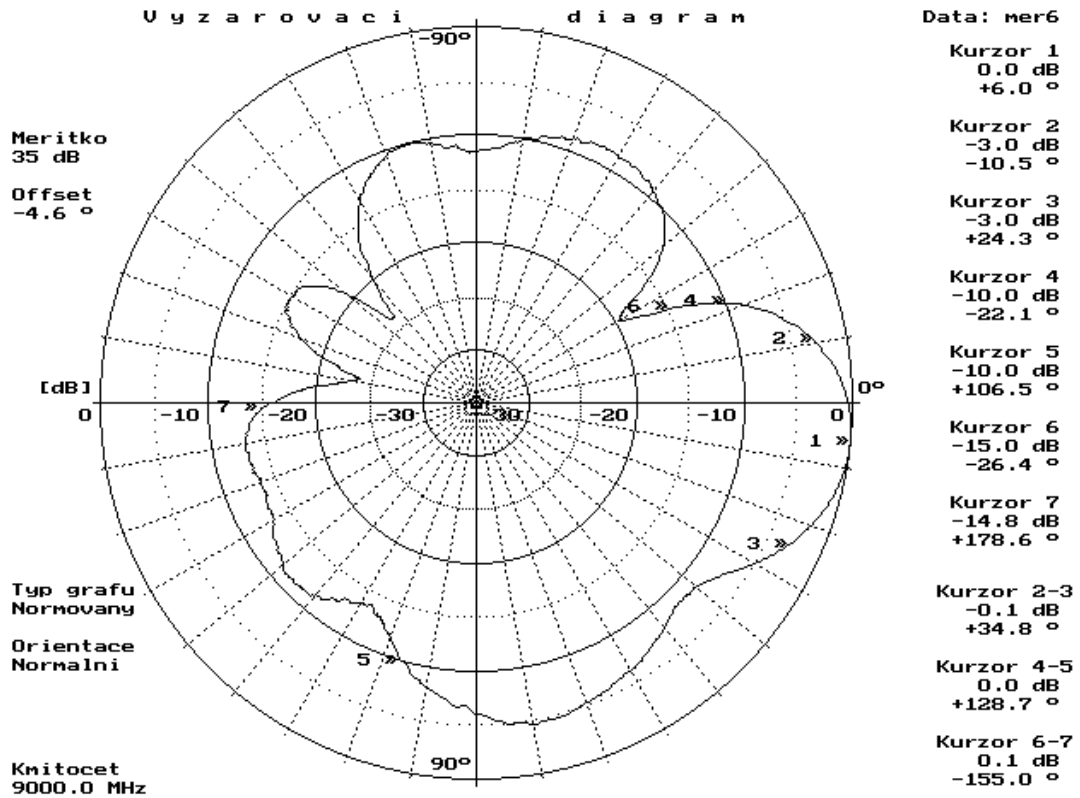


Obrázek 50 VD širokopásmového patche v azimutu na kmitočtu 9,5 GHz

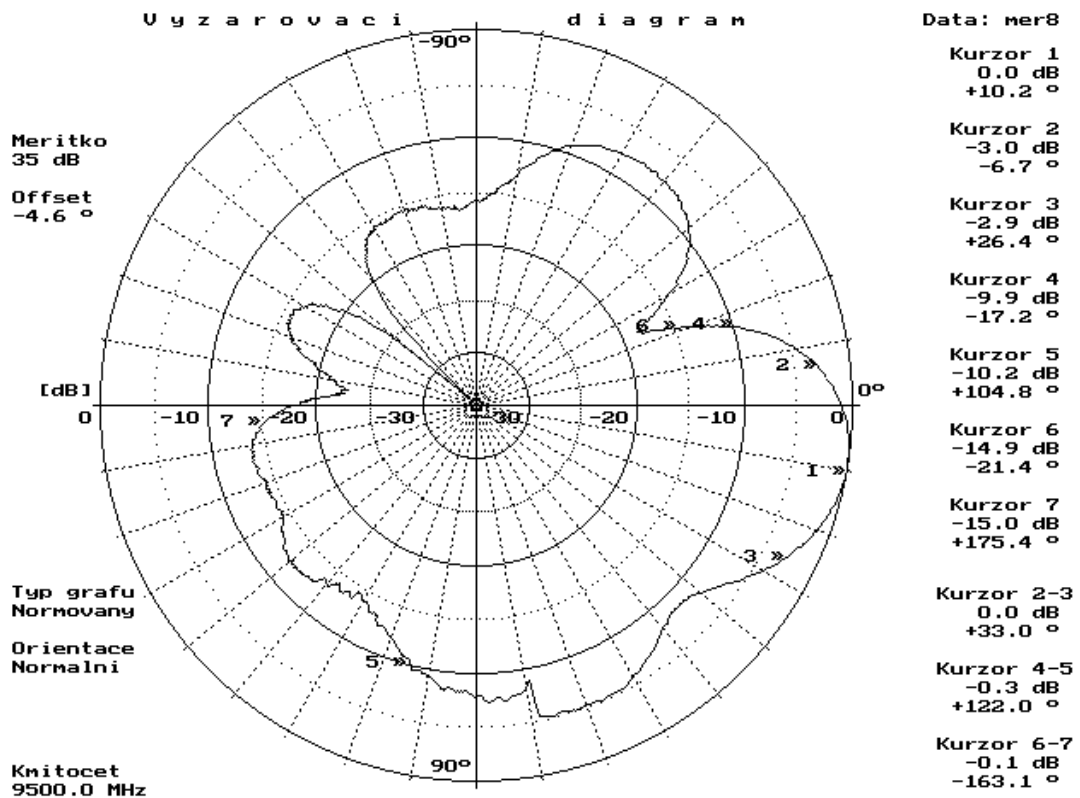


Obrázek 51 VD širokopásmového patche v azimutu na kmitočtu 10 GHz

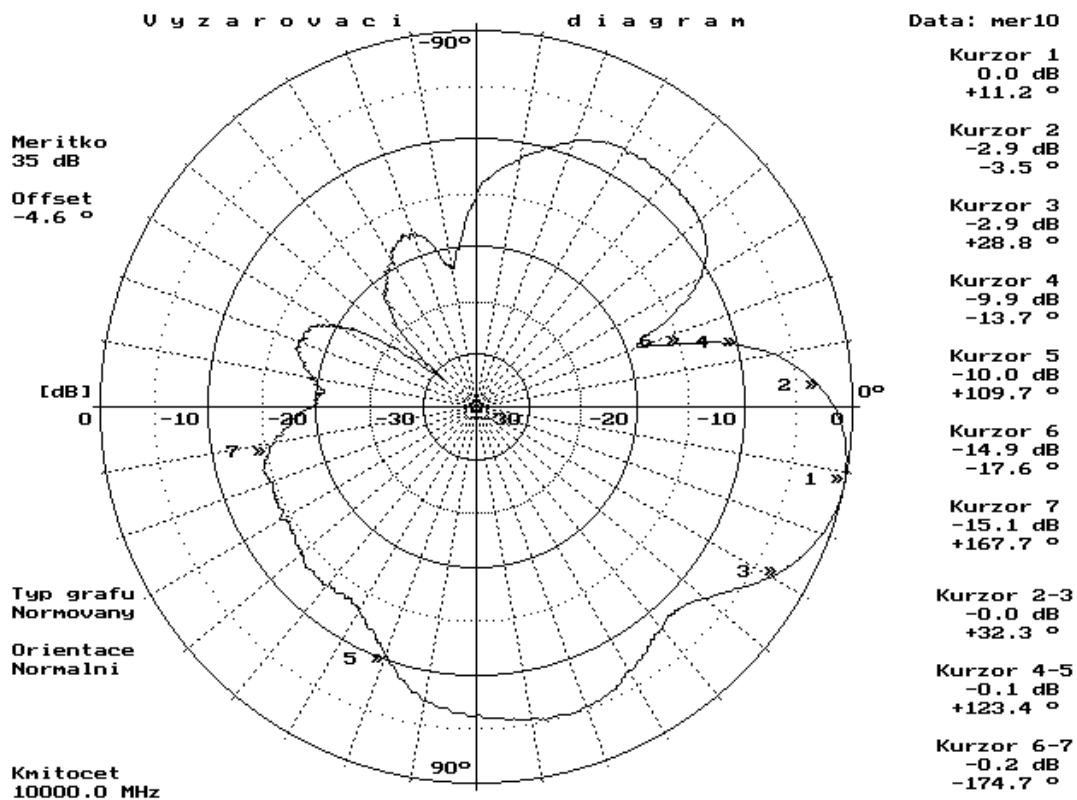
Obrázky 48-50 zobrazují vyzařovací diagram širokopásmového patche v azimutu (E rovina). Se vzrůstajícím kmitočtem se v hlavní laloku neprojevuje zvlnění, jako u předchozích modelů patche, pouze dochází k jeho rozšiřování z 59,4° na frekvenci 9GHz až na šířku 67,5° při 10GHz. Celkově má tento patch menší šířku hlavního laloku, než patche zhotovené z Arlonu. Na vyšších kmitočtech dochází ke zvětšování vyzařování do zpětného směru, což má vliv na pokles zisku antény. Tento nepříjemný jev je pravděpodobně způsoben malou zemnicí rovinou, která měla rozměry 5 x 5 cm. Při jejím zvětšení by mělo dojít ke zlepšení předozadního poměru antény a tím i k navýšení zisku. Zisk antény byl 3,53 dBi na kmitočtu 9 GHz a postupně klesal až na hodnotu -0,95 dBi na frekvenci 10GHz (viz příloha 5).



Obrázek 52 VD širokopásmového patche v elevaci na kmitočtu 9 GHz



Obrázek 53 VD širokopásmového patche v elevaci na kmitočtu 9,5 GHz



Obrázek 54 VD širokopásmového patche v elevaci na kmitočtu 10 GHz

Obrázky 51-53 zobrazují vyzařovací diagram širokopásmové patch antény v elevaci (H rovina). Tvar diagramu již není tak rovnoměrný, jako u vyzařování v E rovině. Tento fakt je především způsoben vyzařováním napájecí sondy a 3D přechodu, které se přičítá k hlavnímu vyzařovacímu diagramu patche. Při měření antény v rovině E se toto vyzařování tolik neprojevuje.

## 6 Stanovení počtu prvků anténní řady a návrh rozvodu energie

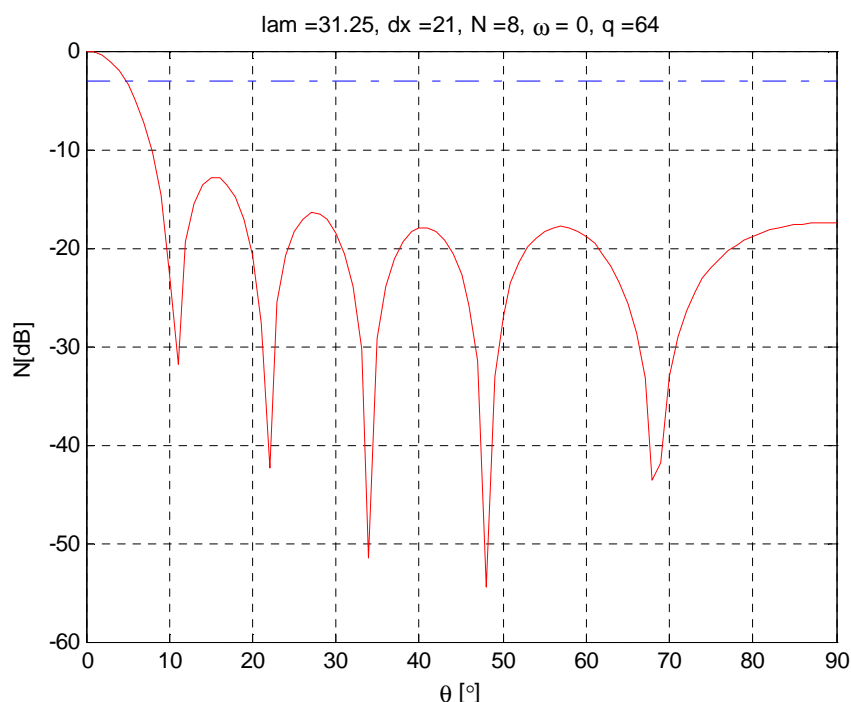
Hlavním požadavkem na anténní řadu je její zisk 20dBi. Je tedy potřeba určit počet prvků anténní řady, aby splňovala tuto podmínku. K výpočtu zisku a k simulaci vyzářovacího diagramu řady byl použit program[3], který byl napsán v Matlabu. V kapitole 2 byly odvozeny vztahy pro výpočet vzdáleného pole řady. Bylo uvedeno, že vektorové diagramy prvků jsou různé pro každý prvek, i když se používají stejné prvky a výsledný diagram anténní řady se obvykle uvažuje jako součin vektorového diagramu prvku  $f_i(\theta, \phi)$  a skalárního činitele řady  $F(\theta, \phi)$ . Program počítá pouze činitel řady, takže k vypočítanému vyzářovacímu diagramu řady se musí přičíst ještě vyzářovací diagram anténního prvku.

Celkový zisk anténní řady se počítá podle vztahu[4]  $G = g_e * q$  (5.3)

kde  $g_e$  je zisk anténního zářiče a  $q$  je zisk řady, který se počítá podle[4]

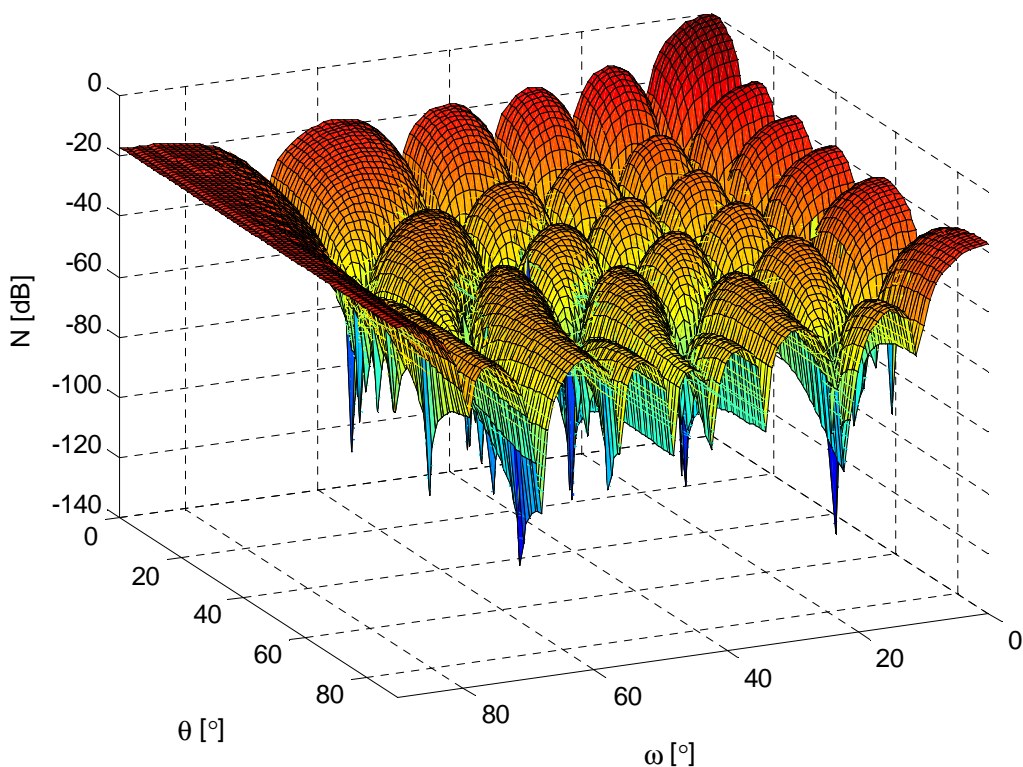
$$g = \frac{|F_{max}|^2}{\sum |a_n|^2}$$

kde  $|F_{max}|^2$  je výkon v maximu charakteristiky a  $\sum |a_n|^2$  je součet výkonů jdoucích do zářičů – neuvvažují se zde odrazy od zářičů.



Obrázek 55 Vyzařovací diagram řady v azimutu na kmitočtu

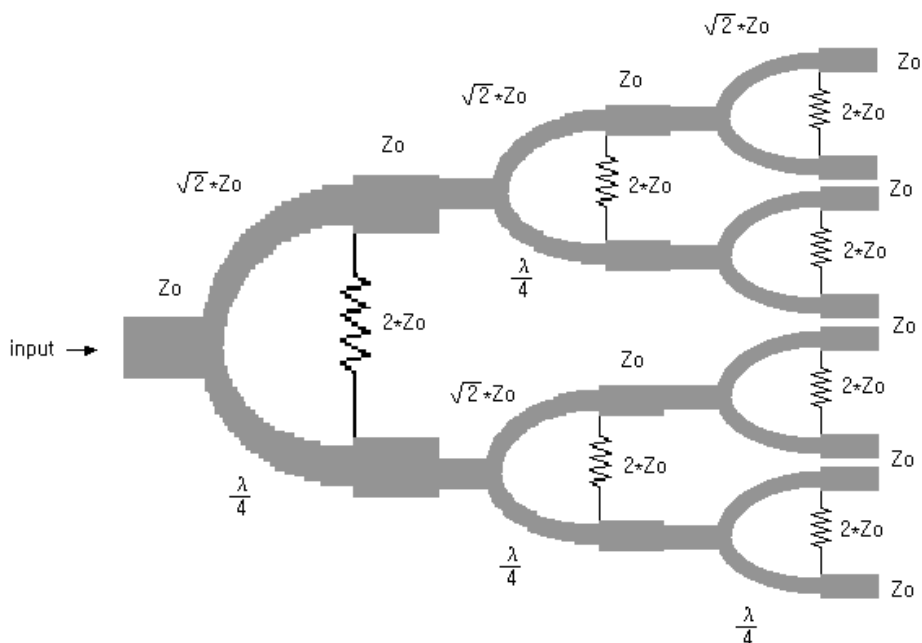
Na obrázku 54 je vypočítaný vyzařovací diagram řady v azimutu, označení  $N$  znamená funkci normovanou k maximum vyzařování. Rozložení amplitud a fází bylo zvoleno jako rovnoměrné, jelikož má největší zisk a nejužší vyzařovací diagram, ale musí se počítat s vyššími postranními laloky. Řada je sestavena z 64 zářičů (pole 8 x 8 prvků). Zisk řady  $q$  je v poměrných jednotkách roven 64, v dB to tedy činí  $10 \log(q) = 18 \text{ dB}$ . Aby bylo dosaženo požadovaných 20 dB, musely by se použít zářiče s minimálním ziskem 2 dB. Jednotlivé prvky by se umístily do anténní řady zrcadlově otočené a napájecí signály by byly přivedené se stejnou amplitudou avšak s fází otočenou o  $180^\circ$  z důvodu potlačení příčné polarizace. Pokud by byl k dispozici zářič se ziskem 5dB, stačilo by na konstrukci anténní řady pole 6 x 6 prvků. Mezielementová vzdálenost byla stanovena na 21mm v ose X i v ose Y. Při jejím zvětšování se zužuje hlavního laloku, avšak zároveň dochází nárůstu postranních laloků, především v úhlu  $90^\circ$ . Vzhledem k stejné mezielementové vzdálenosti v obou osách a rovnoměrnému ozáření řady, je její vypočítaná charakteristika totožná v azimutu i v elevaci avšak celková charakteristika by byla v těchto dvou rovinách rozdílná, jelikož výsledný diagram anténní řady se uvažuje jako součin vektorového diagramu prvku a skalárního činitele řady.



Obrázek 56 Vyzařovací charakteristika řady 3D



Vstupní signál se k jednotlivým zářičům přivede pomocí Wilkinsonových děličů výkonu. Tyto děliče byly popsány v kapitole 5. Pro jejich použití v tomto případě hovoří fakt, že mohou být použity s rovnoměrným dělením signálu, mají oddělené výstupní porty a jejich konstrukce je poměrně jednoduchá. Na obrázku 56 je schematicky naznačené zapojení sedmi Wilkinsonových děličů.



Obrázek 57 Schematické zapojení děličů

Jedno takové zapojení bude schopné přivést napájecí výkon k osmi zářičům, čili k jedné z osmi úrovní anténní řady. Pro napájení všech 64 zářičů bude tedy zapotřebí osm takových zapojení děličů, které budou umístěny vodorovně nad sebou. Je žádoucí, aby byl vstupní výkon přiveden k anténní řadě pouze jedním vedením, to znamená, že se použije ještě jedno zapojení Wilkinsonových děličů kolmo připojené k předchozím osmi zapojením.

## Závěr

V teoretické části byla provedena analýza patch antén, byly uvedeny výhody a nevýhody jejich použití. Zvláštní pozornost byla věnována vyzařovacím diagramům a jevům, které ovlivňují jejich tvar. Dále byl v této části proveden rozbor šířky pásma a činitele jakosti.

Hlavní přínos práce vidím v návrhu, zhotovení a měření několika mikropáskových antén, které jsem mezi sebou porovnával a snažil jsem se najít nejvhodnější model pro konstrukci plošné anténní řady se ziskem 20 dB.

Podle teoretických vztahů uvedených v kapitole 1.2 byly navrženy a zkonstruovány tři modely mikropáskových antén, které se mezi sebou lišily rozměry zářiče. Ke konstrukci byl použit materiál Arlon AD450, který nemá úplně vhodné předpoklady ke konstrukci širokopásmového zářiče, vzhledem k jeho vysoké relativní permitivitě ( $\epsilon_r = 4,5$ ), ale na druhou stranu byl snadno dostupný a finančně nenáročný.

Měření mikropáskových antén bylo provedeno v bezodrazové komoře a bylo zaměřeno především na získání vyzařovacích charakteristik, měření přizpůsobení antén a v neposlední řadě také zisku. Již při měření přizpůsobení antény se ukázalo, že patche nebudou mít stálé vlastnosti v požadovaném kmitočtovém pásmu 9,2 až 10 GHz. Charakteristiky antén se od sebe příliš neliší, se vzrůstajícím kmitočtem je patrné vzrůstající zvlnění hlavního laloku, které má za následek pravděpodobně horšící se přizpůsobení antén. V pásmu kmitočtů, kde je PSV menší než 2, má nejlepší z těchto antén zisk 4,5 dB, avšak ve zbytku pásma zisk klesá až na hodnotu -2,35 dB. Šířka pásma, ve kterém by byly antény přizpůsobené, by se dala zvětšit pomocí opatření uvedených na konci kapitoly 1.2, ale domnívám se, že by to nestačilo na požadované pásmo 9,2 – 10GHz.

Tyto poznatky vedly k návrhu a konstrukci čtvrté mikropáskové antény, která by splňovala podmínky širokopásmovosti. Tento patch byl představen v kapitolách 1.3 a 5.4. Během měření přizpůsobení dosahoval tento model velmi dobrých hodnot  $S_{22}$  od -15dB do -24dB, ale zisk již nebyl tak dobrý. Jeho hodnota nebyla v celém pásmu kmitočtů konstantní a klesala směrem k vyšším frekvencím. Tento fakt je pravděpodobně způsoben malou zemnicí rovinou s rozměry 5 x 5 cm a tím zmenšeným předozadním poměrem antény. Zisk tohoto patche by se tedy měl zvýšit pouhým umístěním do rovinné anténní řady, u které je jedna velká zemnicí deska společná pro všechny anténní prvky.

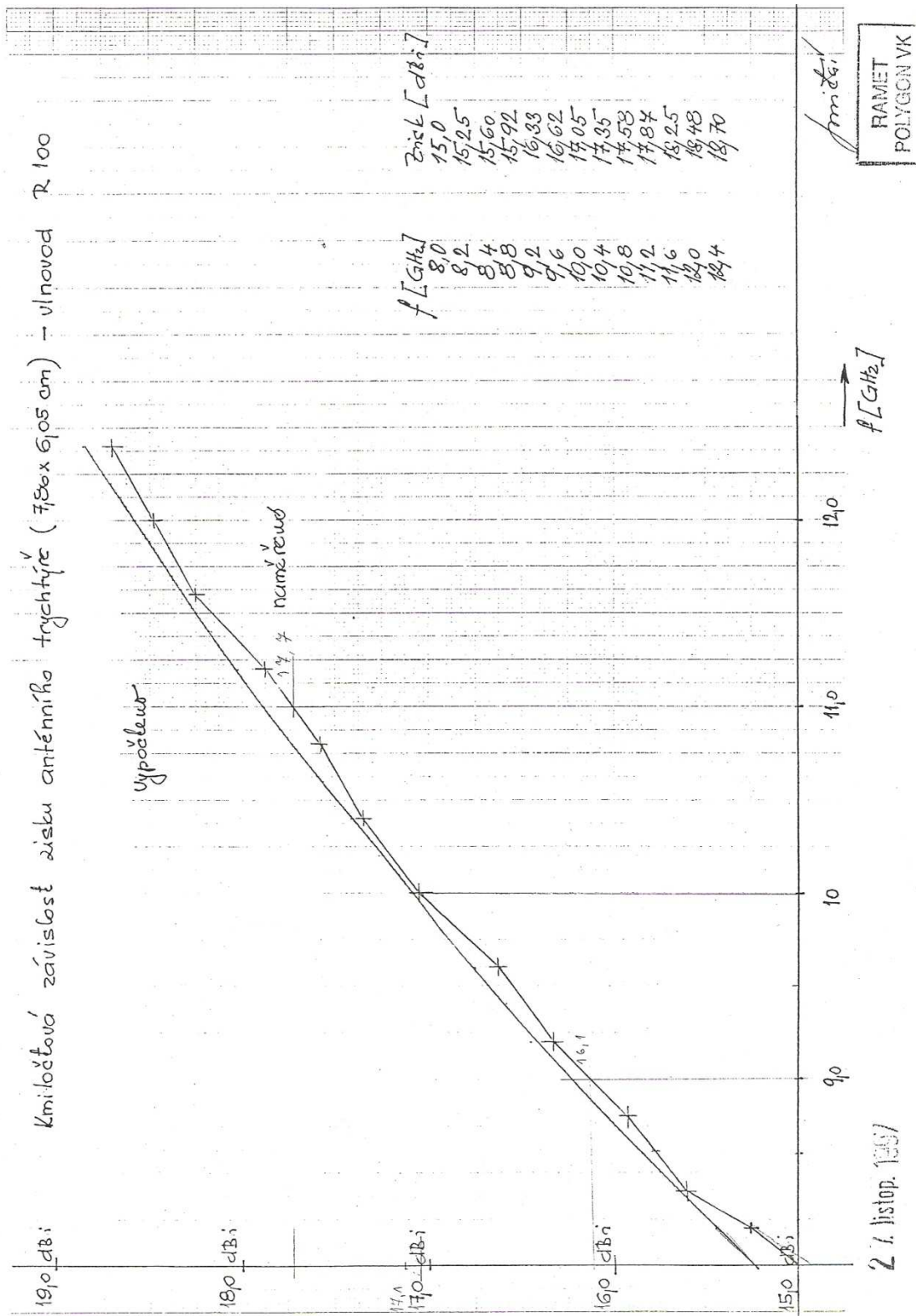
Návrh plošné anténní řady byl proveden pomocí programu ArrayAntena [3]. Aby anténní řada dosáhla požadovaného zisku 20 dB, muselo by se použít pole 8 x 8 zářičů vzhledem k jejich nízkému vlastnímu zisku. Vstupní signál by se k jednotlivým zářičům přivedl pomocí Wilkinsonových děličů s rovnoměrným dělením výkonu. Jako nejvhodnější anténní prvek se jeví širokopásmový jednovrstvý patch popsany v kapitole 1.3. Jednotlivé prvky by se umístily do anténní řady zrcadlově otočené a napájecí signály by byly přivedené se stejnou amplitudou avšak s fází otočenou o  $180^\circ$  z důvodu potlačení příčné polarizace.

Z důvodu náročnosti výroby tak velkého počtu zářičů nebylo přistoupeno ke zhotovení výsledné anténní řady. Možnost rozvoje tohoto tématu do budoucnosti vidím ve zlepšení přizpůsobení klasických mikropáskových antén, například pomocí kapacitorů umístěných na napájecím pinu, jako je to uvedeno v kapitole 1.2. Další rozšíření tohoto tématu by mohlo být v podobě návrhu a konstrukce vícevrstvých mikropáskových antén.

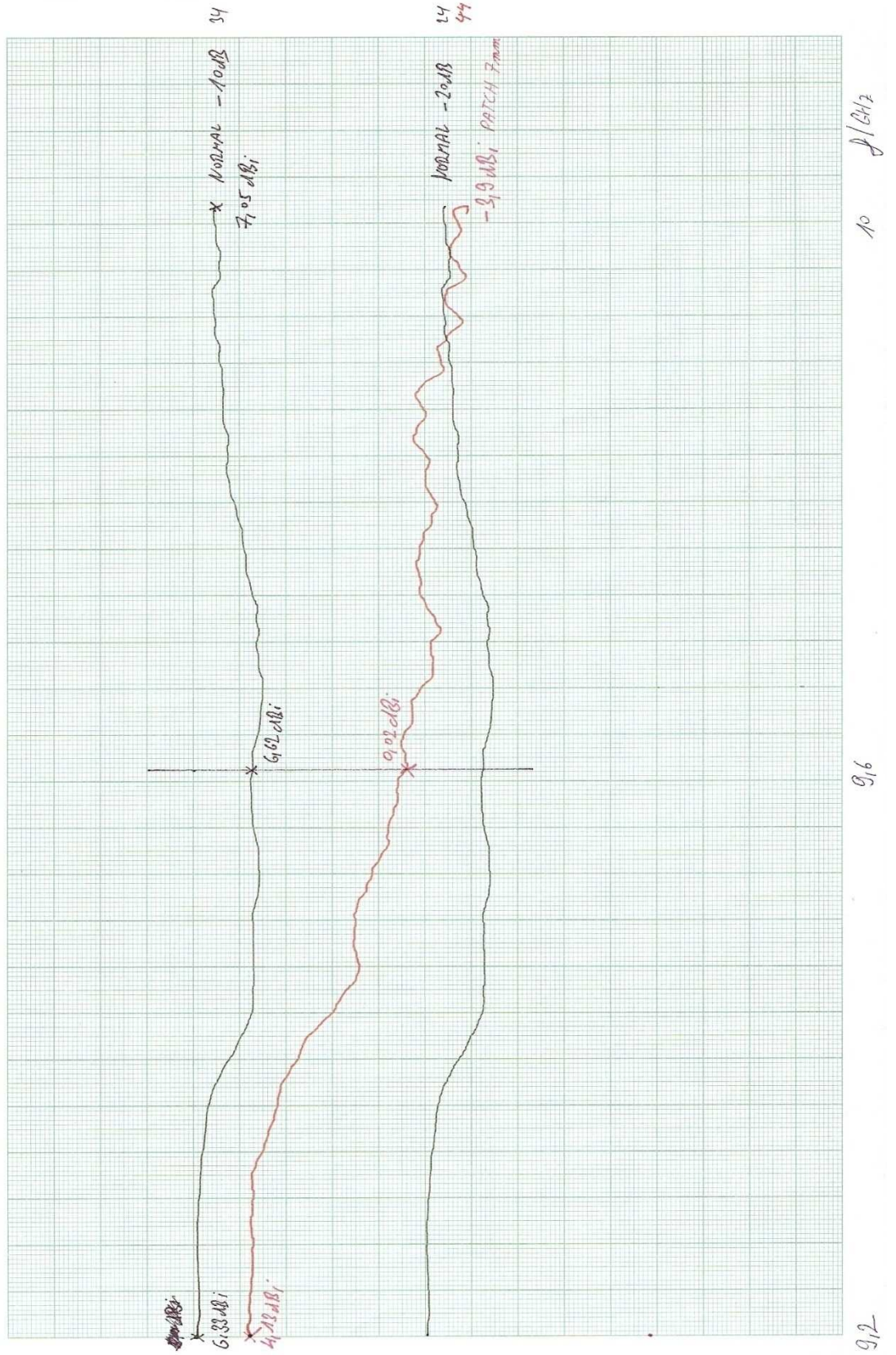
## Seznam literatury

- [1] POZAR, D. M. *Microwave Engineering*, 2005, Hoboken, John Wiley&Sons.
- [2] MILLIGAN, T. A. *Modern Antenna Design*, 2nded.2005, Hoboken, John Wiley&Sons.ISBN-13 978-0-471-45776-3 (cloth).
- [3] SCHEJBAL, V. *ArrayAntena.m 2010*. [cit. 2011-05-15] Dostupné na WWW: <<http://www.upce.cz/fei/veda-vyzkum/software/336998.html>>.
- [4] MAILLOUX R. J. *Phased array antenna handbook 2005*, Norwood artech house, Boston 2005.
- [5] SCHEJBAL V., KOVAŘÍK V., *Method of Cross – Polarization Reduction IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 5, s. 108-111, (2006).
- [6] VOLAKIS, J. L., *Antenna Engineering Handbook – Fourth Edition 2007 IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 3, s 119 – 126.
- [7] MOERNAUT, G.J.K.,ORBAN D., *The Basics of Antenna Arrays Orban Microwave Products*, [cit.2011-05-11]. Dostupné na WWW: <[http://www.orbanmicrowave.com/The\\_Basics\\_of\\_Antenna\\_Arrays.pdf](http://www.orbanmicrowave.com/The_Basics_of_Antenna_Arrays.pdf)>.
- [8] HERSCOVICI, N., *A Wide-Band Single-Layer Patch Antenna*, IEEEAntennas and PropagationMagazine issue 4, s. 471 – 474.
- [9] SCHEJBAL, V. CAD of rectangular microstrip antennas. *Radioengineering*. 1999, vol. 8, no. 3, p. 17 - 20.
- [10] PD1080 - Power Divider, Combiner, Splitter 8 Way, Type N Female (Jack), 0.7-2.7 GHz, 40 Watts [cit.2011-05-28]. Dostupné na WWW: <[http://www.instockwireless.com/power\\_divider\\_pd1080\\_fab.htm](http://www.instockwireless.com/power_divider_pd1080_fab.htm)>

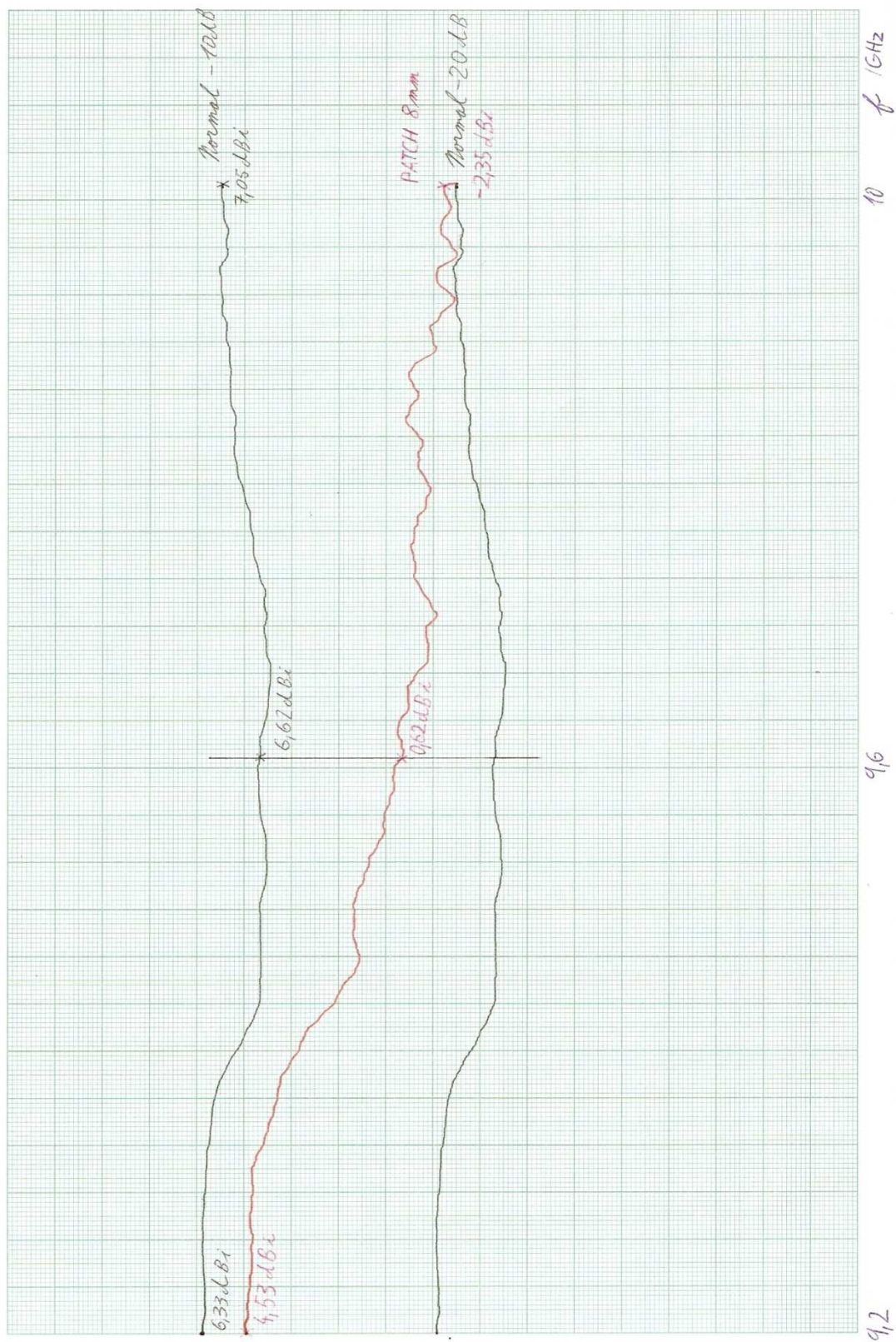
# Přílohy



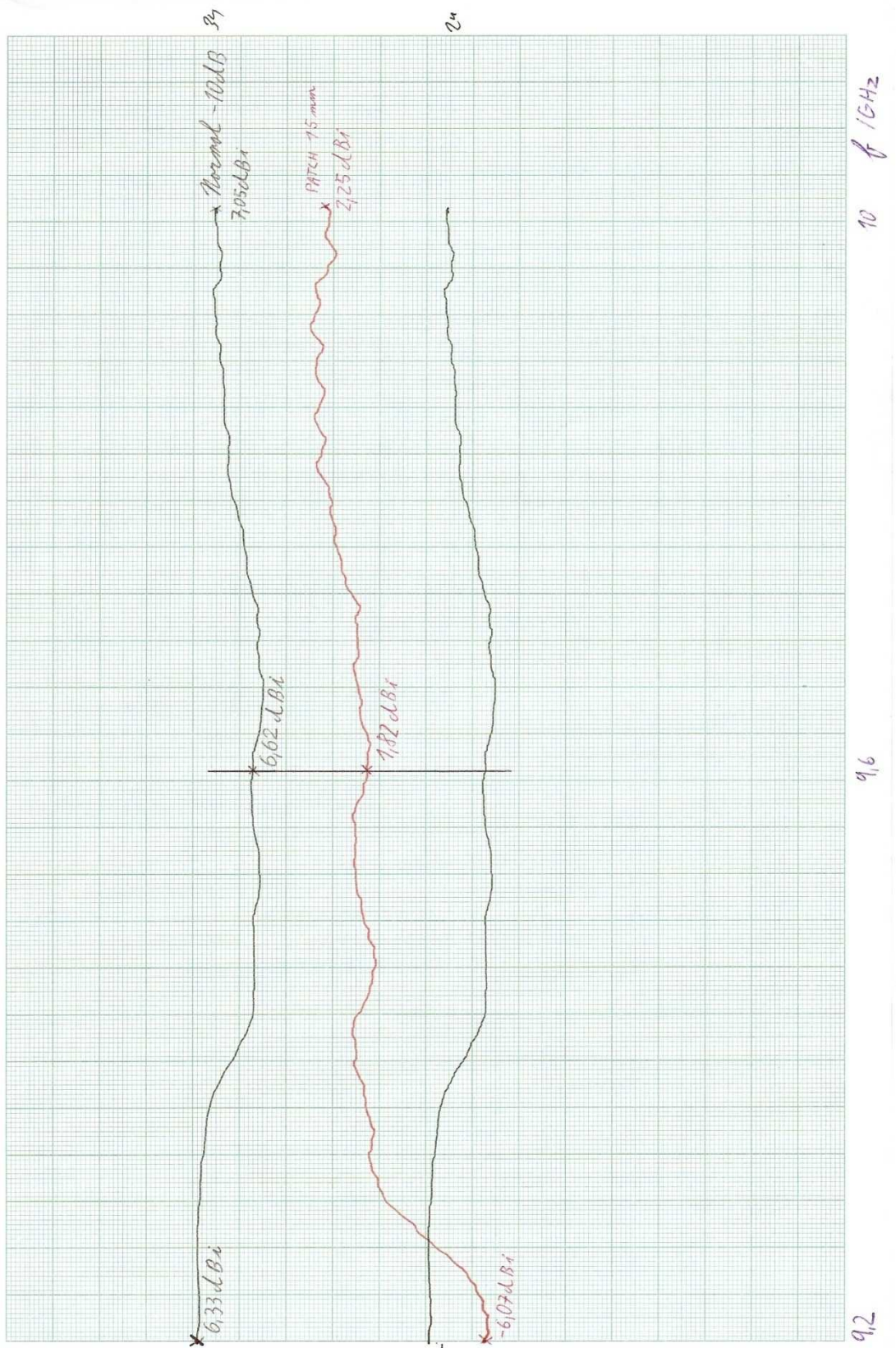
Příloha 1 Zisk anténního normálu



Příloha 2 Zisk 7mm patche

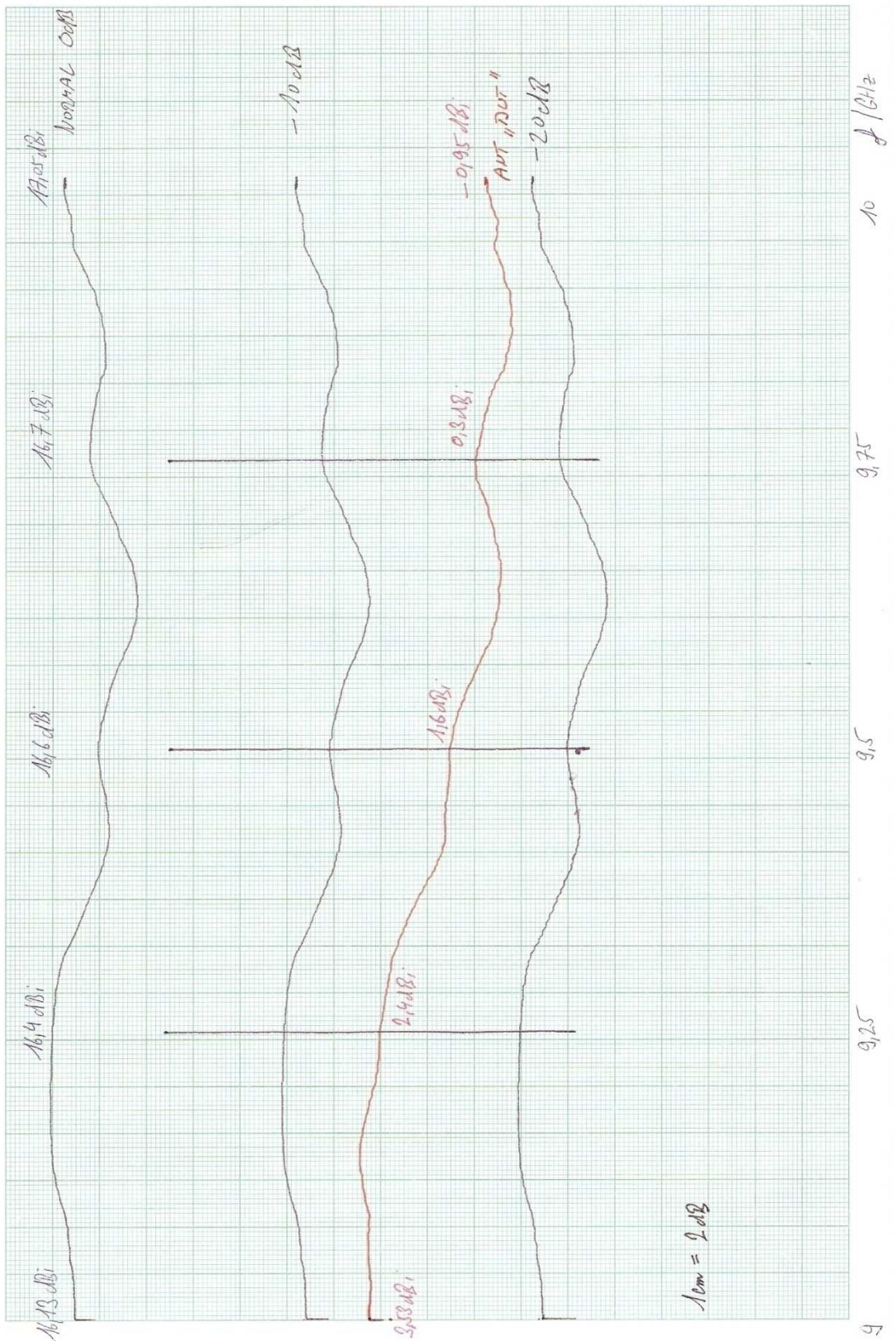


Příloha 3 Zisk 8 mm patche



Příloha 4 Zisk 15 mm patche

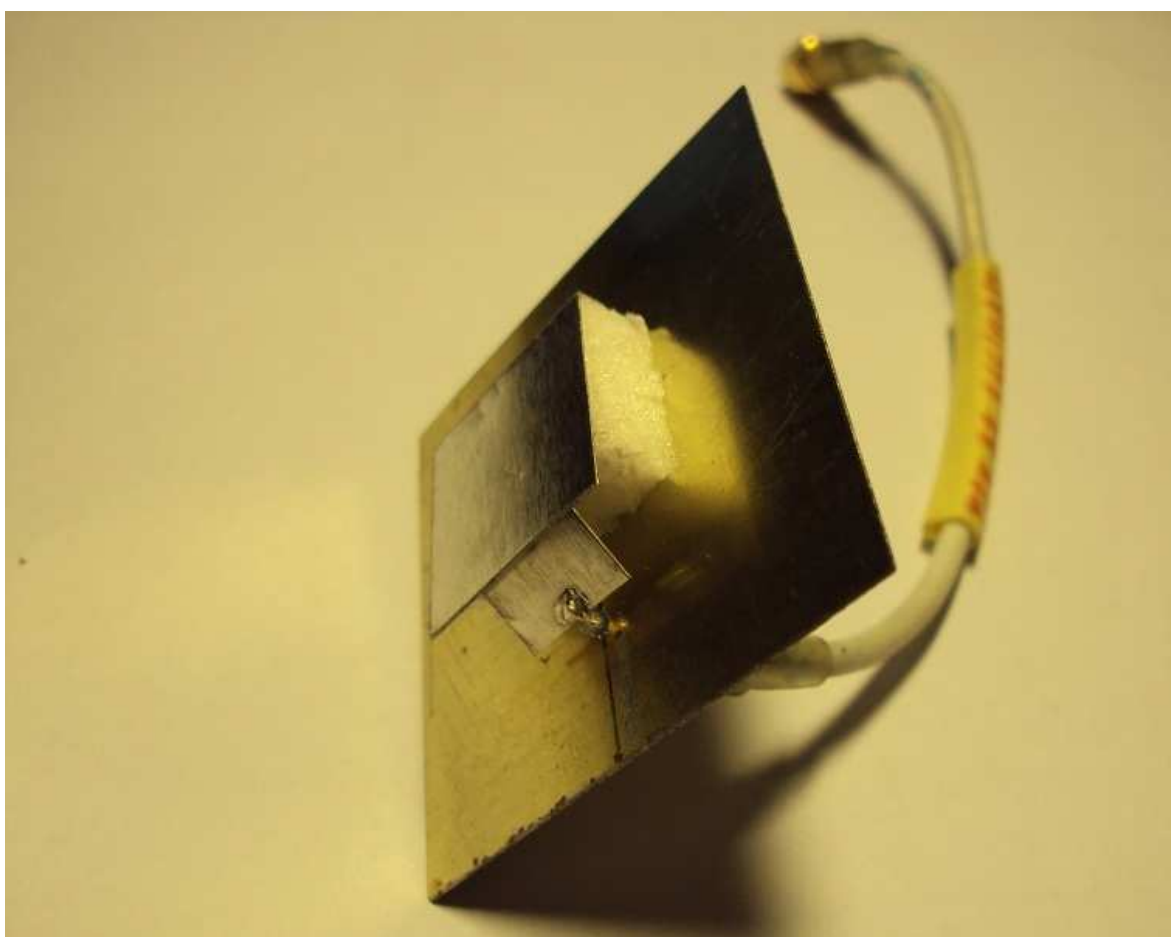




Příloha 5 Zisk širokopásmového patche



Příloha 6 Sada sedmi wilkinsonových děličů [10]



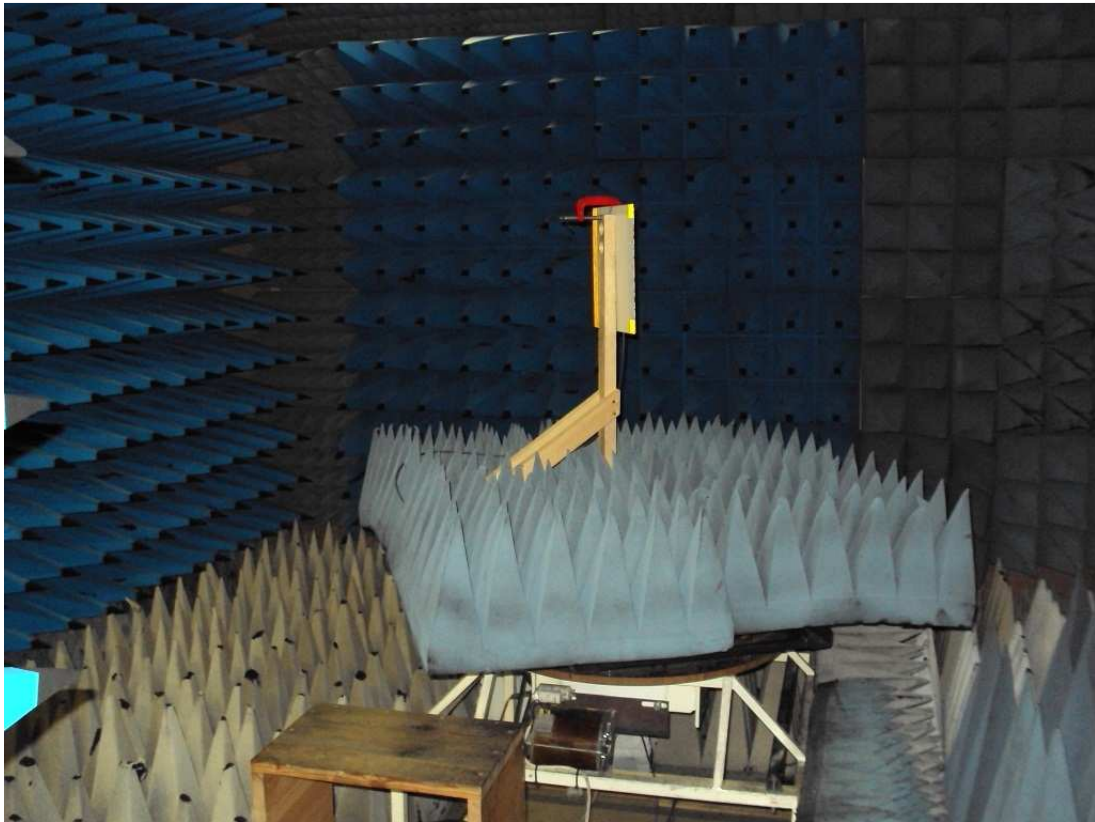
Příloha 7 Zkonstruovaná širokopásmová patch anténa



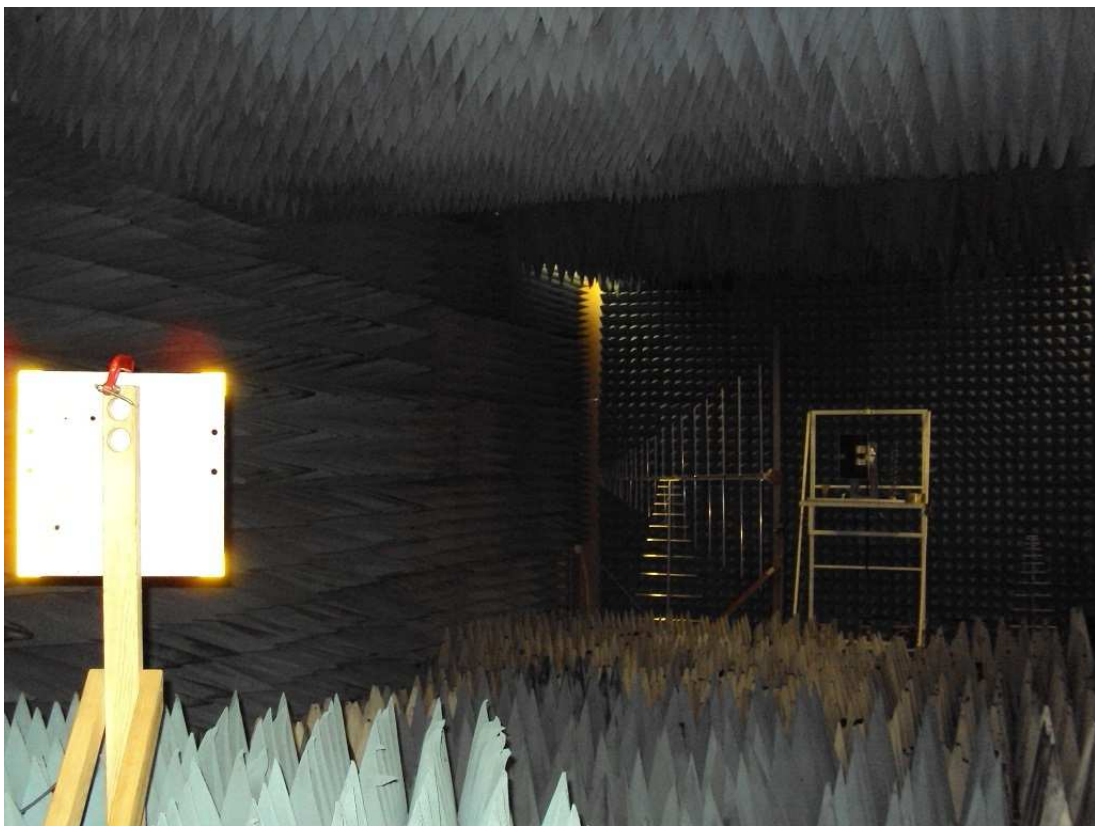
Příloha 8 Zkonstruovaná mikropásková anténa - čelní pohled



Příloha 9 Zkonstruovaná mikropásková anténa – zadní pohled



Příloha 10 Bezodrazová komora ERA



Příloha 11 Bezodrazová komora ERA



Příloha 12 Měřicí pracoviště