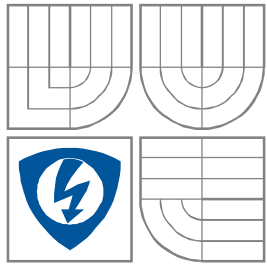


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MALÁ AKTIVNÍ INTEGROVANÁ ANTÉNA SMALL-SIZE ACTIVE INTEGRATED ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S PROJECT

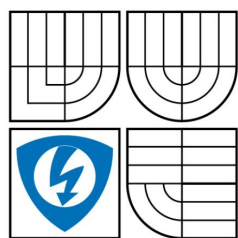
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Rostislav Nunvář

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Rostislav Nunvář

**ID:** 98490

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Malá aktivní integrovaná anténa**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základními typy planárních antén, s metodami jejich návrhu, optimalizace a modelování v programu ANSOFT Designer. Vytvořte model jednoduché planární antény pro pásmo 5,725 až 5,825 GHz s velmi širokým vyzařovacím diagramem v horizontální rovině.

Model antény doplňte aktivními komponenty. Detailně porovnejte pasivní a aktivní strukturu a diskutujte výhody a nevýhody obou řešení. Pokuste se o experimentální ověření parametrů antény.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C. A. Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition. New York: J. Wiley and Sons, 2005.

[2] MUELLER, C. H. et al. Small-size X-band active integrated antenna with feedback loop. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008, vol. 56, no. 5, p. 1236-1241.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 5.6.2009

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Abstrakt

Práce se zabývá základními typy planárních antén, jejich návrhem a modelováním v programu ANSOFT Designer. V práci je popsán způsob, kterým je možné planární anténu doplnit aktivním prvkem (tranzistorem). Tranzistor je do planární struktury implementován pomocí funkce N-Port, kterou Ansoft Designer nabízí. V závěru práce jsou popsány nevýhody a výhody pasivní a aktivní planární antény.

## Abstract

Bachelor's thesis deals with basic types of planar antennas, with the design and simulation in the program ANSOFT Designer. The project is focused on the completion of a planar antenna by an active element (a transistor). The transistor can be integrated into planar structure by the N-Port function of Ansoft Designer. Finally, advantages and disadvantages of passive and active planar antennas are described.

## Klíčová slova

Planární anténa, aktivní integrovaná anténa, ANSOFT Designer, N-Port.

## Keywords

Planar antenna, active integrated antenna, ANSOFT Designer, N-Port.

## Bibliografická citace práce:

NUNVÁŘ, R. *Aktivní integrovaná anténa*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 29 s. FEKT VUT v Brně, 2009. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Rostislav Nunvář  
Bytem: č. p. 223, 569 63 Lubná u Poličky  
Narozen/a (datum a místo): 5. listopadu 1986 v Poličce

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Malá aktivní integrovaná anténa

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 5. června 2009

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Aktivní integrovaná anténa jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....  
podpis autor

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>PLANÁRNÍ ANTÉNY</b>	<b>9</b>
2.1	FLÍČKOVÁ ANTÉNA	9
2.2	NAPÁJENÍ FLÍČKOVÝCH ANTÉN	10
2.3	FLÍČKOVÁ ANTÉNA S AKTIVNÍM PRVKEM	11
<b>3</b>	<b>MODELOVÁNÍ PLANÁRNÍCH ANTÉN</b>	<b>12</b>
3.1	MODELOVÁNÍ ANTÉN V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER	12
3.2	NÁVRH FLÍČKOVÉ ANTÉNY	14
3.3	FLÍČKOVÁ ANTÉNA SE ZPĚTNOU VAZBOU	17
3.4	FLÍČKOVÁ ANTÉNA S AKTIVNÍM PRVKEM	17
<b>4</b>	<b>PRVKY ANTÉNY</b>	<b>18</b>
4.1	TRANZISTOR	18
4.2	KAPACITOR	18
<b>5</b>	<b>VLOŽENÍ PRVKU DO PLANÁRNÍ STRUKTURY</b>	<b>19</b>
5.1	N-PORT	19
5.2	N-PORT V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER	20
5.3	ANTÉNA S AKTIVNÍMI PRVKY	21
<b>6</b>	<b>REALIZACE ANTÉNY</b>	<b>24</b>
6.1	EXPORT DO FORMÁTU GELBER_RS274	24
6.2	VÝROBA ANTÉNY	24
<b>7</b>	<b>POROVNÁNÍ PARAMETRŮ PASIVNÍ A AKTIVNÍ STRUKTURY</b>	<b>25</b>
7.1	PASIVNÍ STRUKTURA	25
7.2	AKTIVNÍ STRUKTURA	26
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>27</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURA</b>	<b>28</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>28</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>29</b>

# 1 Úvod

Historie antén sahá hluboko do minulosti. V roce 1865 zveřejnil fyzik J. C. Maxwell svou teoretickou práci o vlnové podstatě světla, elektřiny a magnetismu a formuloval soustavu čtyř rovnic, které popisují vzájemné působení elektrických a magnetických polí. V roce 1887 fyzik Heinrich Hertz vynalezl oscilátor, kterým vybudil elektromagnetické vlny a měřil jejich délku a rychlost. Prvním, kdo úspěšně sestrojil a zprovoznil radiový systém, byl Ital Guglielmo Marconi. V roce 1901 dokázal přenést signál přes Atlantický oceán. Za své výzkumy se stal spoludržitelem Nobelovy ceny.

V dnešní době je bezdrátový přenos informací každodenní záležitostí. Jako příklad lze uvést mobilní komunikace, sledování televize či poslech rádia.

S vývojem nových technologií, které sebou přinášejí miniaturizaci součástek a zvyšování pracovního kmitočtu, narůstají požadavky na minimalizaci rozměrů antén. Často se používají základní planární antény a jejich varianty se zmenšenými rozměry. Planární antény mají nízký profil, jsou lehké a snadno se vyrábějí. Na druhou stranu se jedná o antény úzkopásmové s relativně nízkou účinností [2].

Cílem předkládané práce je rozbor základních typů planárních antén, metod jejich návrhu, optimalizace a modelování v programu ANSOFT Designer. Postup návrhu, optimalizace a modelování bude demonstrován na netradiční variantě flíčkové antény. Tato anténa bude následně doplněna aktivním prvkem (tranzistorem) a provedena její simulace.

## 2 Planární antény

Planární antény jsou v dnešní době velice rozšířeným typem antén. Jejich výroba je podobná výrobě plošných spojů, což umožňuje jejich levnou produkci. Nevýhodou planárních antén je malý zisk (okolo 6 dB) a malá účinnost [2].

Anténa se skládá z dielektrického substrátu, který má vytvořen na jedné straně vodivý flíček a na druhé straně je souvisle pokoven. Toto pokovení tvoří zemní stěnu antény. Jelikož je toto pokovení po celé spodní vrstvě substrátu, anténa vyzařuje pouze do jednoho poloprostoru [2].

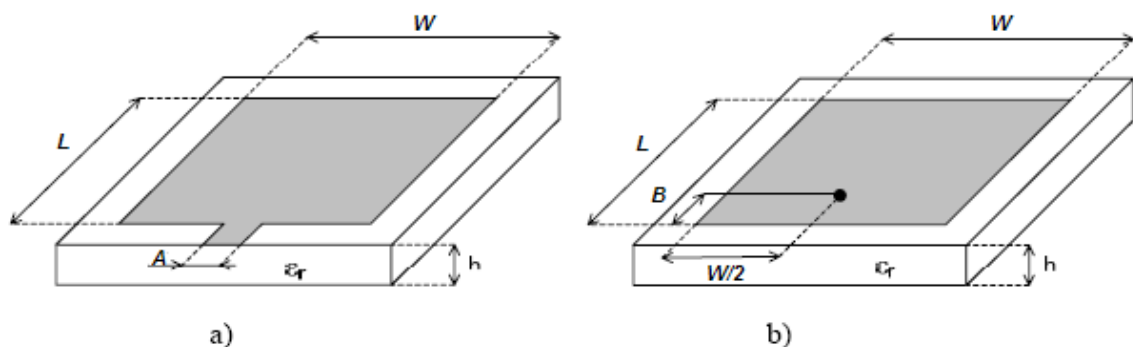
Antény lze mezi sebou porovnávat na základě jejich charakteristických vlastností. Mezi základní parametry každé antény patří:

- **Vstupní impedance** je impedance, kterou naměříme na vstupní bráně navržené antény. Pokud vstupní impedance antény není shodná s charakteristickou impedancí napáječe, musíme anténu impedancečně přizpůsobit, aby nedocházelo k odrazům vln a aby přenos energie ze zdroje do zátěže byl maximální.
- **Rezonanční kmitočet.** Je-li anténa v rezonanci, imaginární část její vstupní impedance je nulová a vhodným umístěním napájení na plochu flíčku lze dosáhnout reálné části vstupní impedance  $50 \Omega$ . Anténa je pak impedancečně přizpůsobena.
- **Směrová charakteristika** je grafickým znázorněním prostorového záření antény. Směrová charakteristika popisuje vyzařování antény v prostorových souřadnicích a udává směrovou závislost parametrů antény.
- **Zisk** antény slouží k porovnání směrových vlastností různých antén. Většinou se hodnota zisku vztahuje k zisku všesměrového (izotropního) zářiče. Směrová anténa se ziskem větším než 0 dB přiváděnou energii vyzařuje více do jednoho směru na úkor směrů ostatních.
- **Polarizace.** Elektrická a magnetická složka elektromagnetického vlnění jsou navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé ke směru šíření. Pro provedení antén je důležitá rovina kmitání elektrické složky a její orientace vzhledem k povrchu země (rozdělujeme horizontální a vertikální polarizaci).
- **Šířka pásma** je vymezená frekvencemi, na nichž některý z parametrů antény překročí předepsané tolerance. Obvykle pracujeme s impedanceční šířkou pásma, jejíž hranice jsou dány hodnotou velikosti činitele odrazu na vstupu antény  $-10$  dB.

Následující odstavce popisují základní konstrukci pasivní flíčkové antény, možnosti napájení této antény a případné doplnění antény aktivními prvky.

### 2.1 Flíčková anténa

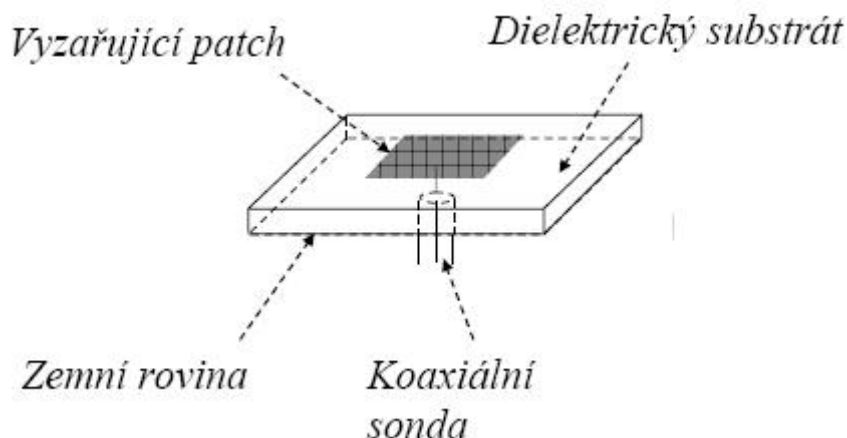
Flíčková anténa (anglicky *patch antenna*) patří mezi nejčastěji používané planární antény. Z Obr. 1. je patrné, že se flíčková anténa skládá z vodivého obdélníku o rozměrech  $W$  (šířka)  $\times$   $L$  (délka); oba rozměry jsou rovny přibližně polovině vlnové délky. Vodivý obdélník je nanesen na dielektrickém substrátu o tloušťce  $h$  a relativní permitivitě  $\epsilon_r$ . Spodní strana substrátu je souvisle pokovena.



**Obr. 1** Napájení flíčkové antény: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou [3].

## 2.2 Napájení flíčkových antén

Flíčkové antény napájíme nejčastěji koaxiální sondou nebo mikropáskovým vedením (Obr. 1). Při napájení koaxiální sondou je vnější vodič připojen k zemní ploše (reflektoru). Vnitřní vodič prochází otvorem v zemní ploše směrem do dielektrického substrátu, a přes něj pokračuje k planárnímu anténnímu prvku, na který má být připojen.

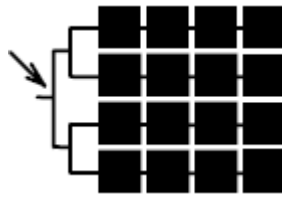


**Obr. 2** Detail napájení flíčkové antény koaxiální sondou [2].

Mezi hlavní výhody koaxiálního napájení patří zejména výrazné potlačení parazitního vyzařování napájecího vedení. Nevýhodou koaxiálního napájení je složité seskupování planárních anténních prvků do anténních soustav. Impedanci napájecího vedení obvykle volíme  $50 \Omega$ .

Vyzařování antény s mikropáskovým napájením (Obr. 1a) může být negativně ovlivněno parazitním zářením mikropáskového vedení. Šířka napájecího mikropásku musí být navržena tak, aby mělo mikropáskové vedení charakteristickou impedanci  $50 \Omega$ .

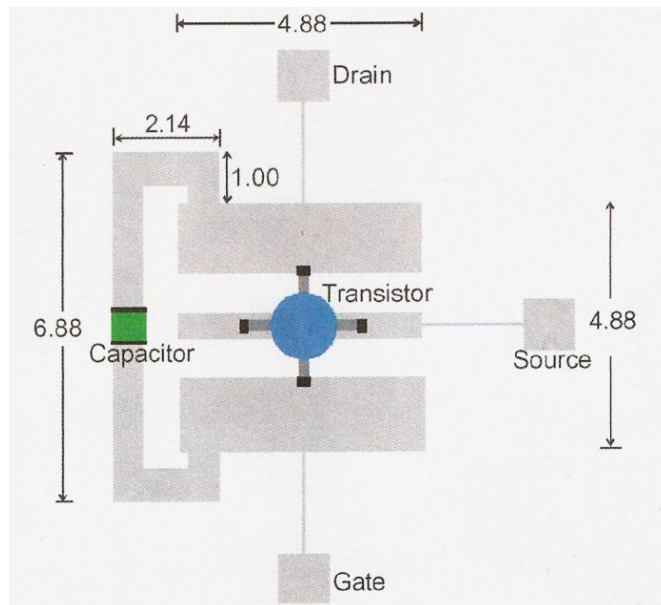
Na rozdíl od koaxiálního napájení je možné mikropáskové napájení integrovat do anténních soustav. V tomto případě je na jedné straně substrátu technologií plošných spojů vytvořen motiv anténních zářičů a současně síť napájecích pásků. Na druhé straně substrátu je souvislá vodivá plocha, vůči které je anténa buzena [2].



**Obr. 3** Antennní soustava se sítí mikropáskových napáječů.

### 2.3 Flíčková anténa s aktivním prvkem

Flíčková anténa s aktivním prvkem se od výše zmíněných antén odlišuje zejména tím, že obsahuje jeden nebo více aktivních prvků. Aktivním prvkem může být tranzistor, zesilovač nebo zpětnovazební oscilátor, který je umístěn na flíčku. Použitím aktivního prvku dochází ke zlepšení parametrů antény. Na Obr. 4 je nakreslen schematický diagram aktivní integrované antény, která jako aktivní prvek používá tranzistor. Tento tranzistor byl navržen výrobcem pro kmitočtové pásmo 8,5 GHz a jeho úkolem je vytvořit zpětnovazební smyčku.



**Obr. 4** Anténa s aktivním prvkem [1].

Z diagramu je také patrná výsledná velikost antény. Základní tvar antény se skládá ze dvou širokých pásků, které tvoří hlavní vyzařovací plochu. Mezi nimi je umístěn úzký pásek, který tvoří spolu s tranzistorem zpětnovazební smyčku. Oba hlavní flíčky jsou propojeny zpětnou vazbou, na které je umístěn kondenzátor. Tento kondenzátor slouží ke stejnosměrnému oddělení mezi kanálem a hradlem tranzistoru a zároveň vytváří mezi nimi zpětnou vazbu.

Anténa z Obr. 4 je značně menší nežli klasická flíčková anténa. Vyzařovací výkon a účinnost jsou srovnatelné s hodnotami získanými z obvodů, které zaujímají mnohem větší plochu a používají tlustší substrát s mnohem nižší hodnotou permitivity.

Pro zajištění optimální vyzařovací účinnosti a šířky pásma jsou mikropáskové flíčkové antény navrhovány na silném substrátu s nízkou permitivitou.

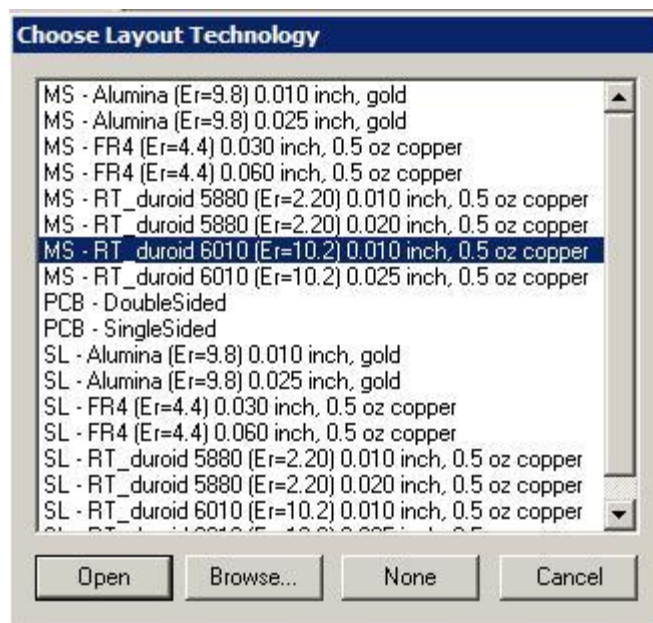
### 3 Modelování planárních antén

K modelování flíčkových antén byl použit program ANSOFT Designer [6]. Tento program používá moduly pro numerickou analýzu planárních struktur momentovou metodou. V programu lze vytvořit modely jednotlivých komponentů komunikačního řetězce, komponenty lze následně sloučit a ověřit činnost celého zařízení.

Nyní se zaměřím na popis modelování flíčkové antény buzené koaxiální sondou [5].

#### 3.1 Modelování antén v programu ANSOFT Designer

Po spuštění programu Ansoft Designer vložíme do prázdného projektu návrh planární struktury výběrem položky menu *File* → *New*, rozbalením nabídky *Project* a následným výběrem položky *Insert Planar EM Design*. Tím na obrazovce otevřeme dialog s nabídkou substrátů pro návrh naší planární antény. Substráty *MS* označují substráty pro mikropásková vedení, *SL* substráty pro stíněná pásková vedení a *PCB* substráty pro vícevrstvé plošné spoje. Pro návrh naší antény vybereme substrát *MS – RT\_duroid6010* (viz Obr. 5).



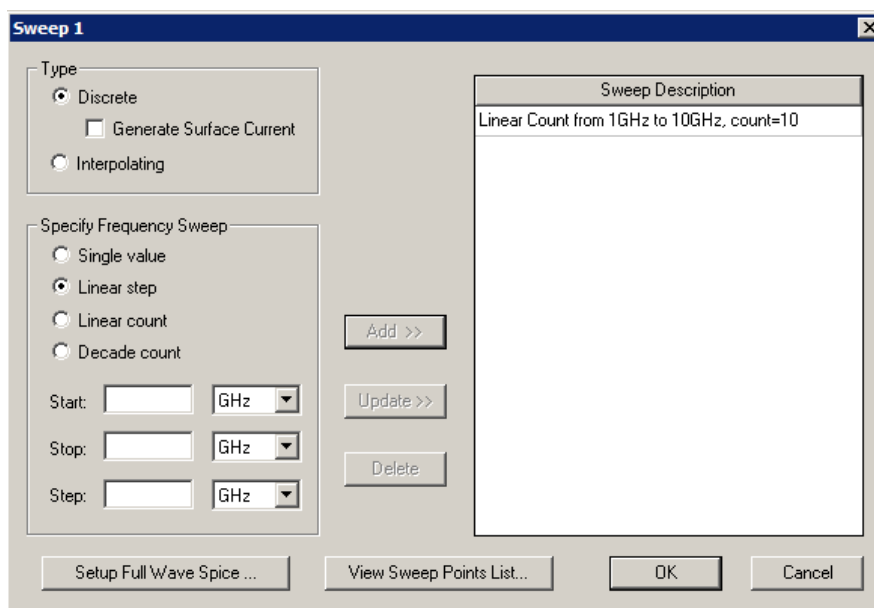
Obr. 5 Dialog pro výběr substrátu.

Vybraný substrát je později možné upravit pomocí *Layout* → *Layers* → *Stack up*. Zde lze změnit výšku substrátu (*thickness*), parametry dolní a horní plochy substrátu nebo elektromagnetické parametry substrátu. Pro naši anténu změníme hodnotu v řádku *Dielectric* ve sloupci *Thickness* (tloušťka) na číslo 0,635 mm.

Nyní v grafickém editoru vykreslíme tvar anténního prvku (vybereme *Draw* → *Primitive* → *Rectangle*). Rozměry nakresleného obrazce lze snadno změnit, pokud v levé části obrazovky v okně *Footprint* odškrtneme možnost *2 pt Description* a následně vyplníme v řádku *Width* (šířka) a *Height* (výška) rozměry námi zvoleného flíčku.

Nyní je třeba do nakresleného flíčku umístit koaxiální sondu. Klikneme tedy pravým tlačítkem myši na *LayoutVial* v levém okénku projektu, a z menu vybereme položku *Properties*. Na záložce *Upper Layer* nastavíme *Excitation* na *no load* a na záložce *Lower Layer* nastavíme stejnou položku na *coaxial excitation*.

Nyní nám zbývá nastavit parametry analýzy. Klikneme tedy pravým tlačítkem na položku *Analysis* a poté vybereme *Add Solution Setup*. V tomto dialogu nastavíme střední kmitočet analýzy. Tímto úkonem se nám pod položkou *Analysis* objeví položka *Setup 1*. Klikneme na ni opět pravým tlačítkem myši a zvolíme *Add Frequency Sweep*. V nově otevřeném dialogu provedeme změnu již předdefinovaného nastavení a zvolíme vlastní parametry rozmítání.



**Obr. 6** Nastavení parametrů rozmítání.

Pro analýzu na jediném kmitočtu volíme možnost *Single Value*. Při analýze v daném rozmezí kmitočtů s definovaným kmitočtovým krokem volíme možnost *Linear Step*. Pro analýzu v určitém intervalu s definovaným počtem kmitočtových kroků zvolíme *Linear Count*.

Nyní v levém okénku projektu klikneme myši na ikonu *Analysis* a vybereme možnost *Analyze*. Pokud jsme se nedopustili žádné chyby, měla by analýza proběhnout úspěšně. Výsledky je možné vykreslit vybráním položky *Results*, která se nachází v levém okénku projektu. Výsledek je možné vykreslit jak v kartézském grafu, tak i v grafu polárním či ve Smithově diagramu. Po vybrání jedné z možností se otevře nový dialog, v kterém vybíráme veličinu a jednotky, v nichž má být veličina vynesena. Pro vykreslení poměru stojatých vln a impedančního přizpůsobení vybereme z nabídky *Category* položku *S Parameter* a dále v sloupci *Quantity* vybereme pro impedanční přizpůsobení *S( Port1, Port1)* a pro poměr stojatých vln *VSWR( Port1)*. Svůj výběr potvrdíme tlačítkem *Add Trace* a následným stisknutím *Done*.

Změnou umístění napájecího bodu koaxiální sondy je možné výrazně měnit impedanční přizpůsobení antény. Celé rezonanční pásmo by mělo nabývat impedančního přizpůsobení v hodnotách pod  $-10$  dB. Poměr stojatých vln (PSV) by se při daném kmitočtu měl blížit

co nejvíce hodnotě 1. V tomto případě totiž anténa vyzařuje 100% své energie do prostoru. Se zvyšující se hodnotou PSV vyzařovaná energie výrazně klesá.

Při změně délky flíčku je naopak možné znatelně ovlivnit rezonanční frekvenci námi navrhnutého flíčku.

### 3.2 Návrh flíčkové antény

Při návrhu jakékoli flíčkové antény se nejdříve pomocí vztahů pro výpočet rozměrů antény určí orientační rozměry antény. Poté je možné díky parametrickému zadávání veličin v programu Ansoft Designer tyto hodnoty postupně upravovat, dokud nedosáhneme žádaných vlastností navrhované antény. Pro výpočet základních rozměrů antény se použijí následující vztahy [2]:

- **Šířka flíčku:**

$$W = \sqrt{h\lambda_d} [\ln(\lambda_d / h) - 1], \quad (3.1)$$

kde  $h$  je výška substrátu a vlnovou délku v substrátu určíme podle vztahu

$$\lambda_d = \frac{c}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (3.2)$$

kde symbol  $c$  značí rychlost světla ve vakuu,  $f_r$  je pracovní kmitočet a  $\varepsilon_r$  označuje relativní permitivitu substrátu.

- **Délka flíčku:**

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{ef}}}, \quad (3.3)$$

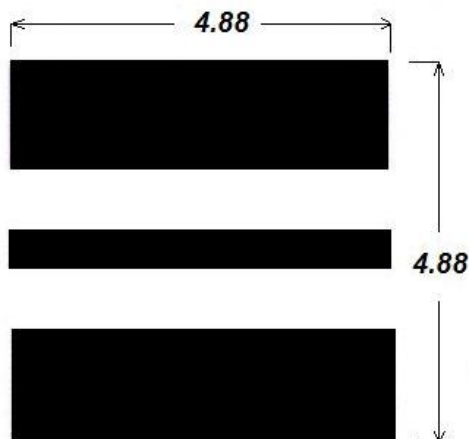
kde symbol  $c$  značí rychlost světla ve vakuu,  $f_r$  je pracovní kmitočet a  $\varepsilon_{ef}$  označuje efektivní permitivitu substrátu

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{A}}}. \quad (3.4)$$

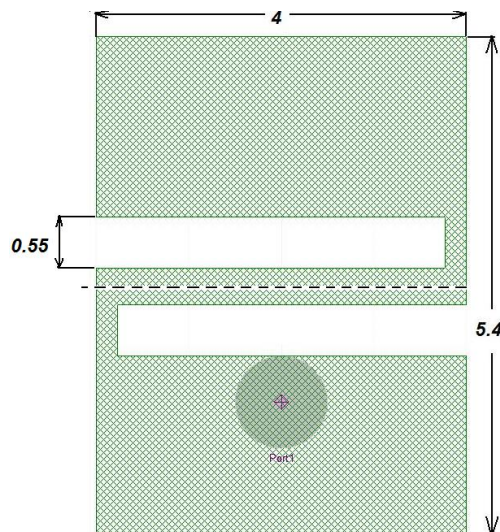
Pro námi navrhovanou flíčkovou anténu máme zadán pracovní kmitočet  $f_r = 8,5$  GHz, výšku substrátu  $h = 0,635$  mm a relativní permitivitu substrátu  $\varepsilon_r = 10,2$ . Po dosazení daných hodnot do vztahů (3.1) až (3.4) zjistíme orientační rozměry naší antény. Délka flíčku je  $W = 4,92$  mm, šířka flíčku  $L = 6,06$  mm a efektivní permitivita  $\varepsilon_{ef} = 8,48$ .

Porovnáním vypočítaných hodnot s Obr. 4 lze snadno poznat, že rozměry nejsou shodné. To může být způsobeno faktem, že ve výpočtu není brán v úvahu připojený aktivní prvek. Nyní se pokusíme ověřit parametry výše zmíněné antény pomocí programu Ansoft Designer. Nejdříve je nutné vzít základní rozměr antény (Obr. 7) a pokusit se zjistit, zdali se opravdu jeho rezonanční frekvence nalézá na kmitočtu  $f = 8,5$  GHz.

Z důvodu, že nyní se snažíme pouze ověřit rezonanční frekvenci základního tvaru flíčku bez aktivních prvků, je nutné, aby oba široké vyzařovací pásy a prostření pásek tvořily jeden celek. Z tohoto důvodu jsou všechny plošky propojeny slabým páskem. Nelze však nyní předvídat, jaký bude mít tato změna vliv na parametry antény.

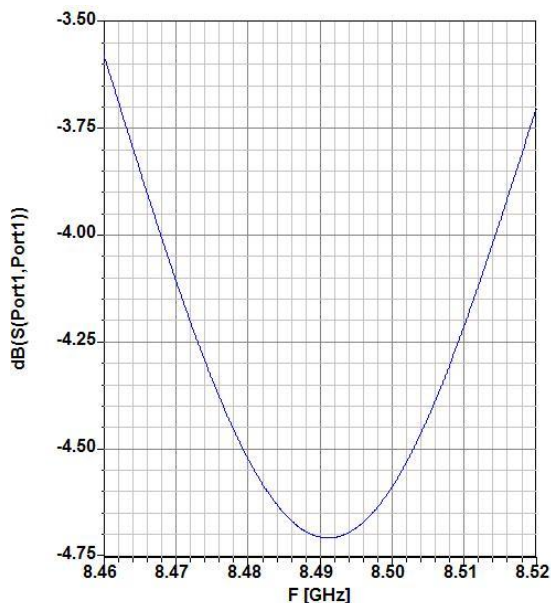


**Obr. 7** Základní tvar flíčku.

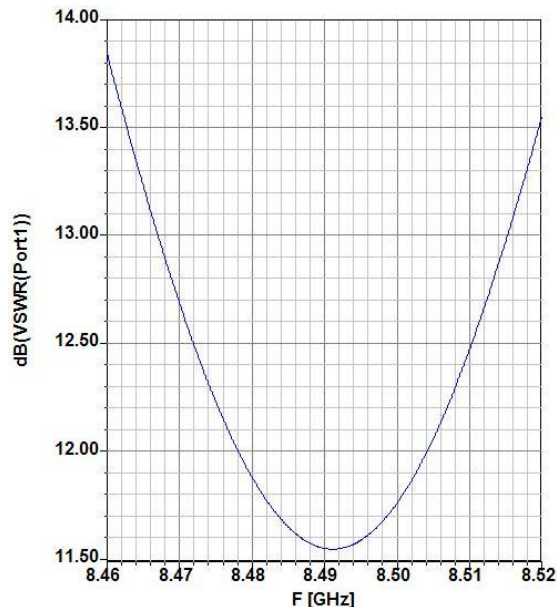


**Obr. 8** Upravený flíček.

Po vykreslení základního tvaru flíčku (Obr. 7) do programu Ansoft Designer a následné simulaci antény se nepodařilo na frekvenci  $f = 8,5$  GHz flíček dostatečně impedančně přizpůsobit. Proto byl tvar flíčku upraven (Obr. 8). Modifikovaná anténa rezonovala na frekvenci  $f = 8,49$  GHz. Poměr stojatých vln na tomto kmitočtu byl 11,6 dB, čemuž odpovídá velikost činitele odrazu  $S_{11} = -4,71$  dB.



**Obr. 9** Kmitočtový průběh činitele odrazu (bez impedančního transformátoru).

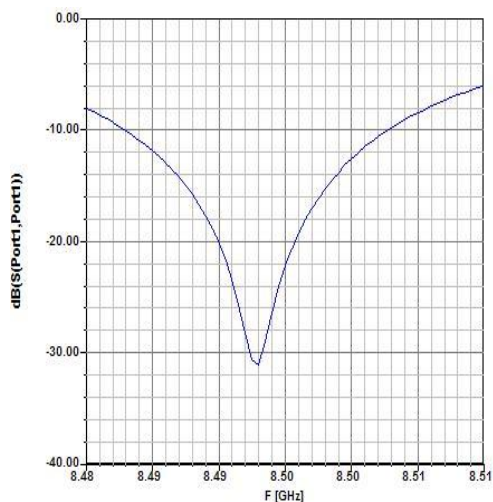


**Obr. 10** Kmitočtový průběh poměru stojatých vln.

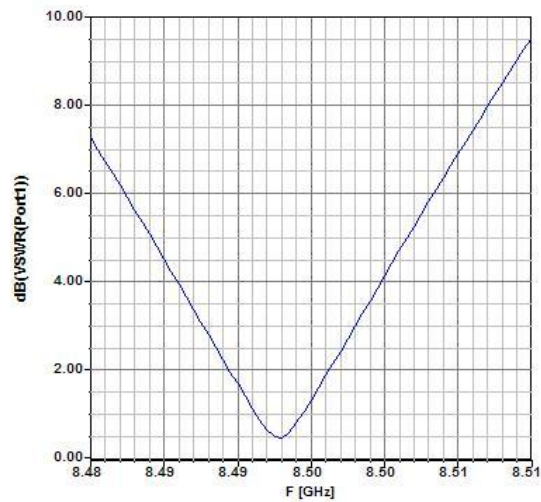
Anténa byla analyzována v rozsahu kmitočtů 8,46 GHz až 8,52 GHz v celkovém počtu 601 frekvencí. Anténa byla napájena koaxiální sondou s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$ , která byla umístěna v ose flíčku ve vzdálenosti 1,452 mm, od spodního okraje.

Vykreslením složek impedance bylo zjištěno, že vstupní odpor antény se blíží hodnotě  $200 \Omega$ . Změnou impedance koaxiální sondy na hodnotu  $200 \Omega$  lze proto dosáhnout

dostatečného impedančního přizpůsobení antény. Jelikož typická hodnota impedance napájecí sondy je  $50 \Omega$ , je třeba umístit na vstupní část napájení antény impedanční transformátor.



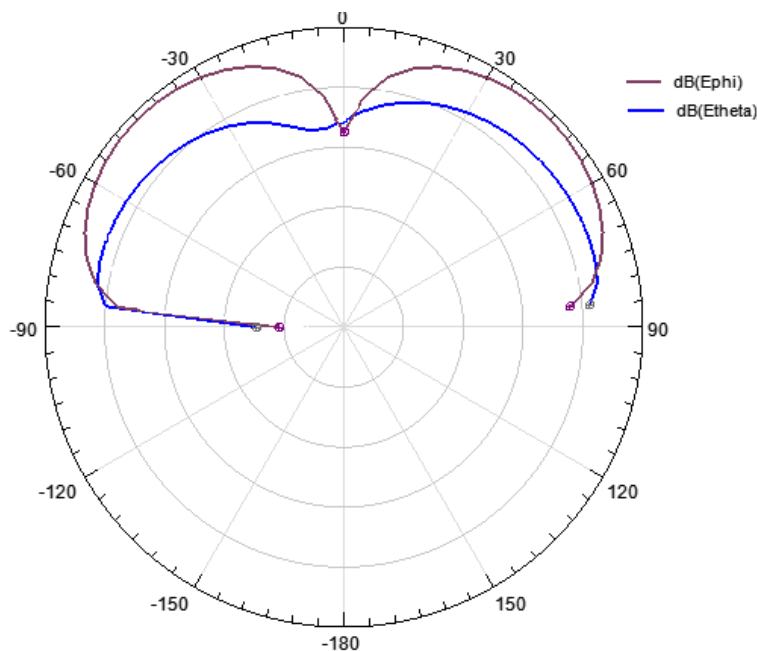
**Obr. 11** Kmitočtový průběh činitele odrazu (s impedančním transformátorem).



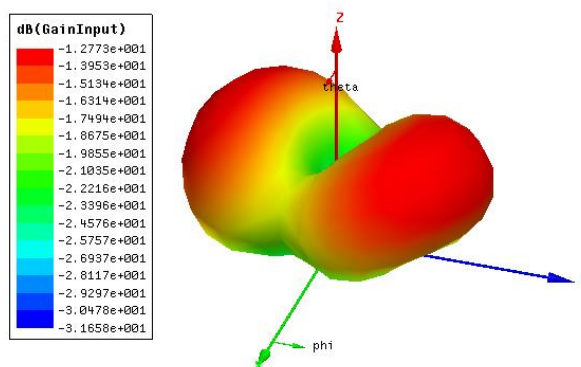
**Obr. 12** Kmitočtový průběh poměru stojatých vln.

Jak je vidět z Obr. 11 a 12, anténa s impedančním transformátorem rezonuje na frekvenci  $f = 8.495 \text{ GHz}$ . Poměr stojatých vln na této frekvenci má hodnotu  $PSV = 0,5 \text{ dB}$ , čemuž odpovídá hodnota činitele odrazu  $S_{11} = -30 \text{ dB}$ .

Anténa byla analyzována v rozsahu kmitočtů  $8,48 \text{ GHz}$  až  $8,51 \text{ GHz}$ . Anténa byla napájena koaxiální sondou s charakteristickou impedancí  $200 \Omega$ , která byla umístěna v ose flíčku ve vzdálenosti  $1,452 \text{ mm}$  od spodního okraje.



**Obr. 13.** Směrové charakteristiky na kmitočtu  $f = 8,495 \text{ GHz}$  v rovině X-Z pro obě polarizace pole E

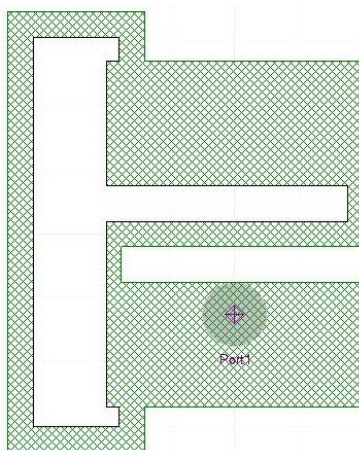


**Obr. 14** Vyzařovací charakteristika 3D na kmitočtu 8,495 GHz

### 3.3 Flíčková anténa se zpětnou vazbou

Přidáním zpětné vazby do motivu anténního prvku z Obr. 8 došlo k mírné změně parametrů antény. Rezonanční frekvence se posunula o 40 MHz na hodnotu  $f = 8.45$  GHz. Poměr stojatých vln dosáhl hodnoty PSV = 6 dB, čemuž odpovídá hodnota činitele odrazu  $S_{11} = -11$  dB.

Analýza byla provedena za stejných podmínek, jako tomu bylo u antény bez zpětné vazby. Rozměry zpětné vazby jsou totožné s hodnotami z Obr. 4. Šířka zpětné vazby byla zvolena 0,4 mm.



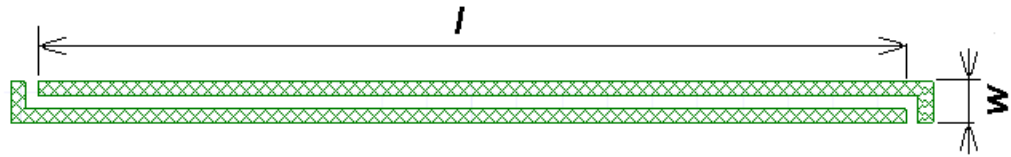
**Obr. 15** Flíčková anténa se zpětnou vazbou.

### 3.4 Flíčková anténa s aktivním prvkem

Dalším krokem je připojení aktivních prvků na povrch flíčkové antény. Tranzistor bude zapojen uprostřed flíčku (Obr. 4) a zprostředkuje propojení všech částí flíčku. Z tohoto důvodu bude možné odstranit spojení flíčků úzkými pásky. Zapojení tranzistoru je doplněno kondenzátorem o hodnotě 1,2 pF, který slouží ke stejnosměrnému oddělení kanálu a hradla tranzistoru. Kondenzátor zároveň realizuje vysokofrekvenční (RF) zpětnou vazbu mezi kanálem a hradlem tranzistoru. Aktivní integrovaná anténa bude napájena baterií 1.5 V mezi vývody *Source* a *Gain*.



- Délka kapacitoru  $l$ : 19,2 mm
- Šířka kapacitoru  $w$ : 0,9 mm



**Obr. 17** Interdigitální dvouprstý kapacitor

Při návrhu kapacitoru bylo použito následujících vztahů [7]:

$$C_s = \frac{\varepsilon_r + 1}{w} \cdot l \cdot [(n - 3) \cdot A_1 + A_2], \quad (4.1)$$

kde  $n$  počet prstů a

$$A_1 = \frac{1}{25,4} \cdot \left[ 0,3349057 - 0,15287116 \cdot \left( \frac{h}{x} \right)^{-1} \right]^2, \quad (4.2)$$

$$A_2 = \frac{1}{25,4} \cdot \left[ 0,50133101 - 0,22820444 \cdot \left( \frac{h}{x} \right)^{-1} \right]^2. \quad (4.3)$$

Vztahy jsou platné pro  $3 \leq h/x$  za předpokladu, že spodní plocha substrátu je pokovená.

## 5 Vložení prvku do planární struktury

### 5.1 N-Port

Ansoft designer neumožňuje vložit do planární struktury přímo tranzistor jako komponent. Z tohoto důvodu je zapotřebí využít *N-Port*. *N-Port* je obecná součástka, jejíž parametry mohou být definovány uživatelem. *N-Portům* se také někdy říká „černá krabička“, protože nikdy není na první pohled poznat, jaký prvek tato součástka zastupuje.

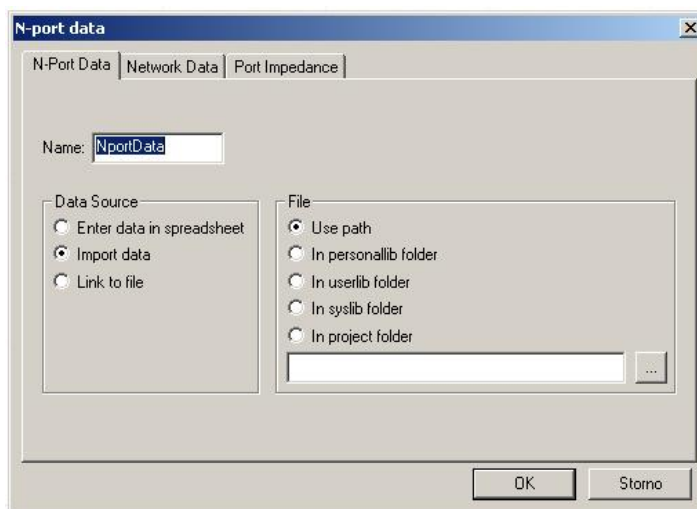
Uživatelská data mohou být zadána jako:

- rozptylové parametry, (S parametry);
- admitanční parametry, (Y parametry);
- impedanční parametry (Z parametry);
- konstanty šíření (tzv.  $\gamma$  parametry);
- charakteristické impedance (tzv.  $Z_0$  parametry).

Uživatelem zadané parametry jsou většinou frekvenčně závislé. Parametry jsou obvykle změřeny na konkrétních součástkách.

## 5.2 N-port v programu Ansoft Designer

Po spuštění programu Ansoft Designer prostřednictvím *File* → *Open* otevřeme projekt s návrhem naší planární antény. Výběrem položky *File* → *Draw* → *N-Port* otevřeme dialog pro nastavení vstupních dat N-Portu.



Obr. 18 Dialogové okno nastavení N-Portu

V prvním dialogu v položce *Name* zadáme jméno součástky. V rámečku *Data Source* nastavíme způsob, jakým se uživatelská data vloží do programu. Při použití možnosti *Enter Data in spreadsheet* je nutné v záložce *Network Data* námi požadovaná data napevno zadat. Zvolením možnosti *Import data* je zapotřebí určit jejich zdroj.

Data lze získat z uživatelské knihovny, systémové knihovny nebo také nahráním konkrétního datového souboru. Importovaná data se nahrají přímo do projektu a stanou se jeho součástí. Chceme-li pro zdroj vstupních dat použít mimo knihoven přímo externí soubor (data se neimportují přímo do projektu, ale budou se při každé simulaci nahrávat ze zvoleného souboru), využijeme možnost *Link to file*.

N-Port může simulovat součástku s jedním až čtyřmi vývody; v našem případě nám postačí dva porty. Pro jednobran má vstupní soubor koncovku \*.s1p, pro dvojbran \*.s2p atd.

Vstupní datový soubor pro dvojbran musí mít následující strukturu:

```
# GHz S MA R SO
! f S11 S21 S12 S22
! GHz MAG ANG MAG ANG MAG ANG MAG ANG
4.00 0.893 -46.3 4.314 127.3 0.042 57.7 0.500 -34.9
6.00 0.814 -64.8 4.130 104.3 0.053 46.1 0.482 -48.8
8.00 0.660 -90.3 4.184 78.7 0.070 33.7 0.393 -62.6
10.00 0.554 -127.2 4.063 51.3 0.086 18.9 0.268 -86.8
12.00 0.445 -166.2 3.906 23.5 0.103 2.1 0.211 -123.1
```

Obr. 19 Struktura souboru vstupních dat pro dvojbran.

Soubory s parametry jednotlivých součástek bývají k dispozici na webových stránkách výrobce součástky a v katalogových listech.

Nyní přistoupíme k připojení N-Portu k planární soustavě. N-port, ke kterému jsme výše zmíněným způsobem připojili datový soubor, umístíme poblíž planární antény. K propojení budeme potřebovat tři různé funkce z nástrojové lišty:



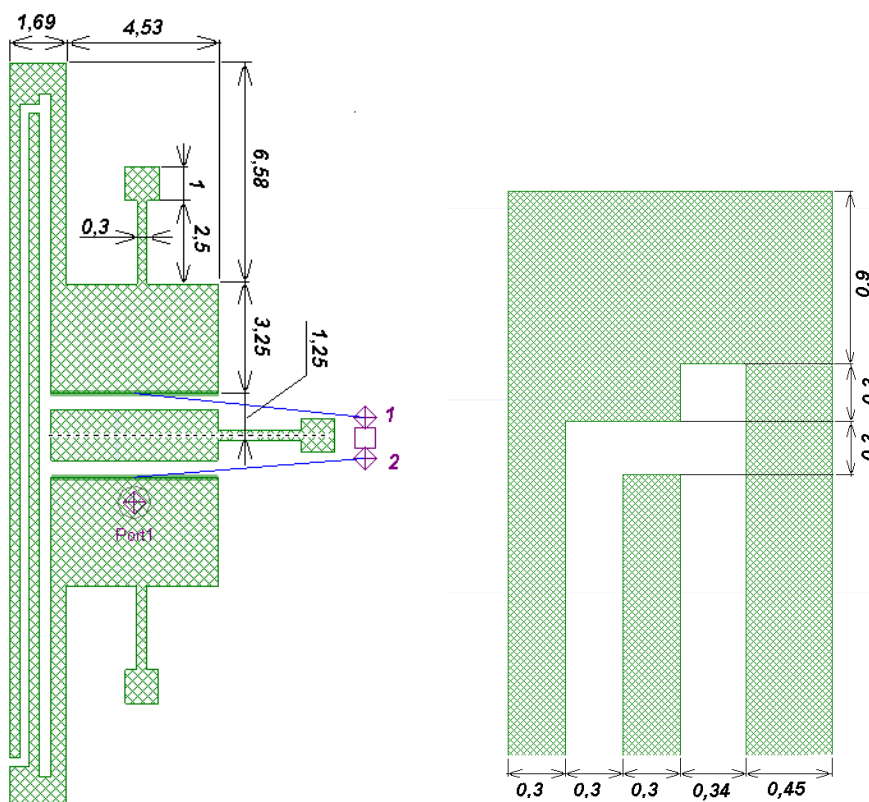
**Obr. 20** Nástrojová lišta.

- *Select Elements* (první ikona zleva; slouží k výběru prvků).
- *Select Edges* (třetí ikona zleva; slouží k označení hrany pro připojení prvku).
- *Connection* (pátá ikona zprava; slouží k propojení dvou a více prvků).

Nejdříve vybereme *Select Edges* a klikneme na hranu antény, kde má být první port; hrana se zvýrazní červenou barvou. Pak zvolíme *Select Elements* a se stisknutým tlačítkem *Ctrl* klikneme na červeně zvýrazněnou hranu a na jeden z portů *N-Portu*. Následně stačí stisknout *Connection* a námi vybrané body se spojí. Stejný postup je nutné opakovat i pro připojení ostatních portů k planární struktuře antény.

### 5.3 Anténa s aktivními prvky

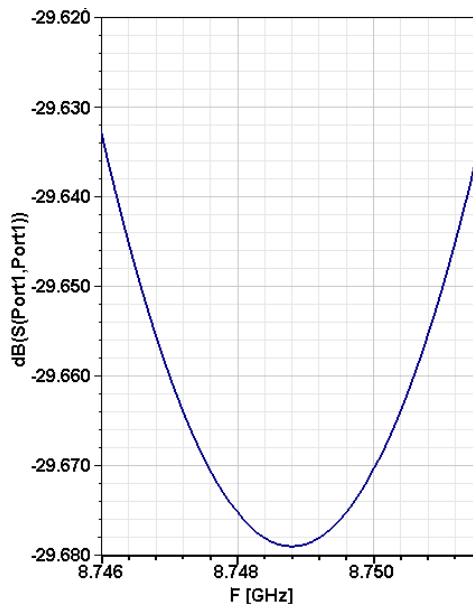
Původní anténa byla navržena na substrátu výšky  $h = 0,635$  mm s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 10,2$ . Jelikož tento substrát nebyl dostupný, přepočítali jsme anténu na substrát výšky  $h = 3,175$  mm a relativní permitivity  $\epsilon_r = 10,2$ .



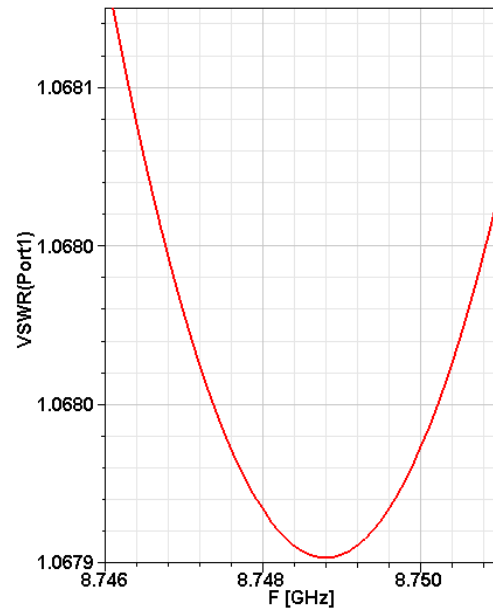
**Obr. 21** Přepočítaná aktivní integrovaná anténa (vlevo). Detail kapacitoru (vpravo).

Anténa byla doplněna interdigitálním kapacitorem a nízkošumovým tranzistorem, který byl napájený z 1,5 V baterie připojené mezi kolektor a emitor tranzistoru. Pro připojení napájení

jsou vyvedeny oddělovací kondenzátory, které jsou s vyzařovacími ploškami spojeny úzkým páskem, který vytváří tlumivku. Konektor pro koaxiální sondu s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$  je umístěn v ose flíčku ve vzdálenosti 2,5 mm od spodního okraje flíčku.

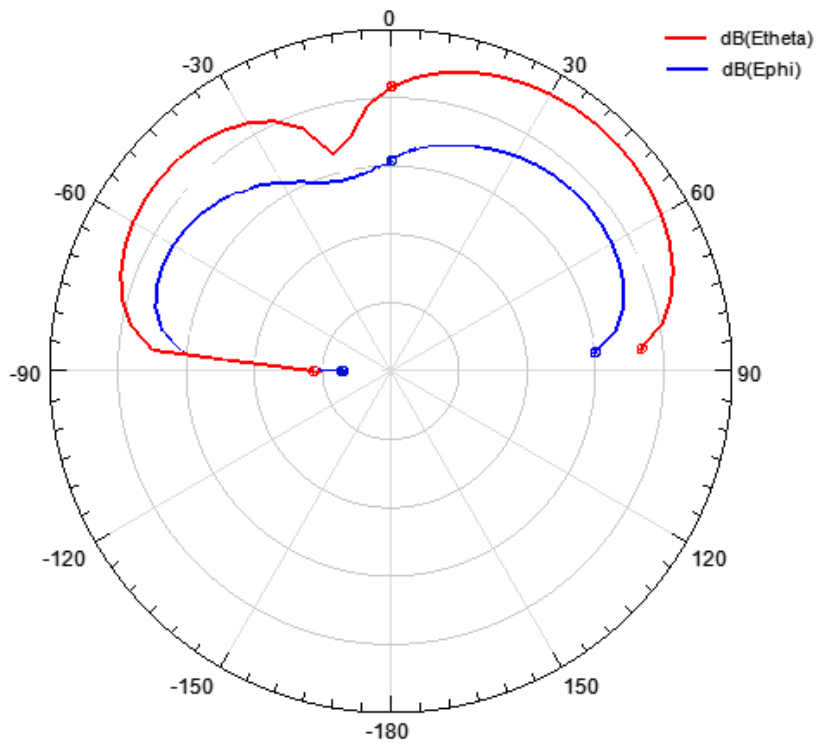


**Obr. 22** Kmitočtový průběh činitele odrazu

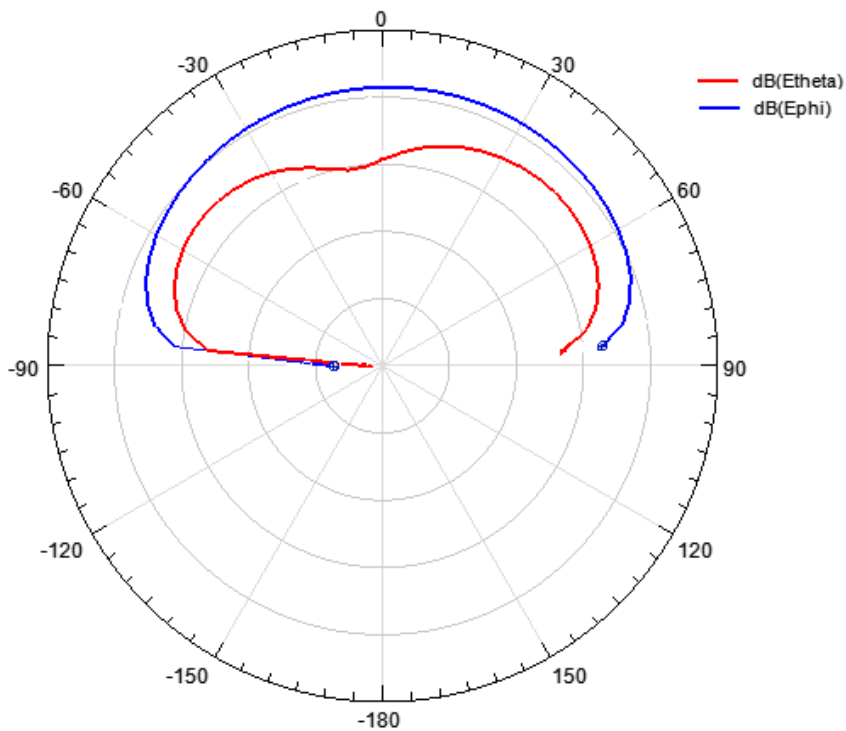


**Obr. 23** Kmitočtový průběh poměru stojatých vln.

Analýza antény byla provedena v rozsahu kmitočtů 8,746 GHz až 8,756 GHz. Anténa byla napájena koaxiální sondou s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$ , která byla umístěna v ose flíčku ve vzdálenosti 2,5 mm od spodního okraje. Poměr stojatých vln při této frekvenci nabývá hodnoty  $PSV = 0,57\text{dB}$ , čemuž odpovídá hodnota činitele odrazu  $S_{11} = -29,67 \text{ dB}$ .



**Obr. 24** Směrové charakteristiky aktivní integrované antény na kmitočtu  $f = 8,74$  GHz v rovině X-Z pro obě polarizace pole  $E$



**Obr. 25** Směrové charakteristiky aktivní integrované antény na kmitočtu  $f = 8,74$  GHz v rovině Y-Z pro obě polarizace pole  $E$

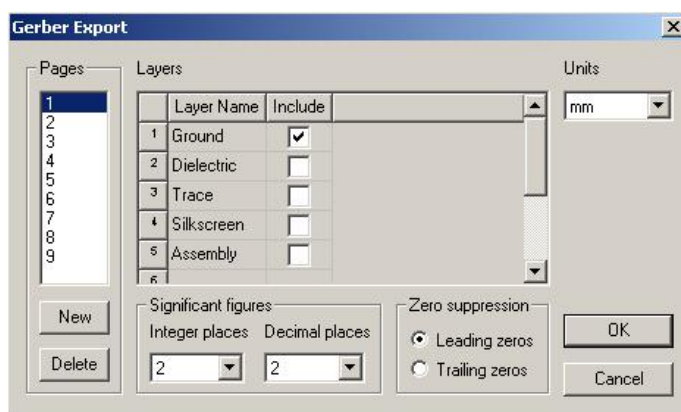
Směrové charakteristiky byly vykresleny v rovině X-Z a v rovině Y-Z pole E. Z obrázku je vidět, že anténa vyzařuje díky dvěma bočním lalokům. Vložený interdigitální kondenzátor snižuje velikost vyzařování levého bočního laloku a zvyšuje velikost pravého laloku. Tím roste také zisk antény.

Spodní vrstvu všech antén tvoří zemnicí deska. Antény by tedy měly vyzařovat pouze do poloprostoru nad touto zemnicí deskou. Pohledem na směrové charakteristiky se tento směr vyzařování opravdu potvrdil.

## 6 Realizace antény

### 6.1 Export do formátu GELBER\_RS274

Anténa byla navržena pro substrátu AR1000 ( $h = 3,175$  mm,  $\epsilon_r = 10,2$ ). Při návrhu bylo třeba brát ohled na minimální rozměr planárního motivu 0,30 mm. Pro vytvoření předlohy je zapotřebí vytvořit výstupní soubor ve formátu *GELBER\_RS274*. Tuto funkci Ansoft Designer přímo nenabízí, je však možné toho docílit níže popsaným způsobem.



Obr. 26 Dialogové okno pro export souboru

Otevřeme planární anténu a zvolíme *Layout* → *Export file*. Soubor pojmenujeme a ve výběru *Uložit jako typ* zvolíme *Gerber File (\*.ger)*. Tak otevřeme dialog *Gerber Export*. Zde nastavíme jednotku na milimetry a vybereme vrstvy, které se mají exportovat. Námi navrhovaná anténa obsahuje pouze vrstvu *Ground*. Dále je nutné použít program *GerbMagic* [8]. Námi vyexportovaný soubor v něm otevřeme a pomocí nabídky *File*→*Save As*→*Gerber RS274x* ho opět uložíme, nyní však již v požadovaném formátu.

### 6.2 Výroba antény

Při výrobě antény bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti zejména při osazování tranzistoru do planární struktury. Vysoká teplota hrotu mikropájky by mohla tranzistor i zničit.

Při simulaci v programu Ansoft Designer bylo k napájení antény použito koaxiální sondy. Realizovaná anténa však bude napájena pomocí přiloženého napětí, proto konektor pro koaxiální sondu není nutný. Napájecí napětí je přivedeno pomocí tenkého drátku z 1,5 V baterie, která je uložena v držáku baterií.

## 7 Porovnání parametrů pasivní a aktivní struktury

Jelikož byla pasivní anténa navržena na jiném substrátu, nežli aktivní anténa, není možné přímo porovnávat konkrétní parametry antén mezi sebou. Z tohoto důvodu budou jednotlivé struktury porovnány odděleně.

### 7.1 Pasivní struktura

Pasivní planární struktura byla navržena na substrátu výšky  $h = 0,635$  mm s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 10,2$ .

	<i>Anténa č. 1 bez ZV (50 <math>\Omega</math>)</i>	<i>Anténa č. 2 bez ZV (200 <math>\Omega</math>)</i>	<i>Anténa č. 3 se ZV (200 <math>\Omega</math>)</i>
<i><math>f_{rez}</math> [GHz]</i>	8,49	8,49	8,45
<i>PSW [-]</i>	11,60	1,05	1,82
<i><math>S_{11}</math> [dB]</i>	-4,71	-30,00	-11,00
<i>Rozměry( š x v ) [mm]</i>	4,00 x 5,40	4,00 x 5,40	5,54 x 6,68

**Tab. 1** Srovnání parametrů pasivních antén

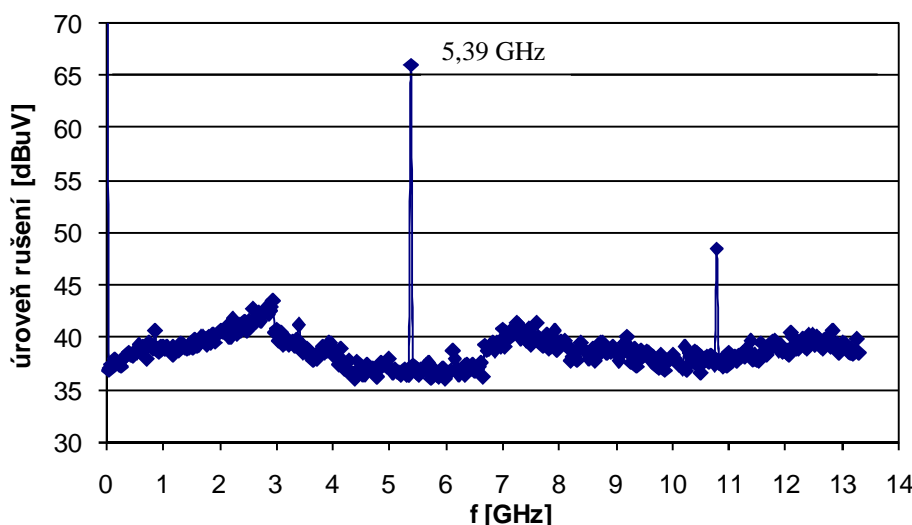
V této práci byly navrženy postupně 3 pasivní antény. Anténa č. 1 byla napájena koaxiální sondou s charakteristickou impedancí 50  $\Omega$ . Impedanční přizpůsobení však bylo nedostatečné. Vykreslením složek impedance bylo zjištěno, že vstupní odpor antény se blíží k hodnotě 200  $\Omega$ . Změnou impedance koaxiální sondy na hodnotu 200  $\Omega$  bylo docíleno dostatečného impedančního přizpůsobení. Zároveň došlo i k výraznému zlepšení poměru stojatých vln (anténa č. 2). Je tedy vidět, že impedanční přizpůsobení antény má výrazný vliv na parametry antény a je nutné ho vždy dodržet. Anténa č. 3 vznikla modifikací antény č. 2, ke které byla doplněna zpětná vazba.

Nejlepších parametrů z pasivních antén tedy dosáhla anténa č. 2. Její rozměry jsou velmi malé a anténa dosahuje velice dobrých parametrů. Tato anténa však byla napájena koaxiální sondou s charakteristickou impedancí 200  $\Omega$ . Běžně se koaxiální kabely s touto hodnotou charakteristické impedance neprodávají, proto k jejímu sestrojení by bylo nutné vytvořit impedanční transformátor.

## 7.2 Aktivní struktura

Aktivní planární struktura byla navržena na substrátu výšky  $h = 3,175$  mm s relativní permitivitou  $\epsilon_r = 10,2$ . Od pasivní planární struktury se liší zejména tím, že je doplněna interdigitálním kapacitorem a nízkošumovým tranzistorem. Pro potřeby simulace byla anténa napájena pomocí koaxiální sondy. V praxi však koaxiální sonda není zapotřebí. Aktivní prvek vytváří na povrchu antény zpětnovazební oscilátor, který rezonuje na kmitočtu  $f = 8,74$  GHz.

Orientační měření této antény bylo uskutečněno v učebně PA-727. Na spektrální analyzátor jsme připojili malou „očichávací“ anténku a zjišťovali vyzařující spektrum malé integrované antény. Výsledek měření je možné vidět na Obr. 27. Spektrální složka se objevila při kmitočtu  $f = 5,39$  GHz. Spektrální složka, viditelná v okolí kmitočtu  $f = 11$  GHz je pouze další harmonickou. Změna frekvence, oproti předpokládané hodnotě, může být způsobena zejména nepřesnostmi při výrobě a také tím, že vložený nízkošumový tranzistor zakrývá poměrně velkou plochu antény a může tedy bránit vyzařování do prostoru. Další problém mohl také nastat v místě napájení. Napájení tranzistoru je připojeno přes oddělovací kondenzátory a malé pásky, které tvoří tlumivku. Je to především z důvodu vysokofrekvenčního oddělení napájení a vyzařovacího flíčku. Vzorec pro výpočet jejich velikosti se mi bohužel nepodařilo zjistit. Jejich rozměry jsou tedy pouze úměrné k rozměrům původní antény.



Obr. 27 Spektrální složka malé integrované antény

Měření směrových charakteristik bylo provedeno také na katedře radioelektroniky univerzity obrany ing. Zemanem. Provedení měřicí komory však nebylo na takové úrovni, aby bylo možné provést měření pro sestrojenou anténu. Sestrojená anténa byla napájena z knoflíkové baterie a neměla v prostředí dané komory dostatečný vyzařovací výkon. Měřený vyzařovaný signál byl tedy pod úrovní šumu. Rušení v komoře mohlo být způsobeno nedostatečně odstíněnými datovými kabely, které byly umístěny v podlaze měřicí komory.

Tento problém by mohl být vyřešen použitím napájecí baterie s vyšším výkonem, nebo provedením měření v dostatečně stíněné komoře.

## 8 Závěr

Jedním z cílů této práce bylo seznámit se se základními typy planárních antén, metodou jejich návrhu a modelováním v programu ANSOFT Designer. Dále byla snaha navrhnout a provést simulaci základního tvaru flíčku aktivní integrované antény. Důraz byl kladen především na dodržení rezonanční frekvence antény 8,5 GHz. Nově navržená anténa byla přivedena k rezonanci při frekvenci 8,495 GHz. Bylo však zapotřebí mírně pozměnit rozměry antény a hodnotu vstupní impedance napájecí sondy. Takto navržená anténa byla doplněna zpětnou vazbou. Zpětná vazba však způsobila mírné zhoršení parametrů antény.

Dalším krokem bylo doplnit tuto anténu aktivním prvkem. Tohoto cíle bylo dosaženo za pomoci programu Ansoft Designer. Vložení prvku přímo do planární struktury je možné pomocí funkce N-Port. N-Port dokáže simulovat funkci jakéhokoli prvku v obvodu, kterého je možné popsat pomocí charakteristických parametrů (např. pomocí rozptylových parametrů). Planární anténa byla také doplněna interdigitálním kondenzátorem, který slouží k vytvoření zpětnovazební smyčky mezi vyzařovacími pásky.

Planární antény se vyznačují tím, že jsou velice úzkopásmové. To se potvrdilo i u navržených antén. Šířka pásma se pohybovala okolo 15 MHz.

Anténa s aktivním prvkem byla vyrobena. Ověření vlastností bylo provedeno na katedře radioelektroniky univerzity obrany. Měřicí komora však nebyla dostatečně odstíněna a vyzařovaný signál antény byl tedy pod úrovní šumu. Sestrojená anténa byla napájena z knoflíkové baterie a neměla v prostředí dané komory dostatečný vyzařovací výkon.

Bylo tedy zjištěno, že není problém umístit na jeden stejný substrát jak aktivní, tak i pasivní prvky. Při výrobě malých aktivních antén, které rezonují na vysokých kmitočtech, může každá malá nepřesnost výrazně ovlivnit rezonanční kmitočet. Pro jejich výrobu jsou tedy nutné drahé přístroje a vybavení.

## 9 Literatura

- [1] MUELLER, C. H. et al. Small-size X-band active integrated antenna with feedback loop. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, no. 5, p. 1236 to 1241.
- [2] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.
- [3] POKORNÝ, M., HORÁK, J., RAIDA, Z. Planar triband antenna design. *Radioengineering*, 2008, vol. 17, no. 1, p. 28–36.
- [4] Dokumentace tranzistoru NEC NE3210S01.  
Dostupné na: <http://www.cel.com/>
- [5] ČÁP, A., RAIDA, Z., HERAS-PALMERO, E., LAMADRID RUIZ, R. Multiband planar antennas: a comparative study. *Radioengineering*, 2005, vol. 14, no. 4, p. 11–20.
- [6] *ANSOFT Designer User's Guide, version 4.0*. Pittsburg: Ansoft Ltd.  
Dostupné na: <http://www.ansoft.com>
- [7] HOFFMANN, K. Planární mikrovlnné obvody. Skriptum FEL ČVUT. Praha: ČVUT Praha, 2000.
- [8] Program GerbMagic  
Dostupný na: <http://www.bronzware.com/>

## 10 Seznam použitých zkratek a symbolů

$L$	Délka flíčku
$W$	Šířka flíčku
$\epsilon_r$	Relativní permitivita substrátu
$h$	Tloušťka substrátu
$c$	Rychlost světla
$\epsilon_r$	Relativní permitivita substrátu
$h$	Tloušťka substrátu
$c$	Rychlost světla
$A_1, A_2$	Pomocné hodnoty pro výpočet kapacity interdigitálního kapacitou
$N$	Počet prstů interdigitálního kapacitou
$C_s$	Sériová kapacita interdigitálního kapacitoru
$VSWR$	Voltage Standing Wave Ratio, poměr stojatých vln

# 11 Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> Napájení flíčkové antény: a) mikropáskovým vedením, b) koaxiální sondou .....	10
<b>Obr. 2</b> Detail napájení flíčkové antény koaxiální sondou .....	10
<b>Obr. 3</b> Anténní soustava se sítí mikropáskových napáječů .....	11
<b>Obr. 4</b> Anténa s aktivním prvkem.....	11
<b>Obr. 5</b> Dialog pro výběr substrátu.....	12
<b>Obr. 6</b> Nastavení parametrů rozmítání .....	13
<b>Obr. 7</b> Základní tvar flíčku .....	15
<b>Obr. 8</b> Upravený flíček.....	15
<b>Obr. 9</b> Kmitočtový průběh činitele odrazu (bez impedančního transformátoru).....	15
<b>Obr. 10</b> Kmitočtový průběh poměru stojatých vln .....	15
<b>Obr. 11</b> Kmitočtový průběh činitele odrazu (s impedančním transformátorem).....	16
<b>Obr. 12</b> Kmitočtový průběh poměru stojatých vln .....	16
<b>Obr. 13</b> Směrové charakteristiky na kmitočtu $f = 8,495$ GHz v rovině X-Z pro obě polarizace pole E.....	16
<b>Obr. 14</b> Vyzařovací charakteristika 3D na kmitočtu 8,495 GHz.....	17
<b>Obr. 15</b> Flíčková anténa se zpětnou vazbou .....	17
<b>Obr. 16</b> Rozměry tranzistoru ATF-36077 s označením vývodů a vzdálenosti plošek .....	18
<b>Obr. 17</b> Interdigitální dvouprstý kapacitor .....	19
<b>Obr. 18</b> Dialogové okno nastavení N-Portu .....	20
<b>Obr. 19</b> Struktura souboru vstupních dat pro dvojhran.....	20
<b>Obr. 20</b> Nástrojová lišta .....	21
<b>Obr. 21</b> Přepočítaná aktivní integrovaná anténa (vlevo). Detail kapacitoru (vpravo) .....	21
<b>Obr. 22</b> Kmitočtový průběh činitele odrazu .....	22
<b>Obr. 23</b> Kmitočtový průběh poměru stojatých vln .....	22
<b>Obr. 24</b> Směrové charakteristiky aktivní integrované antény na kmitočtu $f = 8,74$ GHz v rovině X-Z pro obě polarizace pole E.....	23
<b>Obr. 25</b> Směrové charakteristiky aktivní integrované antény na kmitočtu $f = 8,74$ GHz v rovině X-Z pro obě polarizace pole E.....	23
<b>Obr. 26</b> Dialogové okno pro export souboru.....	24
<b>Obr. 27</b> Spektrální složka malé integrované antény .....	26