

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**System pro rychlý návrh antén s využitím technologie  
plošných spojů**

**vedoucí práce: Ing. Jan Mráz, Ph.D.  
autor: Lukáš Strnad**

**2012**



## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem flíčkové antény. Hlavní část práce je věnována mikropáskovým anténám, jejich vlastnostem a způsobem napájení z hlediska návrhu. Další část se zabývá metodami návrhu a jejich implementace do realizované aplikace.

## **Klíčová slova**

Anténa, parametry antény, návrh antény, flíčková anténa, mikropásková anténa, model vedení, dutinový model, Gerber.

## **Abstract**

Strnad, Lukáš. *System for a Quick Antenna Design utilizing Printed Circuits Technology* [*Systém pro rychlý návrh antén s využitím technologie plošných spojů*]. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Ing. Jan Mráz, Ph.D.

This Bachelor thesis deals with design of patch antenna. Main part of thesis presents microstrip antenna, its properties and way of feed in term of design. Next part deals with methods of design and their implementation to software application.

## **Key words**

Antenna, antenna characteristics, design of antenna, patch antenna, microstrip antenna, transmission line model, cavity model, Gerber.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 4.6.2012

Lukáš Strnad

.....

## **Poděkování**

Poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Mrázovi, Ph.D. za cenné profesionální a praktické rady a připomínky.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1 ANTÉNNÍ PARAMETRY</b> .....	<b>9</b>
1.1 PRINCIP VYZAŘOVÁNÍ.....	9
1.2 SMĚROVÁ A VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA.....	10
1.2.1 Všesměrová anténa.....	10
1.2.2 Směrová anténa.....	11
1.3 VSTUPNÍ IMPEDANCE.....	12
1.4 ÚČINNOST.....	13
1.5 VÝKONOVÝ ZISK.....	13
1.6 ŠÍŘKA PÁSMO.....	14
<b>2 MIKROPÁSKOVÉ ANTÉNY</b> .....	<b>15</b>
2.1 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI.....	16
2.2 METODY NAPÁJENÍ.....	18
2.2.1 Mikropásková linka.....	18
2.2.2 Koaxiální sonda.....	18
2.2.3 Vazební štěrbin.....	19
2.2.4 Vazba s otevřeným koncem.....	19
<b>3 NÁVRH ANTÉNY</b> .....	<b>20</b>
3.1 OBDÉLNÍKOVÝ FLÍČEK.....	20
3.1.1 Rozptylové vlivy.....	20
3.1.2 Efektivní délka.....	21
3.1.3 Rozměry flíčku.....	22
3.1.4 Konduktance.....	23
3.1.5 Vstupní impedance.....	24
3.1.6 Zemní rovina.....	24
3.2 KRUHOVÝ FLÍČEK.....	25
3.2.1 Rezonanční frekvence.....	25
3.2.2 Velikost flíčku.....	26
3.2.3 Vstupní impedance.....	26
<b>4 FORMÁT GERBER</b> .....	<b>28</b>
4.1 PARAMETRY DAT.....	28
4.1.1 Příkaz AD.....	28
4.1.2 Příkaz FS.....	29
4.1.3 Příkaz IP.....	29
4.1.4 Příkaz MO.....	30
4.2 FUNKČNÍ KÓDY.....	30
4.3 SOUŘADNICE.....	30
4.4 UKÁZKA DAT GERBERU S GRAFICKÝM ZNÁZORNĚNÍM.....	31
<b>5 KONSTRUKČNÍ ZNAČKY</b> .....	<b>32</b>
5.1 OŘEZOVÉ ZNAČKY.....	32
5.2 SESAZOVACÍ ZNAČKY.....	32
<b>6 OVLÁDÁNÍ PROGRAMU</b> .....	<b>33</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>34</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>35</b>

## Úvod

Tato práce se zabývá návrhem antény, kterou lze vyrobit pomocí technologie plošných spojů. V úvodní části je vysvětleno několik základních anténních parametrů, které jsou důležité z hlediska návrhu. V další kapitole je seznámení s mikropáskovými (flíčkovými) anténami. Hlavní část práce je věnována návrhu této antény tak, aby mohla být zrealizována na desku plošného spoje. V dalších kapitolách je například zmíněn i výstupní soubor programu, formát Gerber. Ten slouží pro výrobce desek plošných spojů, kteří podle těchto dat vyrobí požadovanou anténu. V poslední kapitole je vysvětleno ovládání programu, jsou zde uvedeny všechny možnosti, které má uživatel při návrhu k dispozici. Je zde také uvedeno, k čemu slouží jednotlivé výstupní soubory.

Cílem práce je vytvoření programu, který zhotoví předlohu antény. Po pečlivém rozhodnutí, byla vybrána pro danou technologii právě flíčková anténa, se kterou se setkáváme denně. Tento druh antény je použit pro rádiové vlny v pásmu UHF (ultra krátkých vln). Flíčková anténa je díky jednoduché realizaci přímo na desku plošného spoje masivně používána například v mobilních telefonech pro příjem rádiové frekvence GSM a Bluetooth, v přenosných počítačích pro příjem bezdrátové komunikace Wi-fi a hlavně v armádních zařízeních, pro které byla původně určena vzhledem k jejímu nízkému profilu.



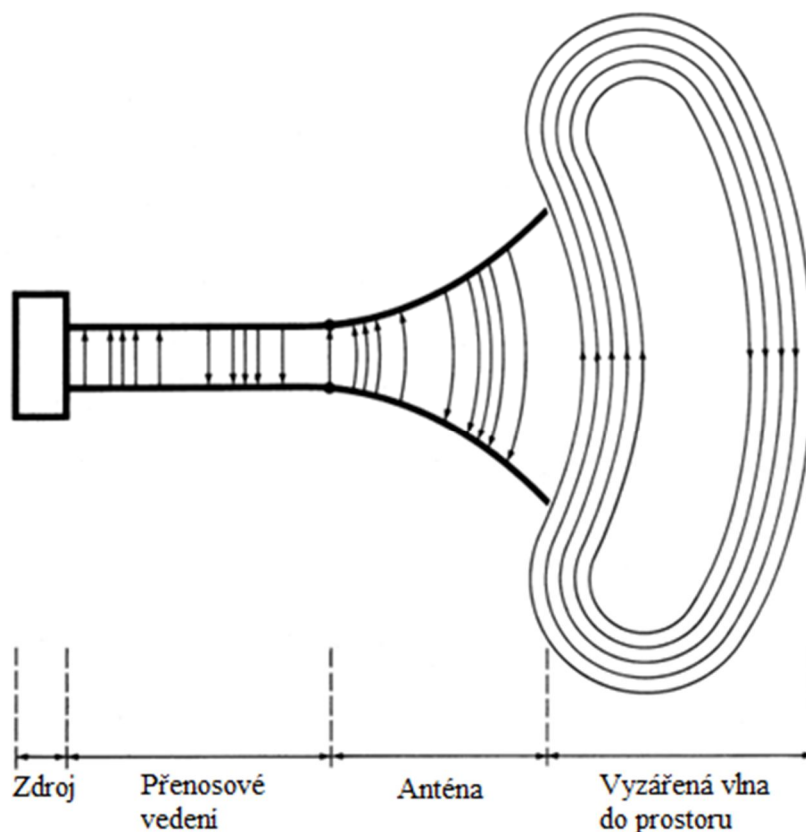
# 1 Anténní parametry

Anténa je definována jako zařízení pro vyzařování a příjem rádiových vln. Antény jsou považovány za jeden z nejdůležitějších článků radiokomunikačního řetězce. Starají se o převod elektromagnetického vlnění, šířícího se podél vedení, na vlnění ve volném prostoru (atmosféra, kosmický prostor, zemské vrstvy, voda atd.) a naopak (převod elektromagnetických vln ve volném prostoru na vlnění podél vedení). Parametry antény (jejich směrová a vyzařovací charakteristika, vstupní impedance a zisk) ovlivňují výsledné vlastnosti rádiového spojení.

Antény dělíme na vysílací a přijímací. Vysílací anténa funguje tak, že přivedené napětí k anténním svorkám vytváří střídavý proud na metalických vodičích antény, který způsobuje vyzařování elektromagnetického pole. U přijímací antény elektromagnetické pole z jiného zdroje indukuje proud na metalických vodičích antény a tím vytváří napětí na jejích svorkách. Z principu reciprocity a duality ale plyne, že každá anténa může fungovat zároveň jako přijímací a vysílací.

## 1.1 Princip vyzařování

Mechanismus vyzařování vysvětluje obr. 1.1, na kterém jsou znázorněny intenzity elektrického pole siločarami mezi metalickými vodiči. Toto pole vytváří harmonicky proměnný zdroj napětí. Elektrické pole působí silou na volné elektrony, jejichž pohyb vytváří elektrický proud ve vodičích a v prostoru se následně vytváří magnetické pole. Siločáry elektrického pole jsou kolmé k magnetickým siločárám. V části přenosového vedení jsou siločáry rovnoběžné, kolmé na vodič a vzdálené od sebe o polovinu vlnové délky. V čase se posunují od zdroje a v anténní části se zakřívují, stále platí podmínka kolmosti na vodič. Na konci vedení setrvávají do prostoru, ale konce siločar zůstávají zachyceny na koncích vodičů, dokud nedorazí další siločára, tím dojde k jejich spojení a ve volném prostoru vznikne uzavřená smyčka bez přítomnosti nábojů. Elektrické náboje jsou tedy nutné pro vybuzení pole, ale nejsou už nutné pro jeho udržení, vyzářená vlna se dál samostatně šíří v prostoru.



Obr. 1.1 Vyzářování elektromagnetické vlny

## 1.2 Směrová a vyzařovací charakteristika

Směrová charakteristika popisuje směrové vlastnosti přijímacích antén a vyzařovací charakteristika antén vysílacích. Velikost elektromagnetické energie, kterou anténa vyše (přijme), je různá v různých směrech. Směrové vlastnosti zahrnují intenzitu elektrického pole (amplitudu i fázi) a polarizační vlastnosti. Směrová charakteristika tedy zobrazuje intenzitu pole. [1]

### 1.2.1 Všesměrová anténa

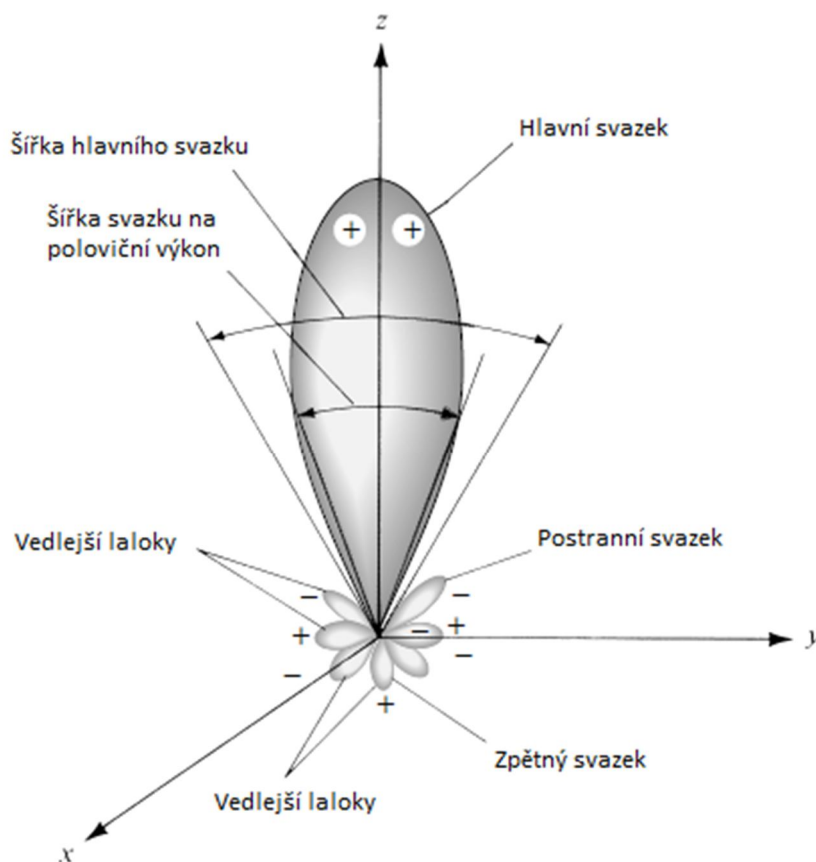
Všesměrová (izotropická) anténa je definována jako hypotetická anténa, jejíž vyzařovací vlastnosti nezávisí na směru. Tato anténa není fyzikálně realizovatelná, ale používá se jako reference k popisu vlastností reálných antén. Směrovou charakteristikou všesměrové antény je kulová plocha. [1]

### 1.2.2 Směrová anténa

Směrová anténa má směrové vlastnosti závislé na konkrétním směru, do kterého vysílá, nebo ze kterého zařízení přichází. Základní pojmy používané při popisu směrových vlastností antén jsou znázorněny na obr. 1.2.

Části směrové charakteristiky:

- hlavní svazek – reprezentuje směr hlavního příjmu a maxima vyzařovacích (přijímacích) vlastností
- vedlejší laloky – všechny svazky kromě hlavního
- postranní svazek – první svazek vedle hlavního
- zpětný svazek – lalok opačný k hlavnímu svazku
- šířka svazku na poloviční výkon – je rovna úhlu mezi dvěma směry, ve kterých je přijímaný výkon poloviční vzhledem k příjmu (-3 dB) ve směru osy hlavního svazku
- šířka hlavního svazku – celý úhlový rozsah pro hlavní lalok [1]

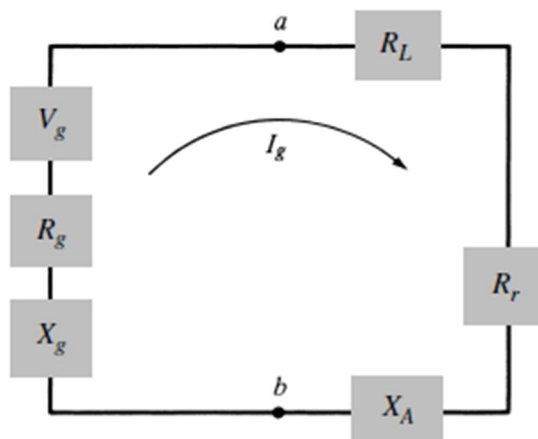


Obr. 1.2 Prostorové zobrazení směrové charakteristiky

### 1.3 Vstupní impedance

Vstupní impedance je impedance antény na jejích napájecích svorkách, je to tedy poměr napětí a proudu na těchto svorkách. Podle obr. 1.3 můžeme vstupní impedanci antény  $Z_A$  (vztaženou k místu napájení) napsat ve tvaru

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (1.1)$$



Obr. 1.3 Náhradní obvod antény (Theveninův ekvivalent) [2]

$$R_A = R_r + R_L \quad (1.2)$$

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (1.3)$$

$$I_g = \frac{V_g}{Z} = \frac{V_g}{Z_A + Z_g} \quad (1.4)$$

Kde  $R_r$  je vyzařovací odpor antény

$R_L$  je ztrátový odpor antény

$Z_g$  je vnitřní impedance generátoru

$V_g$  je napětí generátoru.

Vyzářený výkon je

$$P_{vyz} = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_r \quad (1.5)$$

Výkon ztracený přeměnou na teplo na anténě je

$$P_{ztr} = \frac{1}{2} |I_g|^2 R_L \quad (1.6)$$

Výkon ztracený na vnitřním odporu generátoru je

$$P_g = \frac{1}{2} U_g I_g^* = \frac{1}{2} R_g |I_g|^2 \quad (1.7)$$

Pro stav přizpůsobení platí

$$R_g = R_r + R_L \quad (1.8)$$

$$X_A = -X_g \quad (1.9)$$

## 1.4 Účinnost

Účinnost antény je reprezentována vztahem

$$\eta = \frac{P_{vyz}}{P_{vst}} \quad (1.10)$$

Kde  $\eta$  označuje bezrozměrnou celkovou účinnost antény

$P_{vyz}$  je celkový výkon vyzařený anténou

$P_{vst}$  je výkon na vstupu bezeztrátové antény.

Tato celková účinnost zahrnuje ztráty na vstupu a uvnitř anténní struktury, což jsou:

- $\eta_r$  – ztráty odrazem výkonu v důsledku nepřizpůsobení napájecího vedení a antény
- $\eta_c$  – ztráty v důsledku konečné vodivosti kovových částí antény
- $\eta_d$  – dielektrické ztráty v dielektriku, které se nachází v objemu vyzařující anténní struktury.

$$\eta = \eta_r \eta_d \eta_c \quad (1.11)$$

Celkovou účinnost ovlivňují objekty (předměty) ležící v blízkém poli antény. Tyto objekty leží sice mimo vlastní anténu, ale ovlivňují rozložení proudu, napětí a absorbují část výkonu.[1]

## 1.5 Výkonový zisk

Výkonový zisk je poměr vysílaného výkonu k výkonu dodávanému na vstup antény. Častěji se ale udává relativní zisk, jako poměr výkonového zisku v daném směru k výkonovému

zisku referenční bezztrátové antény v jejím referenčním směru. Zisk antény je tedy poměr výkonu na vstupu bezztrátové referenční antény k výkonu, který musíme přivést do skutečné antény, aby produkovala v daném směru stejné pole (stejný výkonový tok). [1]

Zisk se většinou vyjadřuje v decibelech

$$G(\vartheta, \varphi)_{dB} = 10 \cdot \log G(\vartheta, \varphi) \quad (1.12)$$

Zisk obecně vyjadřujeme pomocí směrovosti

$$G = \eta D \quad (1.13)$$

## 1.6 Šířka pásma

Vlastnosti antény (vstupní impedance, směrová charakteristika, zisk, polarizace) se mění různým způsobem v závislosti na frekvenci. Šířka pásma je rozsah frekvencí, ve kterém se anténa chová standardním způsobem (vzhledem ke specifikovaným charakteristickým veličinám). [1]

## 2 Mikropáskové antény

U letadel, satelitů, kosmických raket a řízených střel je velmi důležitý rozměr, váha, cena, výkon, jednoduchost výroby a aerodynamický profil, proto jsou u těchto zařízení použity nízko-profilové antény. V současné době existuje mnoho komerčních aplikací, jako jsou mobilní rádiové a bezdrátové komunikace, které mají podobné požadavky na anténu. Těmto požadavkům vyhovují právě mikropáskové antény.

Mikropáskové antény jsou nízko-profilové, vhodné k plošným a neplošným povrchům, mechanicky robustní, pokud jsou namontovány na pevné povrchy, jednoduché a levné na výrobu pomocí moderní technologie výroby plošných spojů. Při výběru vhodného tvaru flíčku (angl. patch) jsou tyto antény všestranné v rámci rezonanční frekvence, polarizace, směrové charakteristiky a impedance.

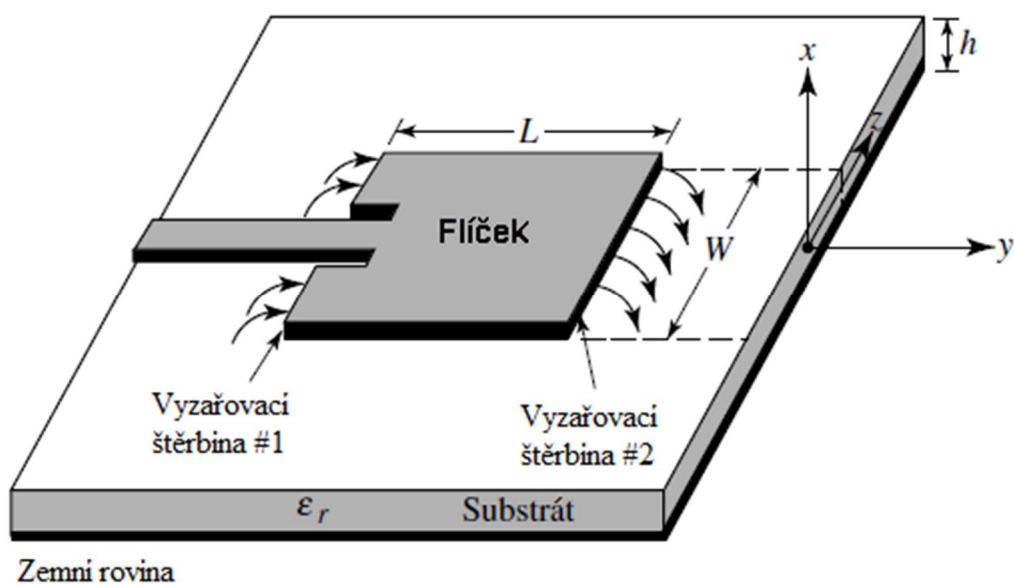
Hlavní nevýhodou mikropáskových antén je jejich nízká účinnost, nízký výkon, vysoký Q faktor, slabá polarizační čistota, slabý snímaný výkon, rušivé napájecí vyzařování a velmi úzká frekvenční šířka pásma, která je pouze zlomek procenta nebo nanejvýš několik procent. V některých aplikacích, jako například ve vládních bezpečnostních systémech, je úzká šířka pásma vyžadována.

Existují ale metody na zvětšení účinnosti a rozšíření šířky pásma, jsou jimi například zvýšení výšky substrátu. Tato metoda ale představuje nebezpečí v podobě povrchových vln, které jsou nežádoucí, protože snižují výkon pro přímé vyzařování (prostorové vlny). Povrchové vlny cestují uvnitř substrátu, jsou rozptýleny v ohybech a povrchových přerušeních (např. seříznutá dielektrická a zemní rovina) a znehodnocují směrovou a polarizační charakteristiku. Povrchové vlny mohou být odstraněny použitím dutin, zatímco se zachová široká šířka pásma. K rozšíření šířky pásma může být také použita metoda vrstvení mikropáskových prvků.

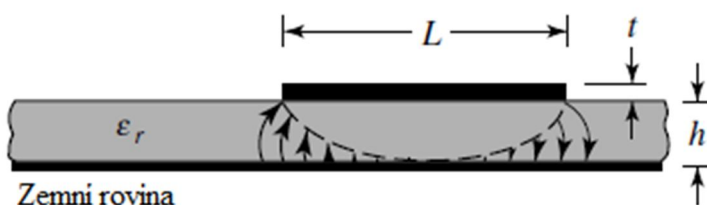
VHF (velmi krátké vlny) a UHF (ultra krátké vlny) jsou hlavní frekvenční pásma, ve kterých jsou mikropáskové antény použity. Tyto antény také projevují velké elektromagnetické příznaky v určitých frekvencích vně operačního pásma.

## 2.1 Charakteristické vlastnosti

Mikropáskové antény se skládají z velmi tenkého kovového flíčku umístěného malý zlomek vlnové délky nad zemní rovinou. Mikropáskový flíček je navrhován tak, aby jeho směrové vyzařovací maximum bylo kolmé na flíček. To je provedeno vhodným výběrem způsobu buzení pod flíčkem. Délka  $L$  obdélníkového flíčku je obvykle v rozmezí  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ . Flíček a zemní rovina jsou obvykle odděleny dielektrickým substrátem, jak ukazuje obr 2.1.



(a) Mikropásková anténa



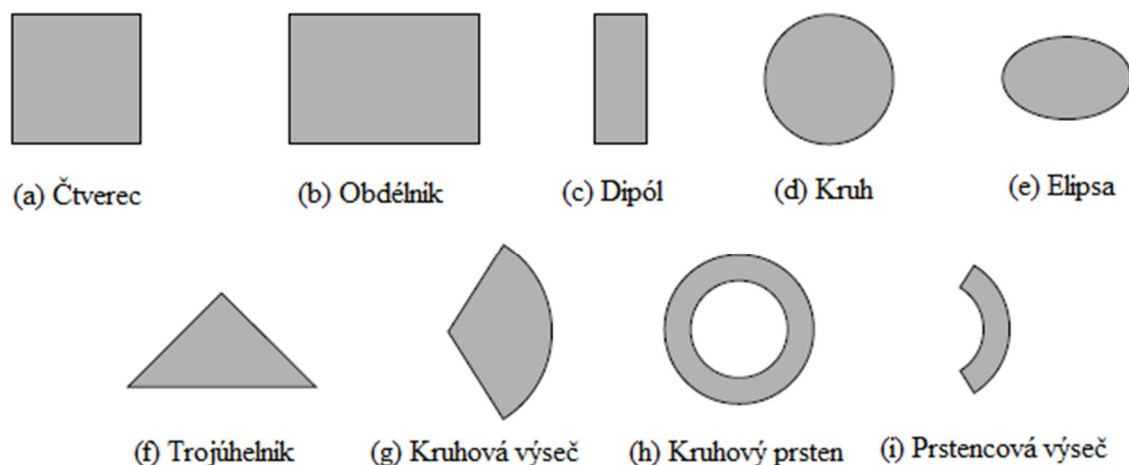
(b) pohled ze strany

Obr. 2.1 Mikropásková anténa



Existuje mnoho substrátů, které mohou být použity pro návrh mikropáskových antén. Jejich dielektrická konstanta se obvykle pohybuje v rozmezí  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Mezi nejžádanější pro dobrý anténní výkon jsou tlusté substráty, které mají dielektrickou konstantu na nižším konci rozsahu, protože poskytují lepší účinnost, širokou šířku pásma, volně vázané pole pro vyzařování do prostoru, ale na účet velkého rozměru flíčku. Tenké substráty s vysokou dielektrickou konstantou jsou žádané pro mikrovlnné obvody, protože vyžadují pevně vázané pole k minimalizaci nežádoucího záření a vazby a vedou k menším rozměrům flíčku; avšak kvůli jejich významným ztrátám jsou méně účinné a mají relativně menší šířku pásma. Od té doby, co jsou mikropáskové antény integrovány spolu s mikrovlnnými obvody, se volí kompromis mezi dobrým anténním výkonem a návrhem obvodu.

Vyzařovací prvky (flíčky) a napájecí linky jsou obvykle nanášeny na dielektrický substrát fotoceistou. Vyzařovací flíček může mít tvar čtverce, obdélníku, tenkého pásku (dipólu), kruhu, elipsy, trojúhelníku nebo jiného provedení. Tyto a ostatní možnosti jsou ilustrovány na obr. 2.2. Čtverec, obdélník, dipól a kruh jsou nejběžnější kvůli jejich lehké analýze a výrobě, jejich atraktivní vyzařovací charakteristice a speciálně nízkému křížovému polarizačnímu záření. Mikropáskové dipóly mají také širokou šířku pásma a zabírají méně prostoru.



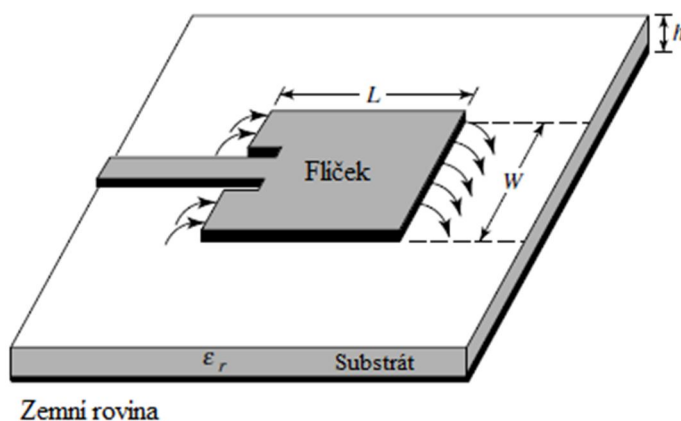
Obr. 2.2 Různé tvary flíčků

## 2.2 Metody napájení

Pro napájení flíčku lze použít kontaktní napájení (mikropáskovou napájecí linkou či koaxiální sondou) nebo napájení zprostředkované elektromagnetickou vazbou (vazební štěrbinou či vazbou s otevřeným koncem).

### 2.2.1 Mikropásková linka

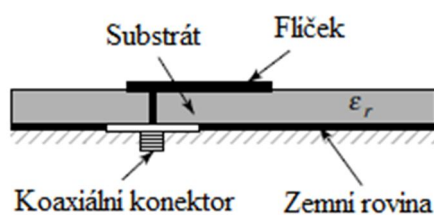
Jedná se o vodivý proužek, obvykle mnohem menší šířky v porovnání a flíčkem. Mikropáskový napájecí vodič je jednoduchý na výrobu. Ale jak se zvyšuje výška substrátu, zvyšuje se rušivé napájecí záření a povrchové vlny. Tyto nežádoucí jevy omezují šířku pásma pro praktické návrhy.



Obr. 2.3 Mikropáskové napájení

### 2.2.2 Koaxiální sonda

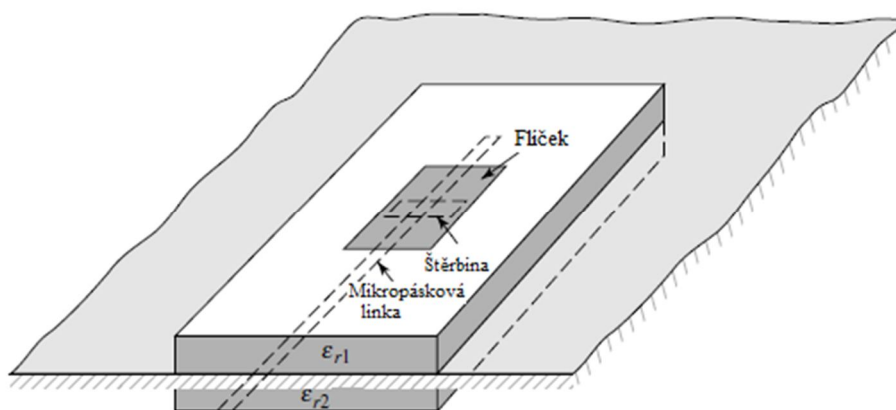
Napájení koaxiální sondou, kde vnitřní vodič koaxiálu je připojen k vyzařujícímu flíčku a vnější vodič je spojen se zemní rovinou, je široce používané. Koaxiální napájecí sonda je také snadná na výrobu a spojení, a má nízké rušivé záření. Ale má také úzkou šířku pásma a je náročnější na návrh.



Obr. 2.4 Napájení sondou

### 2.2.3 Vazební štěrbinou

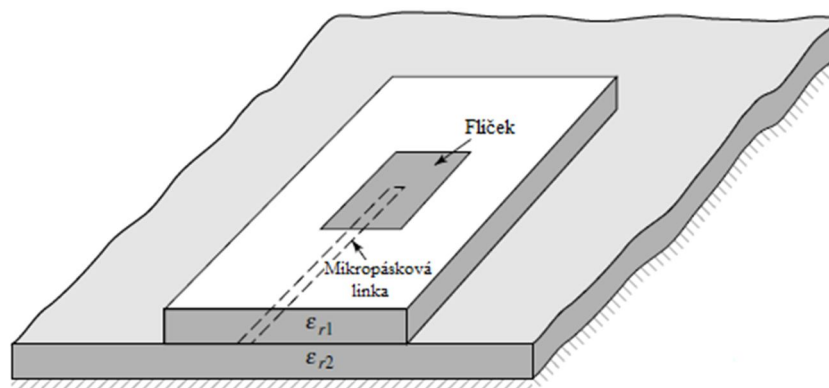
Napájení vazební štěrbinou je složité na výrobu a má úzkou šířku pásma, ale je poněkud lehčí na modelování a má malé rušivé vyzařování. Tato anténa se skládá ze dvou substrátů oddělených zemní rovinou. Na spodní části dolního substrátu je mikropásková napájecí linka, jejíž energie je spřažená s flíčkem skrz štěrbinu v zemní rovině. Dané uspořádání povoluje nezávislou optimalizaci napájecího zařízení a vyzařujícího prvku. Typicky vysoký dielektrický materiál je použit pro spodní substrát a nízká dielektrická konstanta materiálu pro vrchní substrát. Zemní rovina mezi substráty izoluje napájení z vyzařujícího prvku a zmenšuje interferenci rušivého vyzařování pro směrovou charakteristiku a polarizační čistoty.



Obrázek 2.5 Napájení vazební štěrbinou

### 2.2.4 Vazba s otevřeným koncem

Tento způsob napájení má širokou šířku pásma (dosahuje 13ti procent) a nízké rušivé vyzařování. Avšak výroba takové antény je složitá. Napájecí mikropásková linka je přivedena mezi dva substráty a je kapacitně spřažená s flíčkem.



Obrázek 2.6 Napájení vazbou s otevřeným koncem

### 3 Návrh antény

Model vedení, momentová metoda (zahrnující integrální rovnice) a dutinový model jsou nejpoužívanější metody analýzy mikropáskových antén. Model vedení je nejjednodušší, ale méně přesný. Dutinový model je přesnější a zároveň komplexnější, dává dobrý fyzikální pohled, ale je složitější k modelování vazeb. Momentová metoda je velmi přesná, všestranná a může zpracovávat jednotlivé prvky, konečná a nekonečná pole, vrstevné prvky, libovolně tvarované prvky a vazby.

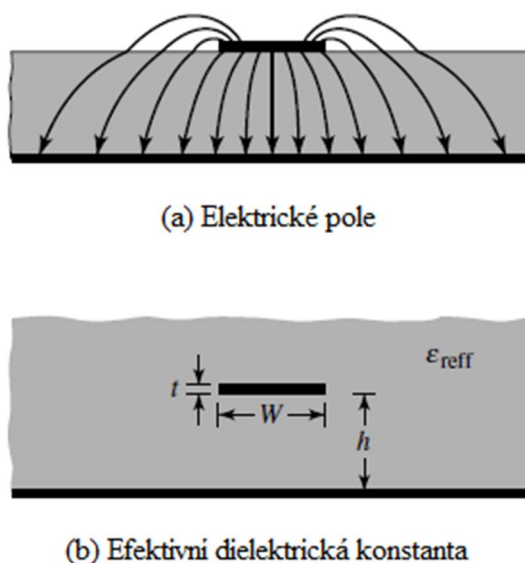
#### 3.1 Obdélníkový flíček

Obdélníkový flíček je rozsáhle používanou konfigurací. Je velmi jednoduchý na analýzu užitím modelu vedení a dutinového modelu. Obdélníková mikropásková anténa může být reprezentována polem o dvou vyzařujících úzkých štěrbin délky  $W$  (šířka flíčku) a výšky  $h$ , vzdálených od sebe o  $L$  (délka flíčku). V podstatě model vedení reprezentuje mikropáskovou anténu dvěma štěrbinami oddělenými nízkou impedancí vedení délky  $L$ , jak ukazuje obr. 2.1 (a). Tuto metodu si popíšeme podrobněji v následujících podkapitolách.

##### 3.1.1 Rozptylové vlivy

Protože velikost flíčku je konečná, pole na okrajích flíčku podléhají rozptylu. To je ilustrováno podél délky  $L$  na obr. 2.1 (a, b) pro dvě vyzařující štěrbin mikropáskové antény. Velikost rozptylu je funkcí rozměru flíčku a výšky substrátu. Pro hlavní rovinu rozptylu je funkce podílu délky  $L$  k výšce  $h$  a dielektrické konstanty  $\epsilon_r$  substrátu. Jelikož pro mikropáskové antény platí  $L/h \gg 1$ , je rozptyl omezen.

K rozptylu také dochází z důvodu nehomogenního prostředí, jedná se o rozhraní mezi dvěma dielektriky, substrát a vzduch. Jak ukazuje obr. 3.1 (a), tak většina elektrického pole se udržuje v substrátu a jen část je ve vzduchu. Jelikož platí, že  $W/h \gg 1$  a  $\epsilon_r \gg 1$ , koncentruje se elektrické pole nejvíce v substrátu. Vzhledem k tomu, že některé vlny cestují v substrátu a některé vzduchem, je zavedena pro vysvětlení rozptylu *efektivní dielektrická konstanta*  $\epsilon_{ref}$ , ilustrována na obr. 3.1 (b). Tato konstanta zahrnuje okolí nad flíčkem (vzduch) i samotný dielektrický substrát. Pro rozsah této konstanty platí  $1 < \epsilon_{ref} < \epsilon_r$ . Pro většinu aplikací, kde dielektrická konstanta substrátu je mnohem větší než jedna ( $\epsilon_r \gg 1$ ), bude hodnota  $\epsilon_{ref}$  blízká hodnotě dielektrické konstanty  $\epsilon_r$  substrátu.



Obr. 3.1 Siločáry elektrického pole a geometrie efektivní dielektrické konstanty

Výchozí hodnota efektivní dielektrické konstanty je označována jako statická hodnota a je dána vztahem

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Efektivní délka

Kvůli rozptylovým vlivům vypadá flíček mikropáskové antény elektricky větší než jsou jeho fyzikální rozměry. Rozměry flíčku podél jeho délky jsou prodlouženy na každém konci o vzdálenost  $\Delta L$ , jak je vidět na obr. 3.2.  $\Delta L$  je funkcí efektivní dielektrické konstanty a podílu šířky  $W$  k výšce  $h$ . Aproximovaný vztah pro rozšíření délky je

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\varepsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (3.2)$$

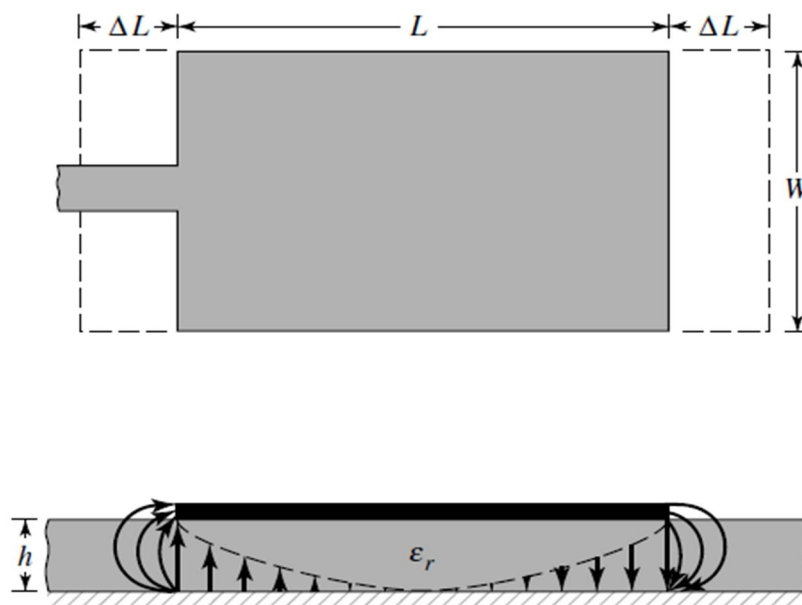
Délka flíčku je tedy prodloužena o  $\Delta L$  na každé straně, efektivní délka flíčku je nyní

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (3.3)$$

Rezonanční frekvence mikropáskové antény je funkcí její délky

$$f_r = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.4)$$

kde  $v_0$  je rychlost světla ve vakuu.



Obr. 3.2 Skutečná a efektivní délka flíčku [2]

### 3.1.3 Rozměry flíčku

Podle hrubé formulace popsané výše je postup stanoven tak, aby vedl k praktickému návrhu obdélníkové mikropáskové antény. Tento postup předpokládá, že se stanoví parametry zahrnující dielektrickou konstantu substrátu ( $\epsilon_r$ ), rezonanční frekvenci ( $f_r$ ) a výšku substrátu ( $h$ ). Postup návrhu je následující:

Stanovené parametry:  $\epsilon_r$  [-],  $f_r$  [Hz],  $h$  [m]

Vyšetřené parametry:  $W$  [m],  $L$  [m]

Postup při návrhu:

1. Pro účinný zářič, je praktická šířka flíčku definována vztahem

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.5)$$

2. Výpočet efektivní dielektrické konstanty mikropáskové antény užitím vztahu (3.1)
3. Výpočet prodloužení délky  $\Delta L$  užitím vztahu (3.2)
4. Výpočet skutečné délky flíčku užitím vztahu

$$L = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (3.6)$$

### 3.1.4 Konduktance

Každá vyzařující šterbina je reprezentována paralelní ekvivalentní admitancí  $Y$  (zahrnující konduktanci  $G$  a susceptanci  $B$ ). Tyto veličiny jsou ilustrovány na obr. 3.3, kde index u veličiny značí danou šterbinu (#1 a #2). Vztah mezi veličinami je

$$Y_1 = G_1 + jB_1 \quad (3.7)$$

kde pro šterbinu (#1) konečné šířky  $W$  platí

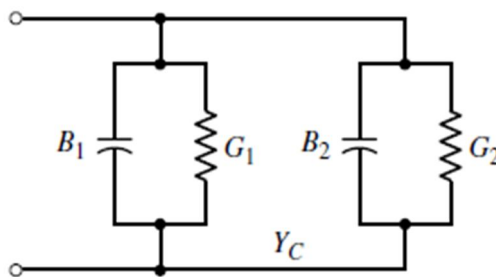
$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[ 1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right] \quad (3.8)$$

kde  $k_0$  značí vlnové číslo

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3.9)$$

a  $\lambda_0$  reprezentuje vlnovou délku

$$\lambda_0 = \frac{v_0}{f_r} \quad (3.10)$$



Obr. 3.3 Ekvivalentní obvod modelu vedení [2]

Pro šterbinu #2 platí identické vztahy jako pro šterbinu #1.

$$Y_2 = Y_1, \quad G_2 = G_1, \quad B_2 = B_1 \quad (3.11)$$

### 3.1.5 Vstupní impedance

Celková admitance ve štěrbině #1 (vstupní admitance) je získána přenesením admitance štěrbině #2 z výstupních svorek ke svorkám vstupním. V ideálním případě by obě štěrbině měli být odděleny o  $\lambda/2$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka v dielektriku (substrátu). Avšak kvůli rozptylu je délka flíčku elektricky delší než skutečná délka. Proto skutečné oddělení štěrbin je nepatrně menší než  $\lambda/2$ . Pokud je zkrácení délky vhodně vybráno užitím vztahu (3.2), transformovaná admitance štěrbině #2 je

$$\tilde{Y}_2 = \tilde{G}_2 + j\tilde{B}_2 = G_1 - jB_1 \quad (3.12)$$

Proto celková vstupní rezonanční admitance je skutečná a je dána vztahem

$$Y_e = Y_1 + \tilde{Y}_2 = 2G_1 \quad (3.13)$$

Vzhledem k tomu, že celková vstupní impedance je skutečná, je skutečná také vstupní rezonanční impedance

$$Z_e = \frac{1}{Y_e} = R_e = \frac{1}{2G_1} \quad (3.14)$$

Tento vztah je zjednodušen, protože nebere v úvahu vzájemné vlivy mezi štěrbinami. Impedance se mění podle vzdálenosti od nuly (od středu flíčku) na hodnotu  $R_e$ , která reprezentuje impedanci na krajích flíčku. Podle následujícího vztahu vypočteme konkrétní vstupní rezistanci  $R_i$  ve vzdálenosti  $x$  od středu flíčku, kde pro  $x$  platí  $0 \leq x \leq L/2$

$$R_i = R_e \sin^2 \frac{\pi x}{L} \quad (3.15)$$

Tento vztah upravíme a vyjádříme z něj  $x$

$$x = \frac{L}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{\frac{R_i}{R_e}} \quad (3.16)$$

### 3.1.6 Zemní rovina

Model vedení je vhodný pouze pro teoreticky nekonečnou zemní rovinu (substrát). Ale pro praktický význam je podstatné mít konečný rozměr zemní roviny. Podobné výsledky pro



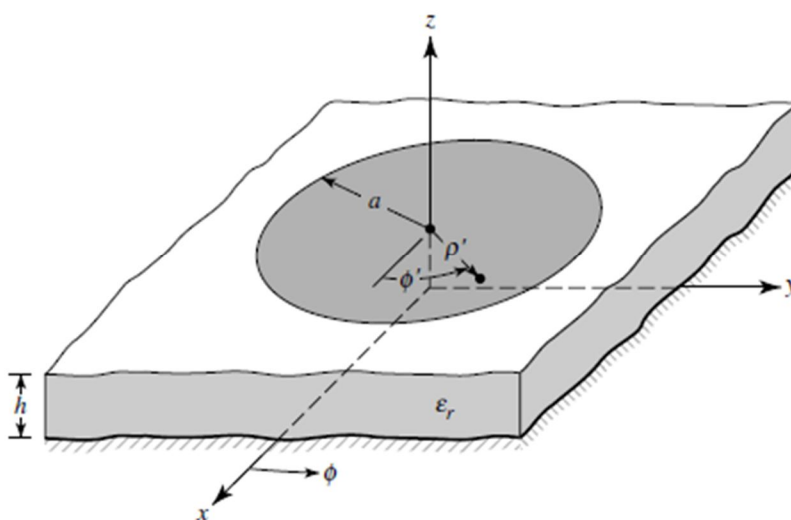
konečnou a nekonečnou zemní rovinu můžeme získat, pokud rozměr zemní roviny bude větší o šestnásobek tloušťky substrátu.

$$L_g = 6h + L \quad (3.17)$$

$$W_g = 6h + W \quad (3.18)$$

## 3.2 Kruhový flíček

Kruhový flíček je hned po obdélníkovém nejrozšířenější. Dostává se mu velké pozornosti kvůli jedinému vyzařujícímu prvku a jeho jedinečné struktuře pole.



Obr. 3.4 Geometrie kruhové mikropáskové flíčkové antény [2]

Pro obdélníkový flíček jsme měli dvě nezávislé hodnoty (délku a šířku). Pro kruhový flíček máme pouze jednu nezávislou hodnotu, a to poloměr flíčku. Kruhová flíčková anténa je pohodlně analyzována užitím dutinového modelu stejně jako v případě obdélníkového flíčku, ale nyní s použitím válcových souřadnic. Dutina je složena ze dvou ideálních elektrických vodičů na vrchu a vespod, které reprezentují flíček a zemní rovinu, a ideálním válcovým magnetickým vodičem kolem kruhového okraje dutiny. Předpokládáme také, že dielektrický materiál substrátu je seříznut za rozměrem samotného flíčku.

### 3.2.1 Rezonanční frekvence

Vztah pro rezonanční frekvenci je dán tvarem

$$f_r = \frac{1.8412v_0}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.19)$$

kde  $a$  představuje poloměr flíčku.

Tento vztah (3.19) pro rezonanční frekvenci nebere v úvahu rozptyl pole. Rozptyl, jak ukazuje obr. 3.1, způsobuje, že flíček vypadá elektricky větší. Proto je brán také v úvahu uvedený délkový korekční faktor. Podobný kruhový flíčkový faktor je reprezentován efektivním poloměrem  $a_e$  nahrazující skutečný poloměr  $a$

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi a}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2} \quad (3.20)$$

Proto je nutné upravit vztah pro rezonanční frekvenci

$$f_r = \frac{1.8412 v_0}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.21)$$

### 3.2.2 Velikost flíčku

Na základě formulace dutinového modelu je navrhnout postup, který vede k praktickému návrhu kruhové mikropáskové antény. Postup předpokládá předem dané informace o anténě, kterými jsou dielektrická konstanta substrátu  $\epsilon_r$ , rezonanční frekvence  $f_r$  a výška substrátu  $h$ . Postup je následující

Stanovené parametry:  $\epsilon_r$  [-],  $f_r$  [Hz],  $h$  [cm]

Vyšetřené parametry: skutečný poloměr flíčku  $a$  [cm]

Postup při návrhu:

1. Aproximace prvního řádu řešením (3.20) pro  $a$
2. Zjištění  $a_e$  úpravou rovnice (3.21) a dosazením do (3.20)

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (3.22)$$

kde

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.23)$$

### 3.2.3 Vstupní impedance

Stejně jako v případě obdélníkové flíčkové antény je vstupní impedance kruhového flíčku v rezonanci reálná. Vstupní energie je nezávislá na pozici napájecího bodu podél obvodu

kružnice. Pokud vezmeme v potaz, že úhel  $\phi' = 0^\circ$  (na obr. 3.4), potom vstupní rezistance ve vzdálenosti  $\rho' = \rho_0$  od středu flíčku je dána vztahem

$$R_{in}(\rho' = \rho_0) = R_r \frac{J_1^2(k\rho_0)}{J_1^2(ka_e)} \quad (3.24)$$

kde  $R_r$  je celková rezistance v důsledku vyzařování

$J_1^2(k\rho_0)$  a  $J_1^2(ka_e)$  jsou lineárně nezávislé Besselovy funkce.

## 4 Formát Gerber

Výstupní data vytvořeného programu jsou mimo jiné ve formátu Gerber RS-274X. Gerber data slouží jako vstupní data pro fotoplotr. Na základě těchto dat je fotoplotrem vytvořen motiv na desce plošného spoje. Gerber RS-274X je rastrový formát obsahující mass parametry. Tyto parametry ovlivňují charakter gerberovských dat, deklarují formát souřadnic, typ štěrby, polaritu aj. S těmito operacemi (př. deklarace formátu) pracuje operátor fotoplotru. V následujícím textu jsou uvedeny základní mass parametry, které byly použity v realizovaném programu. Datový formát Gerber RS-274X obsahuje tyto základní části: parametry dat, funkční kódy a souřadnice. Jednotlivá data jsou od sebe oddělena speciálními znaky. Znak \* značí konec bloku a ukončuje mass parametr. Znak % vymezuje začátek a konec mass parametru a stojí bezprostředně za znakem \*.

### 4.1 Parametry dat

Parametry dat obsahují formát souřadnic, použité jednotky a mód souřadnic, tím je určeno, jak se mají výsledná data přeložit. V příložené aplikaci byly použity následující příkazy pro parametry dat. [7, 8]

#### 4.1.1 Příkaz AD

Příkaz AD definuje tvar a velikost štěrby. Mezi tyto tvary patří například kruh a obdélník, které byly použity v aplikaci.

Obecný zápis příkazu AD pro kruh má následující tvar:

$$\%ADD < kód > C, < \$1 > X < \$2 > X < \$3 > * \% \quad (4.1)$$

- AD je příkaz definice štěrby
- D < kód > určuje číslo přidělené štěrby
- C je označení pro kruh (circle)
- \$1 je průměr kruhu
- \$2 je průměr vnitřní středové kruhové díry, v tomto případě není použit parametr \$3
- \$3 určuje spolu s parametrem \$2 rozměr vnitřní středové obdélníkové díry (\$2 – rozměr vůči ose x, \$3 – rozměr vůči ose y)

Obecný zápis příkazu AD pro obdélník má tvar:

$$\%ADD < kód > C, < \$1 > X < \$2 > X < \$3 > * \% \quad (4.2)$$

- AD je příkaz definice šterbiny
- D < kód > určuje číslo přidělené šterbiny
- R je označení pro obdélník (rectangular)
- \$1 je x-ový rozměr obdélníku
- \$2 je y-ový rozměr obdélníku
- \$3 je průměr vnitřní středové kruhové díry, v tomto případě není použit parametr \$4
- \$4 určuje spolu s parametrem \$3 rozměr vnitřní středové obdélníkové díry (\$3 – rozměr vůči ose x, \$4 – rozměr vůči ose y)

#### 4.1.2 Příkaz FS

Příkaz FS definuje formát souřadnic.

Obecný zápis příkazu FS má tvar:

$$\%FS \begin{Bmatrix} L \\ T \\ D \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ I \end{Bmatrix} (X_A)(Y_B) * \% \quad (4.3)$$

- L (leading zero) značí vynechání nul před souřadnicí (souřadnice bez desetinné tečky)
- T (trailing zero) značí vynechání nul za souřadnicí (souřadnice bez desetinné tečky)
- D značí souřadnice s desetinnou tečkou
- A znamená absolutní mód – poloha souřadnice je vyjádřena jako absolutní vzdálenost od nuly (od počátku [0,0])
- I znamená přírůstkový (inkrementální) mód – souřadnice jsou vyjádřeny relativně v závislosti na poloze předchozí souřadnice
- $X_A$  označuje počet celých čísel
- $Y_B$  označuje počet desetinných míst

#### 4.1.3 Příkaz IP

Příkaz IP definuje polaritu vykreslované plochy. Parametr POS značí pozitivní polaritu a parametr NEG negativní polaritu.

$$\%IPPOS * \% \quad (4.4a)$$

$$\%IPNEG * \% \quad (4.4b)$$

#### 4.1.4 Příkaz MO

Příkaz MO definuje jednotky, ve kterých jsou vypsány souřadnice, a jednotky rozměrů v příkazu AD. Parametr IN udává palcové jednotky a parametr MM milimetrové.

$\%MOIN * \%$  (4.5a)

$\%MOMM * \%$  (4.5b)

#### 4.2 Funkční kódy

Funkční kódy určují funkci fotoplotru, tvar čáry a velikost čáry (šterbiny). Mezi funkční kódy patří D kódy, řídicí D kódy, G kódy a M kódy.

D kódy definují velikost šterbiny, nabývají hodnot od D10 do D99.

Řídicí D kódy se udávají za každou souřadnicí a definují, co má fotoplotr na této souřadnici udělat.

- D01 (D1) – pohyb optické hlavy fotoplotru s rozsvíceným světlem
- D02 (D2) – pohyb optické hlavy fotoplotru se zhasnutým světlem
- D03 (D3) – vyblesknutí šterbiny

G kódy definují funkci dat, v realizované aplikaci byl tento kód nahrazen příkazem MO (příkaz 4.5b). Pro příklad jsou uvedeny 2 nejčastější příkazy G kódu.

- G70 – udává palcové jednotky
- G71 – udává milimetrové jednotky

M kódy definují dodatečné příkazy.

- M02 (M2) – značí konec dat

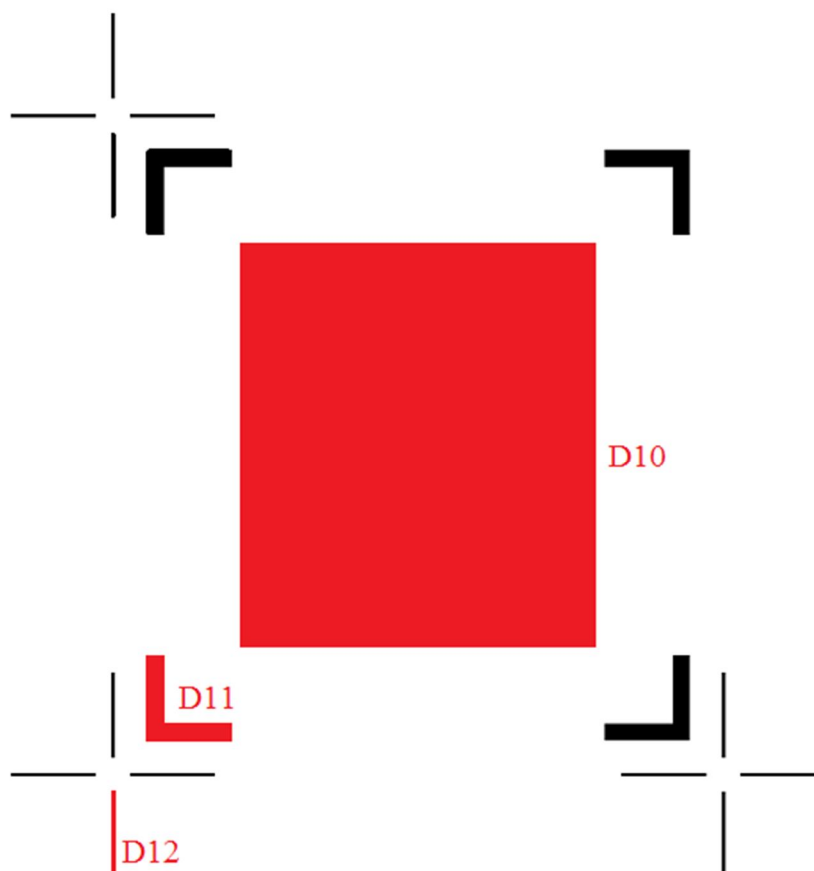
#### 4.3 Souřadnice

Souřadnice určují pozici pro přesun fotoplotru. V hlavičce souboru lze pomocí `mass` parametrů ovlivnit formát souřadnic (jednotky, mód, počet celých a desetinných míst). Ve vytvořeném programu jsou souřadnice zadány v milimetrech (příkaz 4.5b), polarita je pozitivní (příkaz 4.4a), mód je absolutní (tzn. každá souřadnice je počítána od počátku [0,0]) a počet celých čísel je roven 4, stejně jako počet desetinných míst.

#### 4.4 Ukázka dat Gerberu s grafickým znázorněním

Na obr. 4.1 jsou červeně zvýrazněny ty čáry (štěrbiny), které jsou uvedeny v kódu nad obrázkem. K těmto štěrbinám jsou uvedeny příslušné řídicí D kódy.

```
%FSLAX44Y44*%
%MOMM*%
%IPPOS*%
%ADD10R,42.126X48.402*%
%ADD11R,1.000X1.000*%
%ADD12R,0.200X0.200*%
D10*
X345630Y377011D03*
D11*
X125000Y85000D02*
X85000Y85000D01*
X85000Y125000D01*
D12*
X60000Y00000D02*
X60000Y50000D01*
M02*
```



Obr. 4.1 Flíček s konstrukčními značkami

## 5 Konstrukční značky

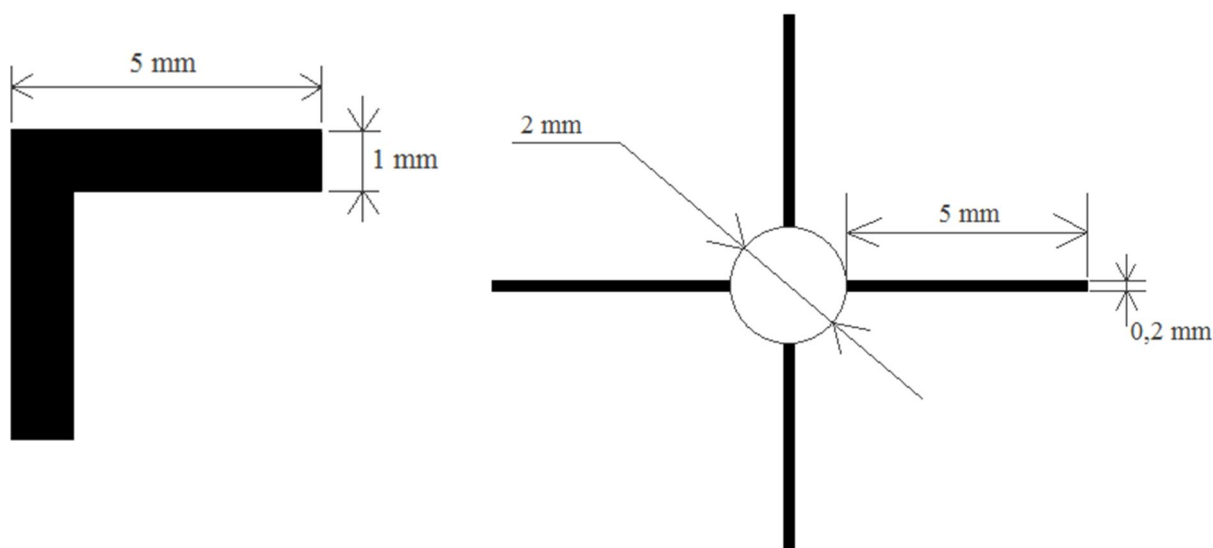
Návrh plošného spoje musí respektovat požadavky na rozměr a uchycení desky plošného spoje (DPS) do nějakého zařízení. Proto byly do návrhu umístěny ořezové a sesazovací značky, viz obr. 4.1.

### 5.1 Ořezové značky

Tvorba značek je dána technologickými požadavky výrobce, nejběžnější jsou ořezové (ostříhové) značky pro padací nůžky. Pokud nejsou velké nároky na přesnost, tak stačí pouze orámovat desku plošného spoje. Při vyšších nárocích se ve všech rozích desky umísťují ořezové značky. Ukázka této značky i s použitými rozměry je ilustrována na obr. 5.1 vlevo.

### 5.2 Sesazovací značky

Sesazovací značky slouží ke správnému umístění filmové matrice při zpracování jednotlivých vrstev a k řízení vrtacích nástrojů. Sesazovací značka má tvar kříže s vrtacím otvorem uprostřed. Narozdíl od ořezových značek jsou sesazovací značky z důvodu orientace DPS pouze tři a tvoří navzájem pravý úhel.

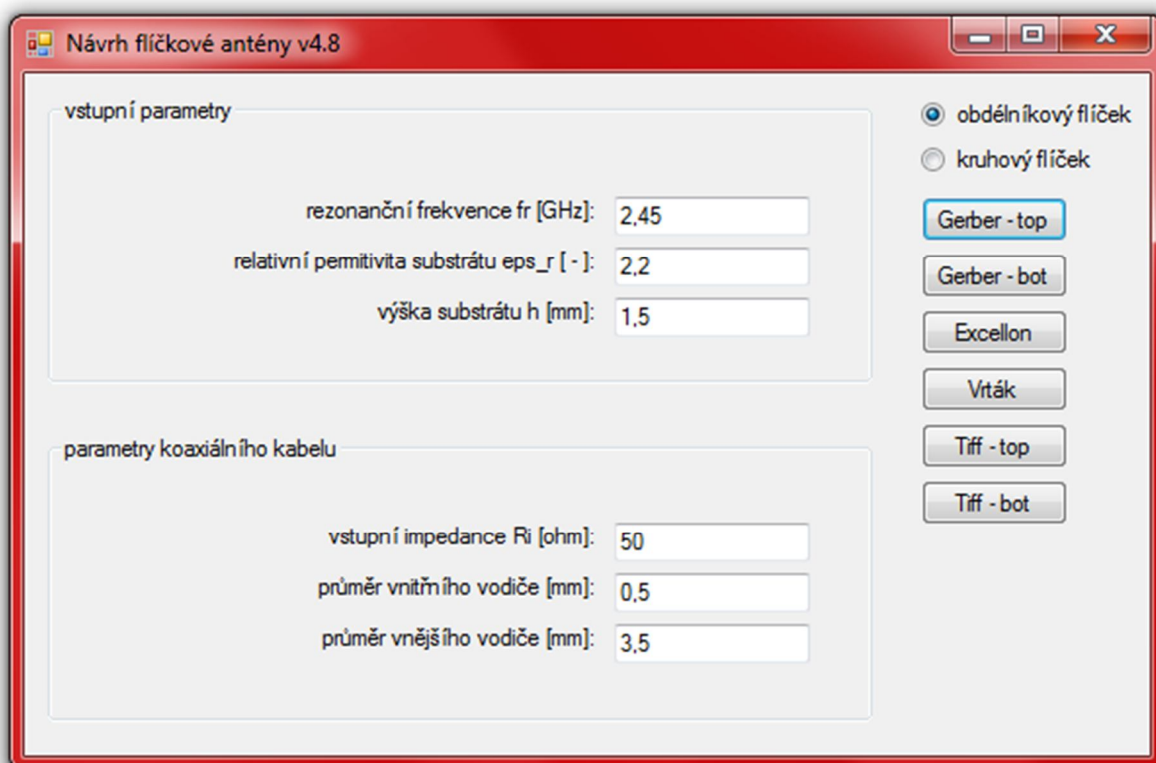


Obr. 5.1 Ořezová a sesazovací značka



## 6 Ovládání programu

Pro návrh antény zhotovitelné technologií plošných spojů byl napsán program ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2010 v programovacím jazyku Visual C++. Jedná se o aplikaci ve Windows formě, jak je vidět z obr. 6.1.



Obr. 6.1 Uživatelské prostředí

Pro uživatele jsou defaultně zadány vstupní parametry, které je možno libovolně měnit. Z důvodu návrhu a výroby je nutné zadat frekvenci, na které bude anténa vysílat, relativní permitivitu substrátu a výšku substrátu. V dalším bloku se zadávají parametry pro koaxiální kabel (vstupní impedance, průměr žíly a pláště). V uživatelském prostředí je také možnost výběru mezi obdélníkovým a kruhovým tvarem flíčku.

Jako výstupní data jsou k dispozici seznam vrtáků a formáty Gerber, Excellon a Tiff. Formát Gerber slouží jako vstupní data pro foteplotr nebo pro frézu, někteří výrobci desek plošných spojů vyžadují pouze tento formát. Formát Excellon udává vstupní data pro vrtací nástroje. Díky formátu Tiff si může uživatel vyrobit anténu doma chemickou cestou, tento formát slouží také jako náhled antény.

## Závěr

Z řad antén, které se dají vyrobit technologií plošných spojů, jsou jimi například šterbinové antény, meandrové antény, čipové antény, fraktálové antény a antény typu PIFA, byla vybrána právě flíčková anténa. Existují různé metody návrhu této antény. Pro obdélníkovou flíčkovou anténu byl použit model vedení, který není příliš přesný, ale je jednoduchý a rychlý. Pro kruhovou flíčkovou anténu byl použit dutinový model, který je přesnější, ale složitější. V případě kruhového flíčku byly vztahy zjednodušeny a aproximovány pro použití v dané aplikaci, to se týká především výpočtu pozice pro umístění koaxiální sondy, kde byly takto upraveny Besselovy funkce. Výsledkem této aproximace je určení místa pro napájení ležícího v jedné třetině vzdálenosti od středu antény k hraně flíčku.

Generovaná data Gerberu a Excellonu byly vytvořeny tak, aby je mohli přečíst i složitější návrhové systémy. To je důvod, proč byly použity souřadnice bez desetinné tečky. Díky tomu mají všechny čísla stejný počet desetinných míst a prohlížeče nemají problém s jejich přečtením. Jako prohlížeč Gerberu a Excellonu byl použit návrhový systém Altium Designer Release 10, online internetový prohlížeč [gerber-viewer.com](http://gerber-viewer.com), GC-Prevue od GraphiCode a Android Gerber Viewer. Z těchto prohlížečů je nejpřesnější Altium Designer, který „neodpustí“ chyby ve vstupních datech. Zato online prohlížeč [gerber-viewer.com](http://gerber-viewer.com) je více tolerantní a slouží spíše pro hrubý náhled. Malé návrhové systémy, jako jsou Eagle a Formica, pracují jenom v palcovém rastru a Gerber data umí pouze generovat. U formátu Excellon je nutné, aby před přečtením dat prohlížečem byl nastaven počet desetinných míst, který je roven čtyřem.

## Použitá literatura

- [1] MAZÁNEK, Miloš a PECHAČ, Pavel. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. 2., přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2005. 259 s. ISBN 80-01-03032-6.
- [2] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. xvii, 1117 s. ISBN 0-471-66782-X.
- [3] RAIDA, Zbyněk. a kolektiv. *Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika*, VUT Brno 2010.
- [4] MILLIGAN, T. A. *Modern Antenna Design*, John Wiley & Sons, 2005.
- [5] GARG, R.; BHARTI, P.; BAHL, I.; ITTIPIBOON, A. *Micristrip Antenna Design Handbook*, Artech House Boston 2001.
- [6] <<http://etd.lib.fsu.edu/theses/available/etd-04102004-143656/unrestricted/Chapter4.pdf>>.
- [7] ŠULAVA, Rudolf. *Konverze datového formátu rastrového ftoplotru GERBER RS-274x na vektorový formát GERBER RS-274*. Plzeň, 2003. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Aleš Hamáček.
- [8] HÄNDSCHKE, Jürgen. *Leiterplattendesign: ein Handbuch nicht nur für Praktiker*. Bad Saulgau: Leuze, 2006. 257 s. ISBN 3-87480-219-1.