



# RADIOKOMUNIKAČNÍ TECHNIKA A ANTÉNY

## ANTÉNNÍ PRVKY – ZÁKLADNÍ PARAMETRY ANTÉN A JEJICH MĚŘENÍ

---

Tomáš Zálabský

University of Pardubice, Faculty of Electrical Engineering and Informatics  
Czech Republic

Blok 4/5

CZVRT

# OBSAH BLOKU IV

- Základní pojmy z teorie antén
- Základní parametry antén – vyzařovací charakteristika, zisk, směrovost
- Šířka pásma antén
- Elementární dipól – vyzařování
- Skládání dipólů
- Monopól
- Měření vstupní impedance antény
- Měření anténních charakteristik ve vzdálené zóně
- Praktická část

# ZÁKLADNÍ POJMY Z TEORIE ANTÉN

- IEEE Standard Definition of Terms for Antenna (IEEE Std 145-1973)
  - Definuje anténu jako zařízení pro vyzařování nebo příjem radiových vln
- Anténa je hraničním prvkem radiokomunikačního řetězce.
- Parametry antén můžeme zhruba rozdělit do dvou základních skupin
  - Parametry popisující anténu z hlediska jejího vnějšího chování
  - Parametry, které lze naměřit přímo na anténě jako na části obvodu
- I. Kategorie - směrové vyzařovací charakteristiky, polarizační charakteristiky, směrovost
- II. Kategorie – impedanční vlastnosti
- Ve skutečnosti tato kategorizace není jednoznačná a jednotlivé parametry úzce souvisejí – např. směrová vyzařovací charakteristika s impedančním přizpůsobením.

# ZÁKLADNÍ POJMY Z TEORIE ANTÉN

- Vzhledem k tomu, že anténa je koncovým prvkem radiokomunikačního řetězce, ovlivňuje svými parametry zvláště podstatně kvalitu celého radiokomunikačního přenosu.
- Protože interaguje přímo s elektromagnetickou vlnou, je anténa citlivá na frekvenci, směr šíření a polarizaci vlny.
- Anténa představuje prvek s vlastnostmi filtru nejenom ve frekvenční oblasti, ale i v oblasti prostorových souřadnic směru příjmu a orientace vzhledem k příjmu různých polarizací.
- Proto je také řada postupů používaných v teorii filtrů aplikována i pro problematiku antén.
- Řada pojmů, které budou dále zavedeny je společná pro antény vysílací i přijímací.
  - Tyto společné vlastnosti jsou založeny na platnosti principů duality a reciprocity.
  - Veškeré časové děje jsou dále uvažovány jako harmonické.

# SMĚROVÁ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA

- Pojem směrová charakteristika používáme obecně pro přijímací antény.
- Pojem vyzařovací charakteristika je používám u vysílacích antén.
- Fakticky se jedná o stejnou veličinu popisující směrové vlastnosti antény.
- Anténou vyzářené elektromagnetické pole lze ve sférických souřadnicích vystihnout obecným vztahem:

$$E = C \cdot A e^{j\psi} \mathbf{a}_0 F(\varphi, \theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Kde:

- $C$  – obsahuje konstanty prostředí
- $A e^{j\psi} \mathbf{a}_0$  – je funkce buzení – vektorový charakter udává např. směr tekoucího proudu
- $F(\varphi, \theta)$  – je vyzařovací charakteristika
- $\frac{e^{-jkr}}{r}$  – je závislost amplitudy a fáze pole na vzdálenosti

# SMĚROVÁ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA

- Pojem směrová charakteristika používáme obecně pro přijímací antény.
- Pojem vyzařovací charakteristika je používám u vysílacích antén.
- Fakticky se jedná o stejnou veličinu popisující směrové vlastnosti antény.
- Anténou vyzářené elektromagnetické pole lze ve sférických souřadnicích vystihnout obecným vztahem:

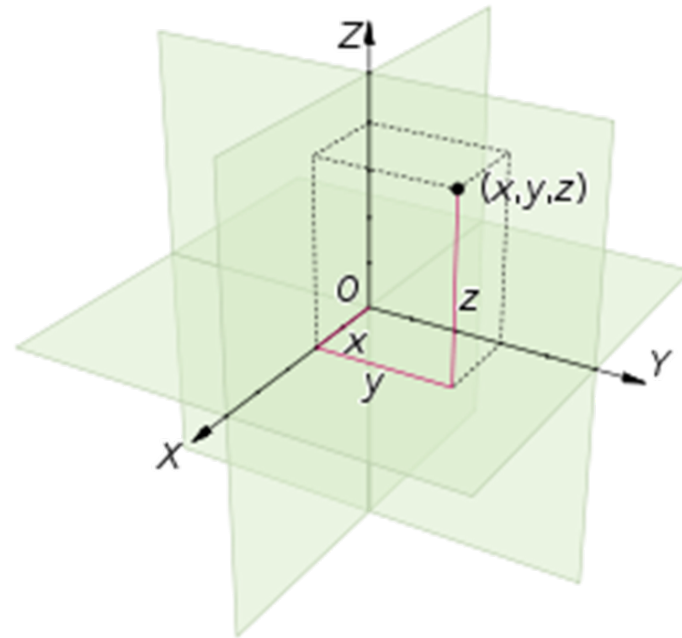
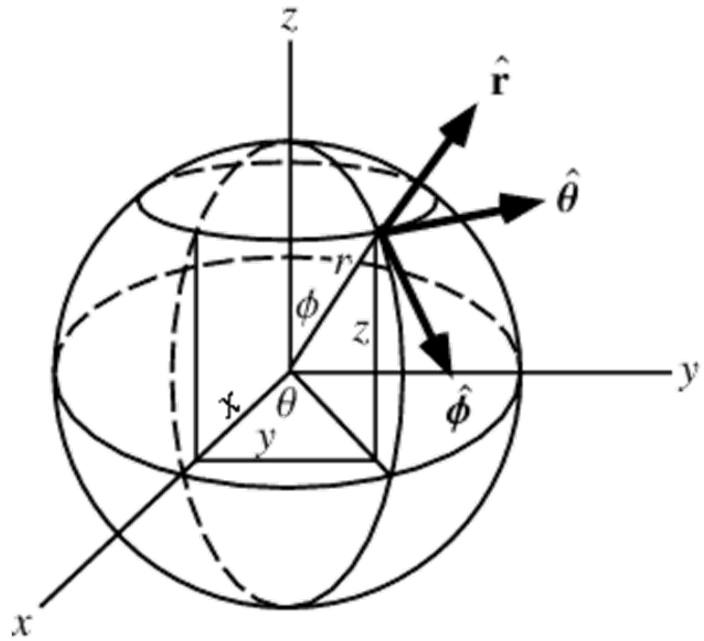
$$E = C \cdot A e^{j\psi} \mathbf{a}_0 F(\varphi, \theta) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

Kde:

- $C$  – obsahuje konstanty prostředí
- $A e^{j\psi} \mathbf{a}_0$  – je funkce buzení – vektorový charakter udává např. směr tekoucího proudu
- $F(\varphi, \theta)$  – je vyzařovací charakteristika
- $\frac{e^{-jkr}}{r}$  – je závislost amplitudy a fáze pole na vzdálenosti

# SMĚROVÁ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA

- Polární vs. Kartézská souřadná soustava



$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$x = r \sin \theta \cos \varphi$$

$$\theta = \arccos \left( \frac{z}{r} \right)$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{y}{x} \right)$$

$$z = r \cos \theta$$

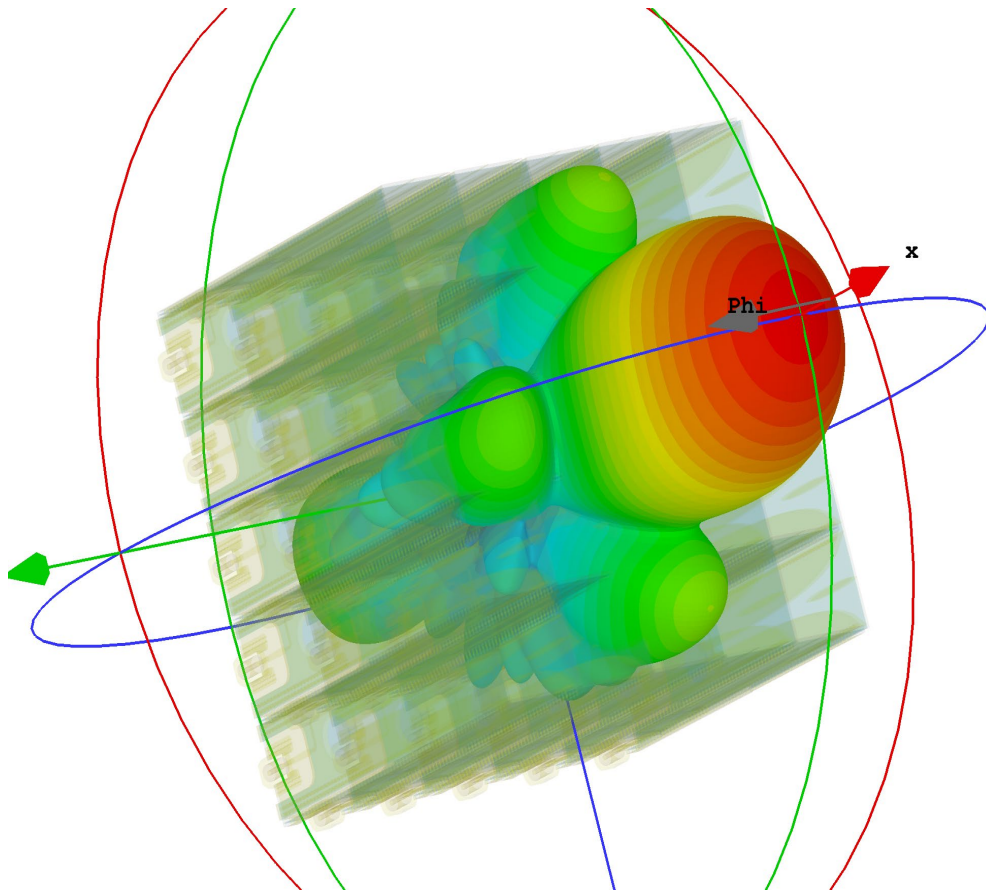
# SMĚROVÁ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA

- Obecná anténa se vyznačuje tím, že velikost jí vyslané (přijímané) elektromagnetické energie je různá v různých směrech.
- Směrová charakteristika antény je definována jako reprezentace směrových vlastností antény a na prostorových souřadnicích.
- Téměř vždy se určuje pro vzdálenou zónu – existují ovšem možnosti určení rozložení EM pole v blízké zóně a jejich transformace do vzdálené zóny.
- Směrové vlastnosti zahrnují komplexní intenzitu elektrického pole – amplitudu a fázi a polarizační vlastnosti.
- Pokud se takto zobrazuje přijímaný výkon, nazýváme tuto charakteristiku výkonovou směrovou charakteristikou – **Power Radiation Pattern** – označuje se  $|F(\phi, \theta)|^2$ .
- Jedná li se o charakteristiku zobrazující intenzitu pole, mluví se o směrové charakteristice, případně směrové napěťové charakteristice – **Field Pattern** – označuje se  $F(\phi, \theta)$ .
- Toto rozlišení má zásadní význam např. pro výpočet směrovosti) a je proto nezbytné vědět, jakou veličinu měříme – výkon nebo intenzitu.

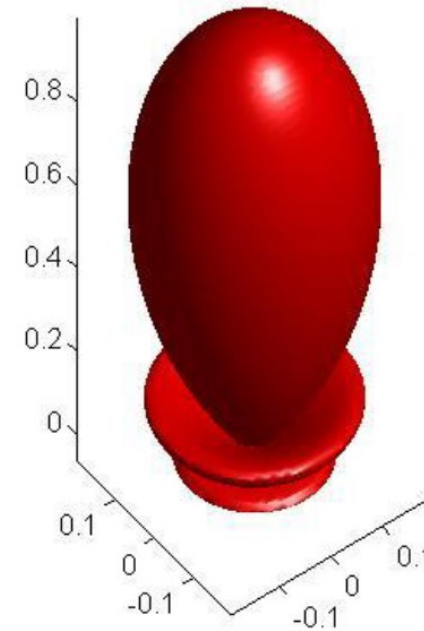


# SMĚROVÁ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA

- 3D výkonová směrová anténní charakteristika



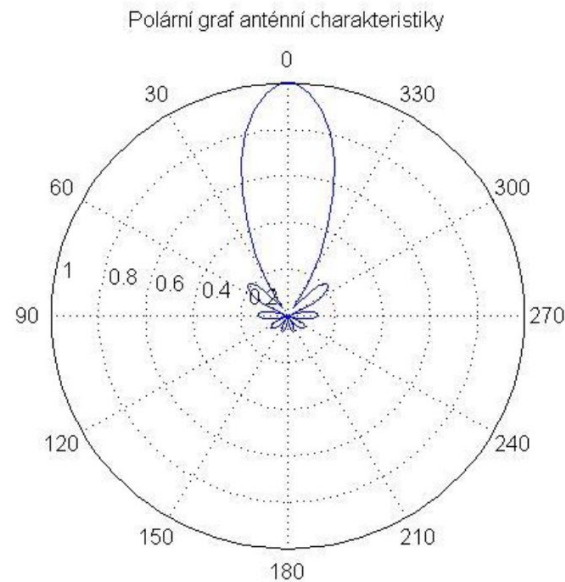
Vyzařovací anténní charakteristika  $|f(\Phi, \Theta)|^2$   
3D zobrazení



# SMĚROVÁ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA

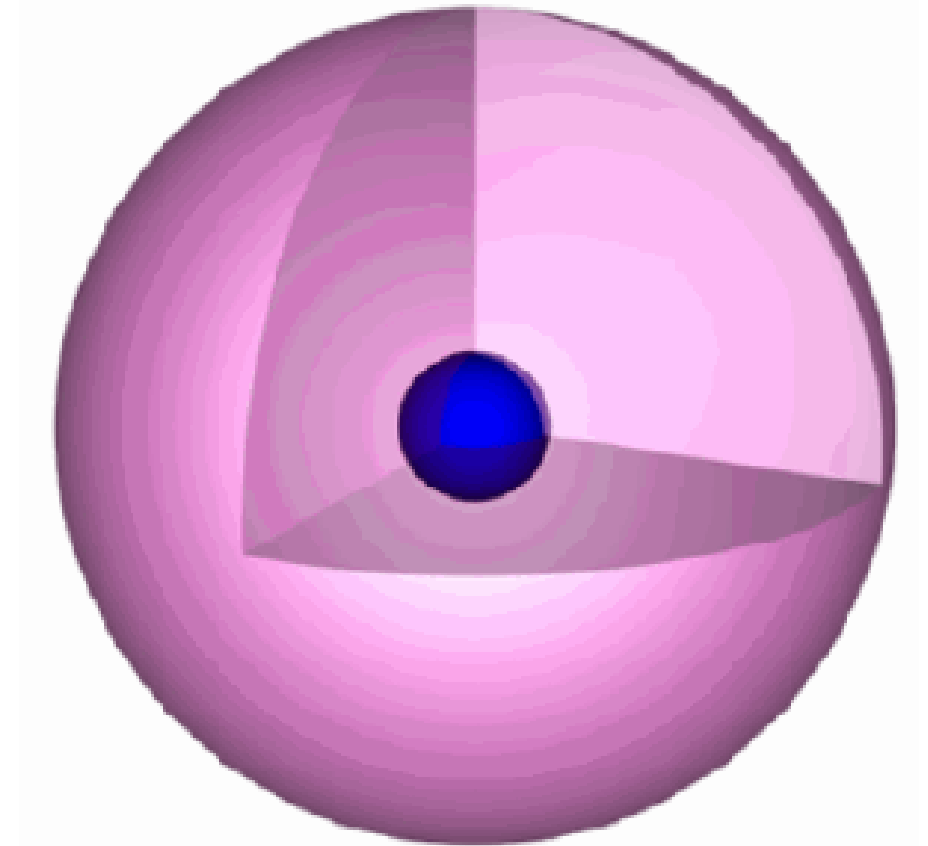
- V praktických aplikacích se používají řezy v hlavních rovinách (např. vertikální a horizontální) v závislosti pouze na jediné proměnné – jediném úhlu.
- Nejnázornější je zobrazení v polárních souřadnicích. Měřítko v radiálním směru se podle potřeb odečítání volí buď lineární nebo logaritmické (v dB)

## Vyzařovací anténní charakteristika $|f(\Phi, \Theta)|^2$ polární zobrazení



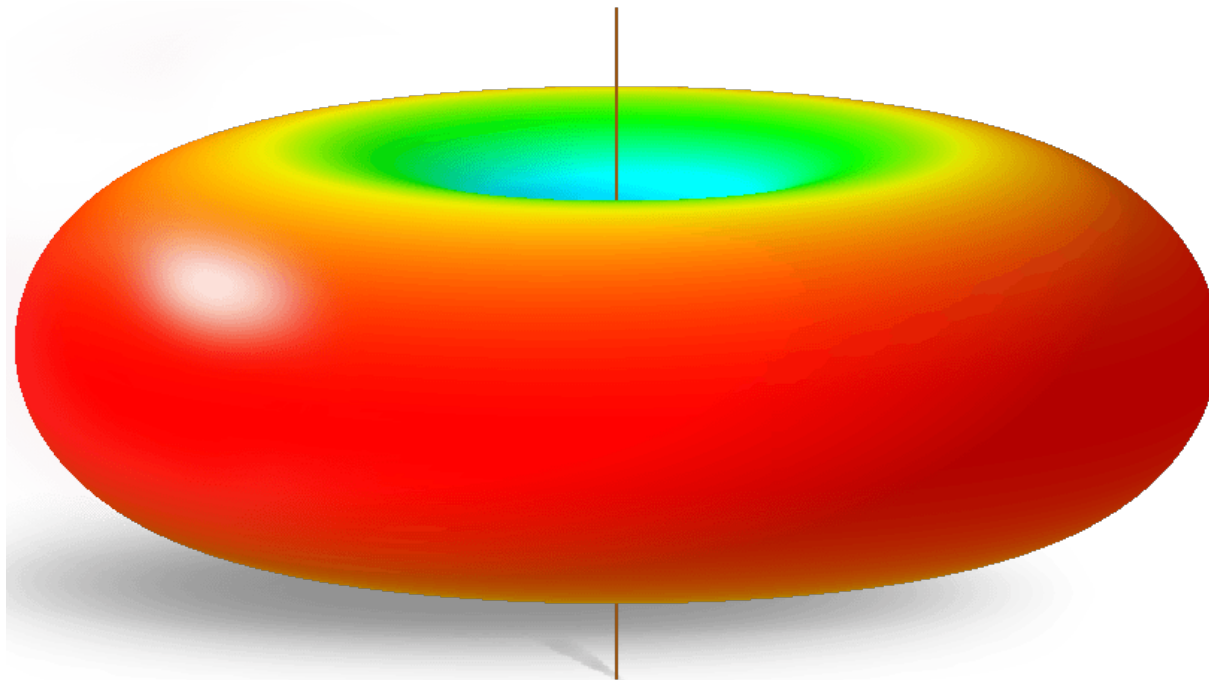
# IZOTROPICKÝ ZÁŘIČ

- Všesměrová izotropická (isotropic radiator) anténa je definována jako hypotetická anténa, jejíž vyzařovací charakteristika nezávisí na směru.
- Vzhledem ke komplexnosti pojmu není tato anténa fyzikálně realizovatelná.
- Pro řadu aplikací se však používá jako reference k popisu vlastností reálných antén.
- Směrovou charakteristikou izotropického zářiče je kulová plocha.



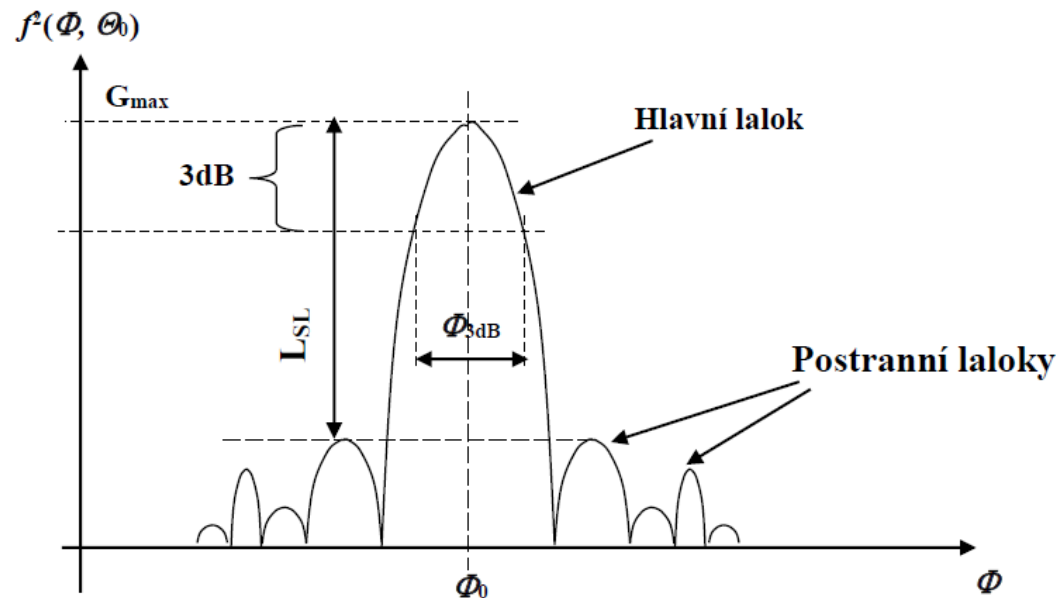
# SMĚROVÝ ZÁŘIČ – SMĚROVÁ ANTÉNA

- Směrová anténa - Directional antenna, má výše uvedené vlastnosti podstatně závislé na konkrétním směru, do kterého vysílá, nebo ze kterého přijímá EM energii.
- Zvláštním případem reálné směrové antény je tzv. Omnidirectional anténa, která má směrové vlastnosti jen v jedné souřadnici (rovině) a ve druhé má obecně všesměrové vlastnosti.
- Takovým případem je například dipól nebo elementární smyčka.



# PARAMETRY ODVOZENÉ Z VYZAŘOVACÍHO DIAGRAMU

- Hlavní svazek (maximum) Main Lobe – obsahuje maximum vyzařování a představuje většinou směr hlavního příjmu a tudíž maxima vyzařovacích rep. přijímacích vlastností
- Vedlejší svazky (maximum) Minor Lobes – jakékoli laloky mimo hlavní
- Postranní svazky (maxima) Side Lobes – první vedlejší, často jsou největší z vedlejších
- Zpětný svazek (maximum) Back Lobe – vedlejší svazek ve směru opačném než hlavní svazek



# PARAMETRY ODVOZENÉ Z VYZAŘOVACÍHO DIAGRAMU

- Úroveň vedlejších svazků (postranních svazků) se obvykle vyjadřuje v dB vzhledem k hlavnímu svazku.
- Pro vyhodnocení se zavádějí další pojmy:
  - Šířka svazku hlavního laloku pro pokles na polovinu výkonu HPBW – Half Power Beamwidth. Pro řez směrovou charakteristikou je to úhle mezi dvěma směry, ve kterých přijímaný výkon klesne na polovinu (-3 dB) vůči hlavnímu maximu. Někdy se udává šířka svazku též pro pokles výkonu o 10 dB.
  - Šířka svazku mezi prvními nulami. Pro některé aplikace je vhodné znát celý úhlový rozsah pro hlavní lalok FNBW – First Null Beamwidth
  - Odstup postranních laloků SLS (Side Lobe Suppression)– rozdíl mezi maximem hlavního laloku a maximem postranních (vedlejších laloků)
  - Úroveň postranních laloků SLL (Side Lobe Level) – Maximální úroveň postranních (vedlejších) laloků

# VÝKONOVÁ HUSTOTA VYZÁŘENÉHO POLE

- Okamžitá hodnota Poyntingova vektoru je definována vektrovým součinem:

$$s(t) = e \times h$$

Kde:  $s$  – okamžitá hodnota Poyntingova vektoru [W.m<sup>-2</sup>]  
 $e$  – okamžitá hodnota intenzity elektrického pole [V.m<sup>-1</sup>]  
 $h$  – okamžitá hodnota intenzity magnetického pole [A.m<sup>-1</sup>]

- Poyntingův vektor představuje výkonovou hustotu, celkový výkon antény získáme integrací Poyntingova vektoru přes obklopující plochu.
- Na tomto základě můžeme určit střední hodnotu výkonu vyzářenou anténou do prostoru přes plochu  $S$ :

$$P_{vyz} = \frac{1}{2} \oint Re[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] dS$$

# INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ

- Intenzita vyzářování  $U$  v daném směru je definována jako výkon vyzářený anténou do jednotkového prostorového úhlu.

$$U = r^2 P_{vyz}$$

Kde:  $U$  – intenzita vyzářování [ $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$ ]  
 $P_{vyz}$  – hustota vyzářeného výkonu [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]  
 $r$  – vzdálenost od zdroje (antény) [m]

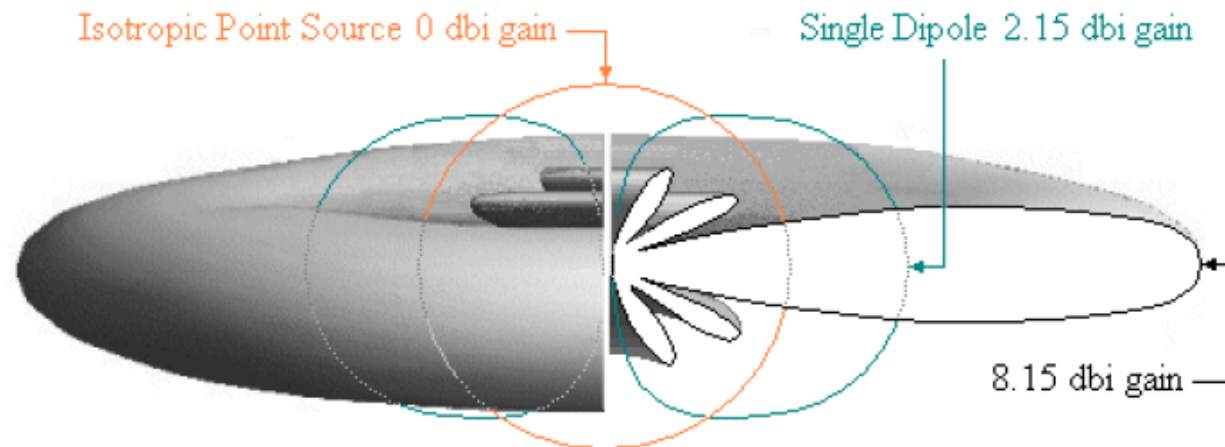
- Celkový vyzářený výkon pak získáme integrací intenzity vyzářování přes celý prostorový úhel  $4\pi$ .
- Intenzita vyzářování  $U_0$  pro izotropický zářič ze znalosti středního vyzářeného výkonu je:

$$U_0 = \frac{P_{vyz}}{4\pi}$$



# SMĚROVOST

- Směrovost – Directivity,  $D$  je poměr intenzity vyzařování  $U$  v daném směru k intenzitě vyzařování referenční antény  $U_0$ .
- Většinou je použit jako referenční anténa izotropický zářič.
- V některých případech se jako referenční zářič používá elementární dipól nebo půlvlnný dipól.
- V takových případech je vždy nezbytné údaje o směrovosti na tyto údaje přepočítat či vždy uvádět k jaké referenci je směrovost určována.
- Pro případ přepočtu směrovosti od všesměrového zářiče k elementárnímu dipólu je potřeba odečíst hodnotu 1,76 dB. V případě použití půlvlnného dipólu odečteme hodnotu 2,15 dB.



# SMĚROVOST

- Směrnost antény jako taková je funkcí prostorových souřadnic.
- Často se pod pojmem směrnost myslí směrnost ve směru hlavního maxima antény (maximální směrnost).
- V anglicky psané literatuře se směrnost v obecném směru označuje jako Directivity gain a ve směru hlavního maxima této směrnosti se mluví o směrnosti jako Directivity.

$$D(\varphi, \theta) = \frac{U(\varphi, \theta)}{U_0} = \frac{4\pi U(\varphi, \theta)}{P_{vyz}}$$
$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{vyz}}$$

- Z vyzářovací charakteristiky maximum směrnosti určíme následovně:

$$D_{max} = 4\pi \frac{F_{max}^2(\varphi_0, \theta_0)}{\iint_{00}^{2\pi \pi} F^2(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta d\varphi}$$

# SMĚROVOST

- Pro antény jedním dostatečně úzkým maximem vyzařování a se zanedbatelnými postranními laloky je možné použít následující vztah:

$$D_{max} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \cong \frac{4\pi}{\Phi_{3dBr} \Theta_{3dBr}}$$

Kde  $\Phi_{3dBr} \Theta_{3dBr}$  označují šířky svazku na polovinu výkonu v na sebe kolmých rovinách v radiánech.

- Pro hodnoty úhlů ve stupních je možné použít vztah:

$$D_{max} \cong \frac{41253}{\Phi_{3dB} \Theta_{3dB}}$$

- Pro rovinné anténní řady se používá přesnější aproximace:

$$D_{max} \cong \frac{32400}{\Phi_{3dB} \Theta_{3dB}}$$

- Tyto aproximativní vztahy vycházejí z předpokladu jediného hlavního laloku a zanedbatelných postranních laloků.

# VSTUPNÍ IMPEDANCE

- Vstupní impedance je definována jako impedance antény na jejich napájecích svorkách, tedy jako poměr napětí a proudu na těchto svorkách.
- Pro vstupní impedanci antény (vztaženou k místu napájení psát:

$$Z_A = R_A + jX_A$$

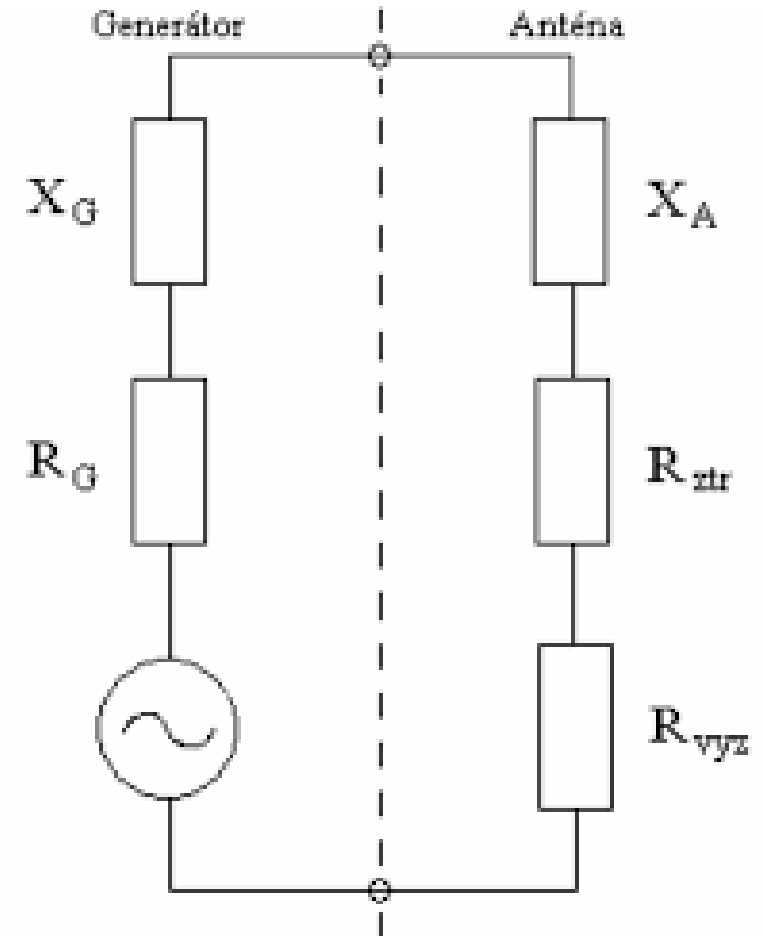
- Přičemž platí:

$$R_A = R_{vyz} + R_{ztr}$$

Kde:  $R_{vyz}$  – vyzařovací odpor antény  
 $R_{ztr}$  – ztrátový odpor antény

- Pro stav výkonového přizpůsobení musí platit:

$$R_{vyz} + R_{ztr} = R_G \quad X_A = -X_G$$



# ÚČINNOST ANTÉNY

- Celkový výkon vyzářený anténou  $P_{vyz}$  a výkon  $P_{vst}$  na vstupu bezeztrátové antény jsou svázány vztahem:

$$P_{vyz} = \eta P_{vst}$$

Kde:  $\eta$  – označuje bezrozměrnou celkovou účinnost antény (antenna efficiency)

- Tato celková účinnost v sobě zahrnuje ztráty na vstupu a uvnitř anténní struktury, což jsou:
- Ztráty odrazem výkonu  $\eta_r$  v důsledku nepřizpůsobení napájecího vedení a antény. Odraz charakterizujeme výkonovým činitelem odrazu  $R$  pomocí vztahu:

$$R = \left| \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \right|^2$$

Kde:  $Z_A$  – vstupní impedance antény  
 $Z_0$  – impedance napájecího vedení

- Ztráty v důsledku konečné vodivosti kovových částí antény  $\eta_c$ .
- Dielektrické ztráty v dielektriku  $\eta_d$ , které se nachází v objemu vyzařující anténní struktury.

# VÝKONOVÝ ZISK ANTÉNY

- Výkonový zisk antény – antenna power gain je dán poměrem vysílaného výkonu (výkon na výstupní ploše antény transformovaný do vzdálené zóny) k výkonu dodávanému na vstup antény.
- Zisk zahrnuje mimo směrové vlastnosti antény ještě její účinnost, která je závislá na ztrátách na anténě, odrazech atd.
- Zisk  $G$  je obecně svázán se směrovostí  $D$  vztahem:

$$G = \eta D$$

Kde:  $\eta$  – je celková účinnost antény

- Pro řadu aplikací u antén s jediným význačným vyzařovacím lalokem je výhodné použít aproximativní formule:

$$G_{max} = \frac{30000}{\Phi_{3dB} \Theta_{3dB}}$$

# VÝKONOVÝ ZISK ANTÉNY

- Častěji se používá relativní zisk, jako poměr výkonového zisku v daném směru k výkonovému zisku referenční bezztrátové antény v jejím „referenčním směru“.
- Většinou se jako referenční zářič uvažuje bezztrátová všesměrová anténa – izotropický zářič.
- Zisk antény je tedy pak poměr výkonu na vstupu bezztrátové referenční antény k výkonu, který musíme přivést do skutečné antény, aby produkovala v daném směru totéž pole (stejný výkonový tok).
- Není-li specifikováno jinak, rozumí se pod pojmem zisk jeho maximální hodnota a většinou se vyjadřuje v decibelové míře.
- Může být specifikována i pro danou polarizaci.

# VÝKONOVÝ ZISK ANTÉNY

- Vzhledem k možnosti použití i jiných referenčních antén, je možné v literatuře najít i další termíny související se ziskem:
  - Absolutní izotropický zisk – uvažuje jako referenci izotropický zářič
  - Relativní zisk k půlvlnnému dipólu ve volném prostoru
  - Relativní zisk ke krátké liniové anténě
- Na základě takto definovaných zisků se různými způsoby definují ekvivalentní vyzářené výkony:
  - EIRP – ekvivalentní izotropický vyzářený výkon – součin výkonu na anténě a jejího zisku k izotropickému zářiči
  - ERP – ekvivalentní vyzářený výkon (v daném směru) – součin výkonu na anténě a jejího zisku k půlvlnnému dipólu v daném směru
  - EMRP – ekvivalentní vyzářený výkon vztahovaný k elementárnímu dipólu (v daném směru) – součin výkonu na anténě a jejího zisku vztahovaný k elementárnímu dipólu (krátké anténě)



# EFEKTIVNÍ PLOCHA ANTÉNY

- Pro každou anténu je možné určit efektivní plochu.
- Maximální efektivní plocha (apertura) antény je definována jako poměr výkonu na přizpůsobené zátěži  $P_z$  k výkonové hustotě dopadající elektromagnetické vlny  $S_{dop}$ .
- Obecně není efektivní plocha rovna fyzikální ploše antény, ale záleží na rozložení vektoru intenzity pole elektromagnetické vlny.
- Ve stavu výkonového přizpůsobení je  $R_{vyz} + R_{ztr} = R_z$  a  $X_A = -X_z$  a maximální efektivní apertura je dána vztahem:

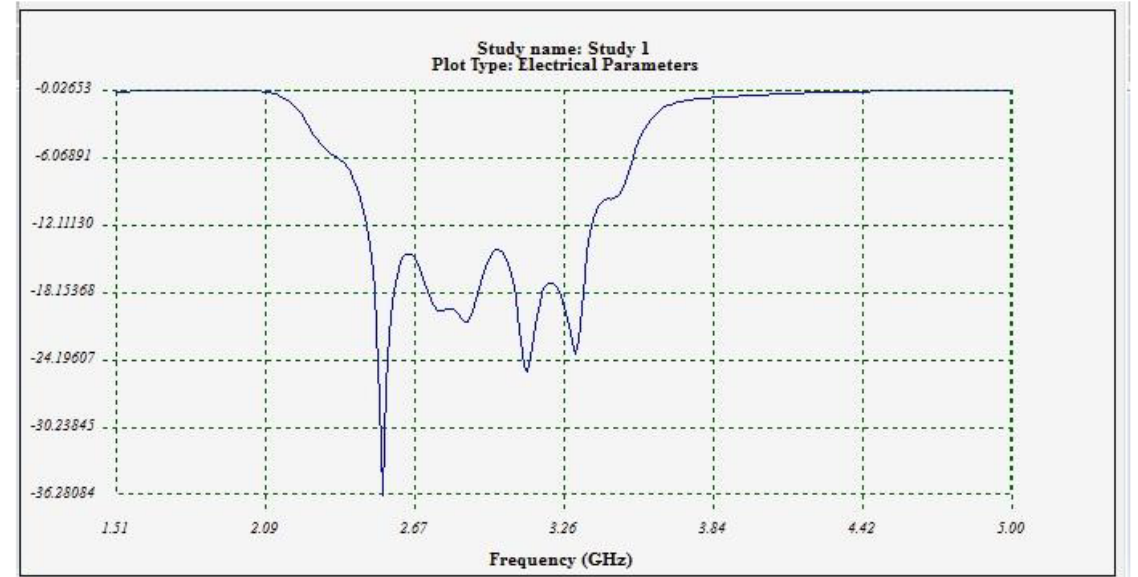
$$A_{ef\_max} = \frac{|U_z|^2}{8S_{dop}} \left[ \frac{R_z}{(R_{vyz} + R_{ztr})^2} \right]$$

- Maximální efektivní plocha libovolné antény je dána její maximální směrovostí.

$$A_{ef\_max} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_{max}$$

# ŠÍŘKA PÁSMA

- Základní charakteristiky antén (vstupní impedance, směrová-vyzařovací charakteristika, zisk, atd.) se mění různým způsobem v závislosti na frekvenci.
- Neexistuje jednotný předpis, který by definoval šířku pásma.
- Šířka pásma je rozsah frekvencí, uvnitř kterého se anténa chová vzhledem ke specifikované charakteristické veličině standardním způsobem.
- Obvykle se určuje přijatelnou změnou dané veličiny v závislosti na frekvenci vzhledem ke své hodnotě ve středu pásma, pro které byla anténa navržena.
- Například pro přizpůsobení na vstupu –  $S_{11}$ .

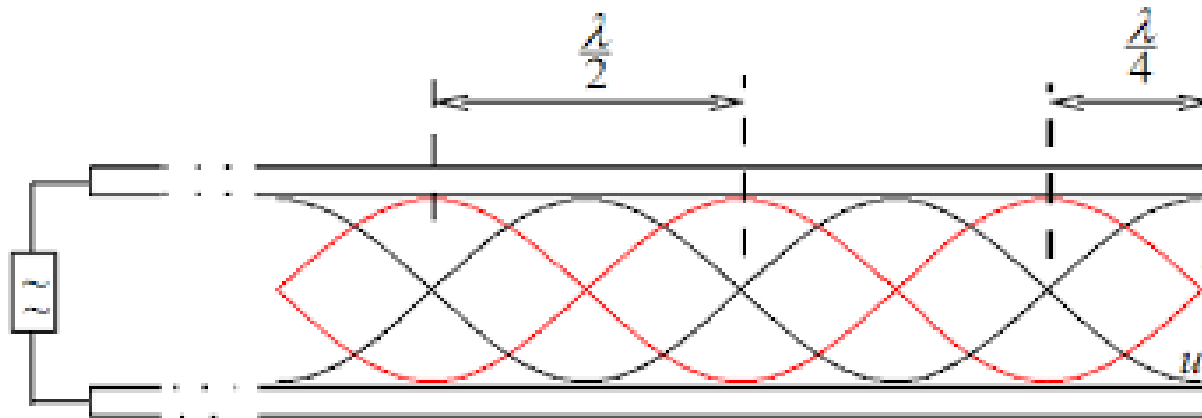


# ZÁŘENÍ

- Harmonicky proměnný zdroj napětí mezi dvěma symetricky tvarovanými rozlehlými deskami bude vytvářet elektrické a magnetické pole.
- Elektrické pole působí silou na volné elektrony ve vodičích.
- Zjednodušeně - pohyb těchto elektronů vyvolá proudy tekoucí vodiči a v prostoru se následně vytváří magnetické pole.
- Shluk siločár se pak v čase posunuje od zdroje a ve volném prostoru vytváří vyzařované pole, jehož charakter je určován vlastností vodivé struktury-antény.
- V analogii s vlnami na vodní hladině můžeme říct, elektrické náboje a jejich silové působení jsou nutné pro vybuzení pole, ale nejsou již nutné pro jeho udržení – vlna se dál samostatně šíří v prostoru.

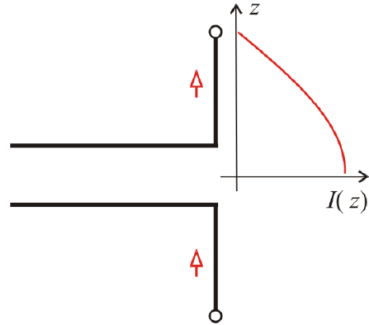
# ZÁŘENÍ DIPÓLU

- Anténu můžeme považovat za transformační prvek, který převádí elektromagnetickou vlnu šířící se podél vedení na vlnu volným prostorem.
- Vyděme z dvou vodičového vedení, které je na konci naprázdno (rozpojené).
- Protože má konec vedení značný odpor (relativně nekonečný), dosahuje napětí na konci vedení svého maxima, naopak proud zde má stále nulovou hodnotu (vedení je zde rozpojeno).
- Na nekonečné impedanci otevřeného konce se vlna odráží a vrací se zpět ke zdroji. Na vedení vzniká stojatá vlna proudu s uzlem na konci.
- V celém vedení tedy vzniká fázový rozdíl mezi napětím a proudem  $\pi/2$

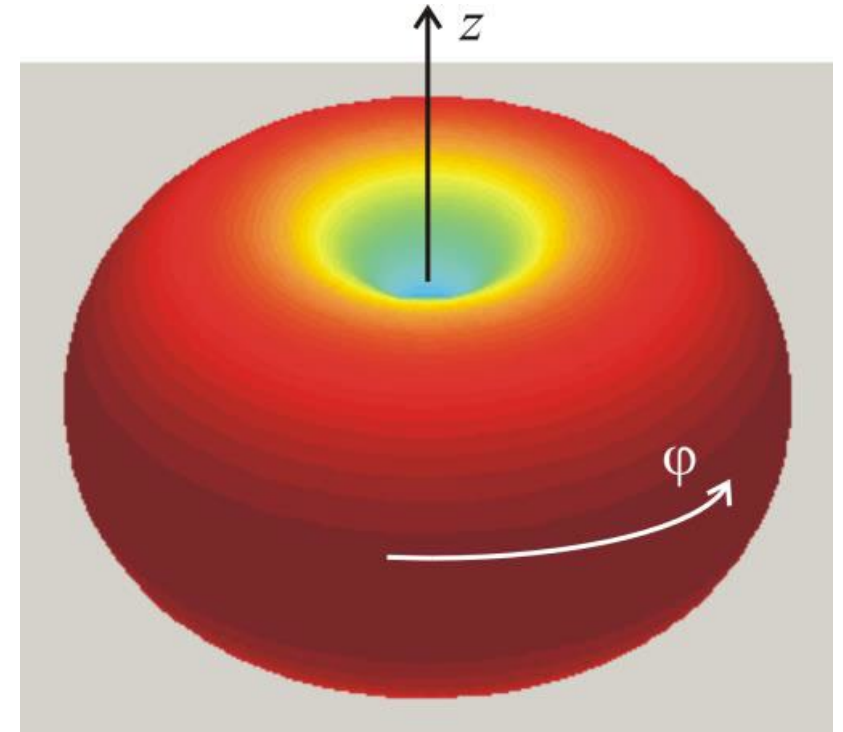


# ZÁŘENÍ DIPÓLU

- Pokud konce vedení otočíme o  $90^\circ$  vytvoříme z otevřeného vedení symetricky napájený dipól.



- Dipól z obrázku má ramena dlouhá čtvrtinu vlnové délky  $l = \lambda / 4$ .
- Celková délka dipólu je tedy rovna polovině délky vlny a dipól nazýváme dipólem půlvlnným.
- Oběma rameny dipólu protékají proudy se souhlasnou orientací.
- Na dipól se tedy můžeme dívat jako na úsek vodiče, kterým protéká proud.
- Kolem vodiče vzniká dle Ampérova zákona axiální magnetické pole.
- Vlna šířící se od dipólu v radiálním směru bude mít v dostatečné vzdálenosti elektrickou složku pole, která je kolmá jak na směr šíření, tak na složku magnetickou.



# ZÁŘENÍ DIPÓLU

- Vyzařování antény je určeno rozložením stojaté proudové vlny na anténním vodiči.
- Přibližný průběh rozložení proudu na dipólu můžeme odvodit z průběhu proudové stojaté vlny na vedení.
- Pro přibližný výpočet parametrů antén lze ztráty vyzařováním zanedbat, a pro rozložení proudu podél dipólu pak platit:

$$I(z) = I_m \sin[k(l - z)]$$

kde  $I_m$  je amplituda proudu v kmitně,  $k = 2\pi / \lambda$  je vlnové číslo, a  $l$  je délka ramene dipólu.

- Na konci dipólu  $z = l$  je proud nulový, na vstupu dipólu  $z = 0$  je proud roven  $I_{vst} = I_m \sin(kl)$ .

# ZÁŘENÍ DIPÓLU

- Funkce záření elementárního dipólu je:

$$F(\phi, \theta) = j \frac{k}{2} \sin \theta dz$$

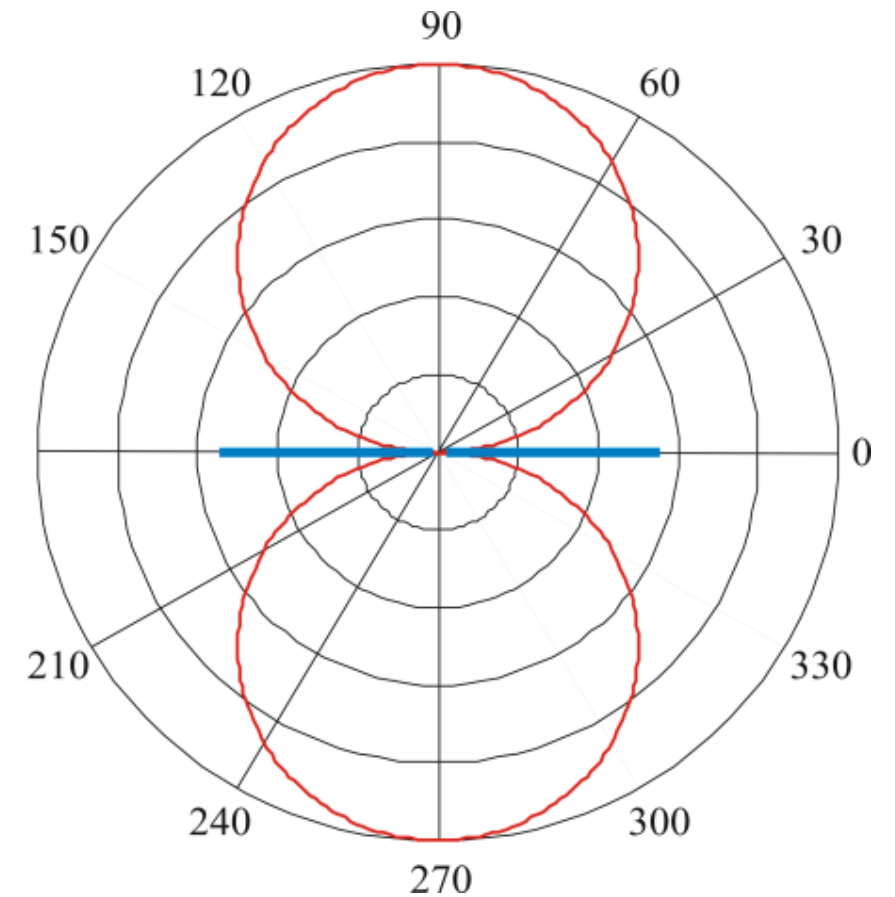
- Obecně je intenzitu elektrického pole antény:

$$E = 60IF(\phi, \theta) \frac{\exp(-jkr)}{r}$$

- Různé typy dipólů se pak liší různou funkcí  $F$ .

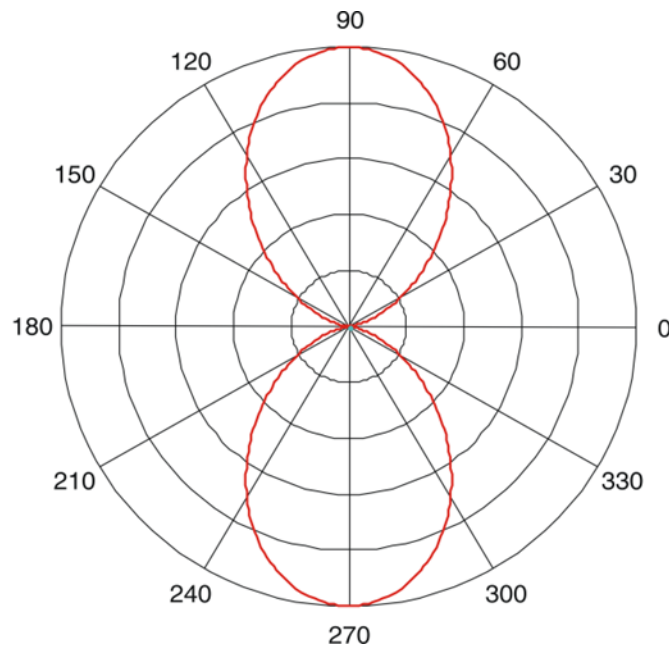
- Funkce záření popisuje směrové vlastnosti antény. V určitém směru  $(\phi, \theta)$  může funkce záření dosahovat maxima  $F_{max}$ .

- Poměr velikosti funkce záření v daném směru  $F(\phi, \theta)$  k maximu záření  $F_{max}$  vyjadřuje jen směrovou závislost vyzařování a nazývá se poměrnou (normovanou) funkcí záření. Pro elementární dipól je  $F/F_{max} = \sin \theta$ .

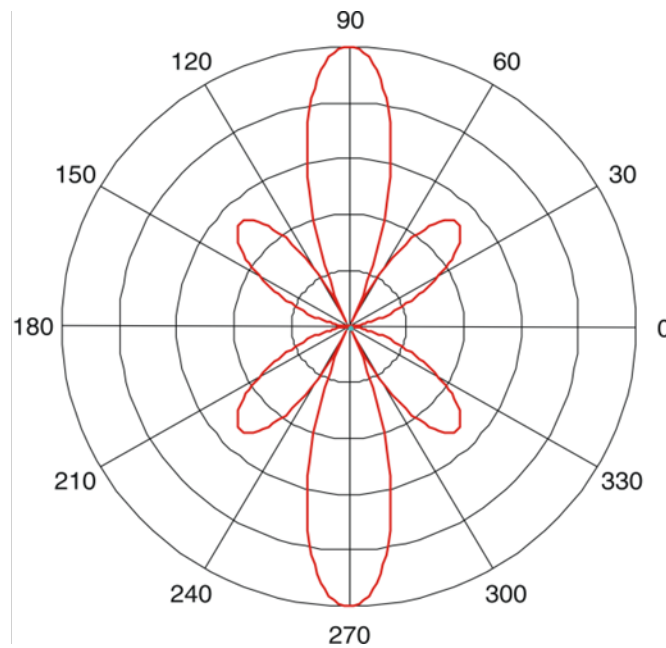


# ZÁŘENÍ DIPÓLU

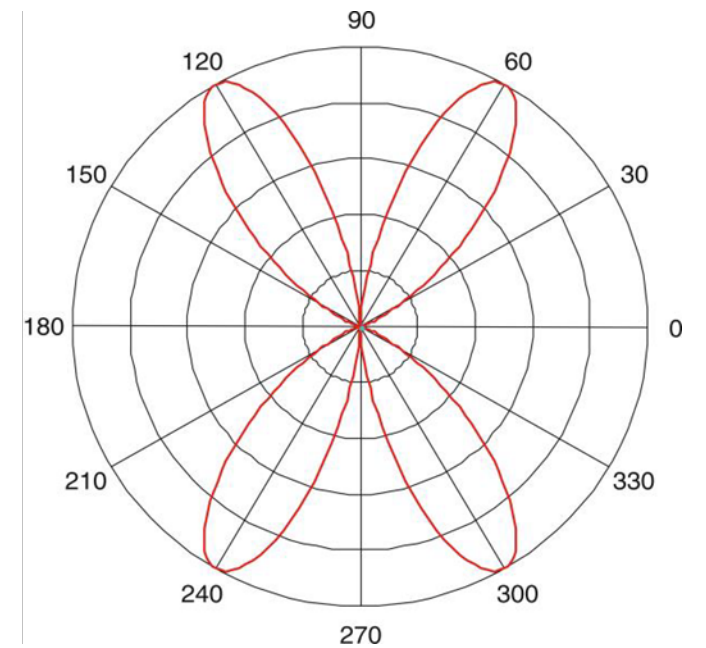
- Funkce záření  $F$  je závislá na  $kl = 2\pi l/\lambda$  a je tedy závislá na relativní délce ramene  $l/\lambda$ .
- Pro konkrétní poměr  $l/\lambda$  můžeme vyšetřit, v jakém směru  $\theta$  má funkce  $F$  maximum, zjistit jeho velikost, vypočítat poměrnou funkci  $F/F_{max}$  a nakreslit směrovou charakteristiku.



$$l/\lambda = 0,25$$



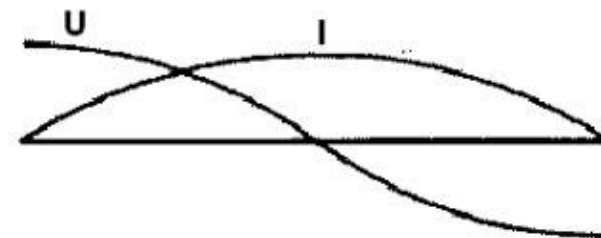
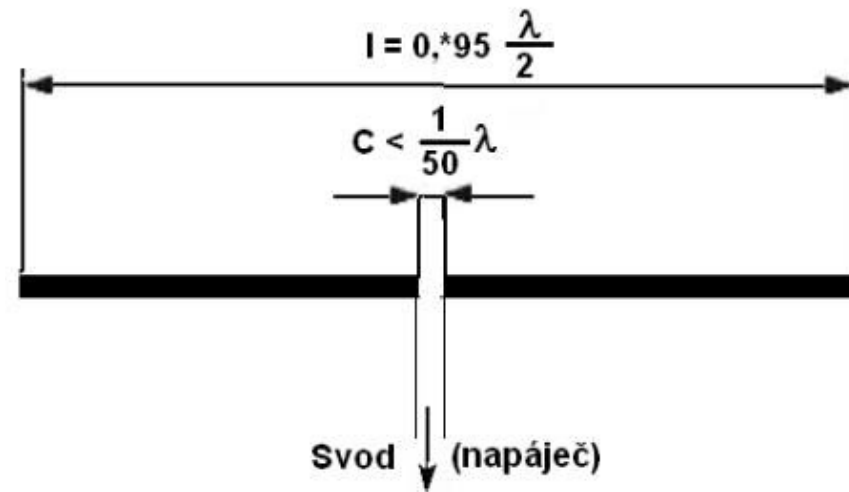
$$l/\lambda = 0,7$$



$$l/\lambda = 1$$

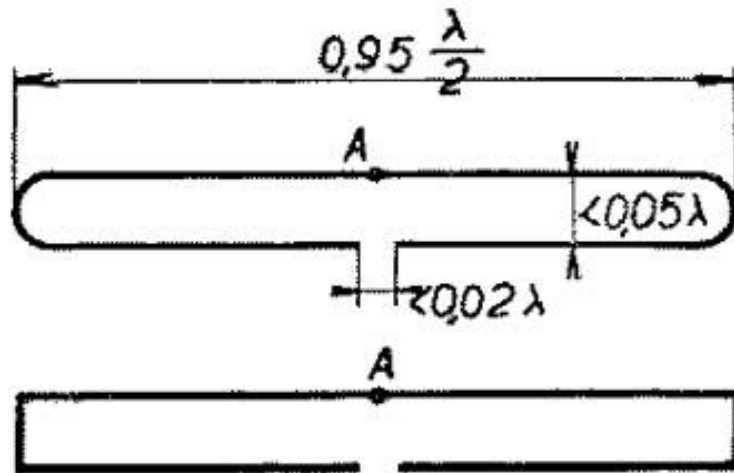


# PRAKTICKÁ REALIZACE



# SKLÁDANÝ DIPÓL

- Délka antény stejná jako u jednoduchého dipólu
- Impedance této antény je standardně čtyřikrát větší než u jednoduchého dipólu, t. j. 300 ohmů.
- Dá se provést s různou impedancí. Impedance se mění změnou tloušťky vodiče a jejich vzdálenosti
- K připevnění není zapotřebí izolačních pouzder či držáků. Anténa se uchyť v bodě A na stožár.
- V tomto bodě není žádné vf napětí a anténa může být vodivě spojena se zemí



# TYPY DIPÓLOVÝCH ANTÉN

- Jednoduchý dipól (a)
- Skládáný dipól (b)
- Jednoduchý dipól napájený odbočkou (c)
- Širokopásmový dipól (d)
- Zalomený dipól (e)
- Optimalizovaný dipól (f)



a)



b)



c)



d)



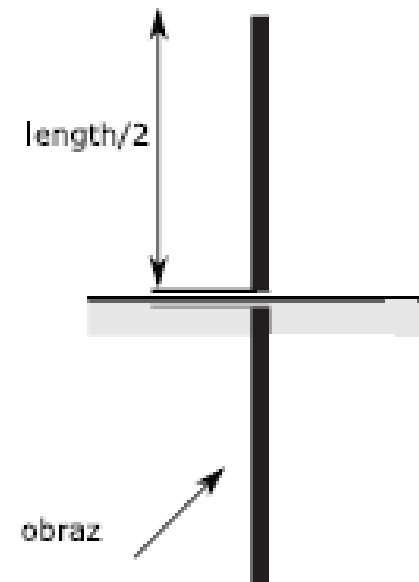
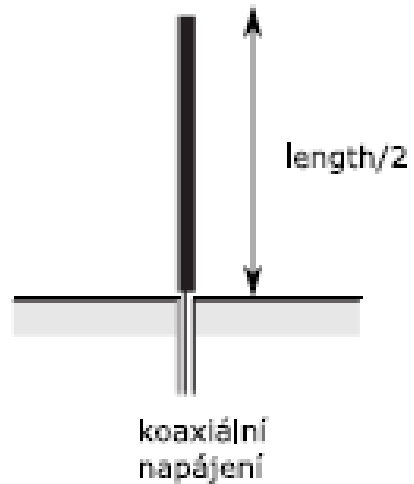
e)



f)

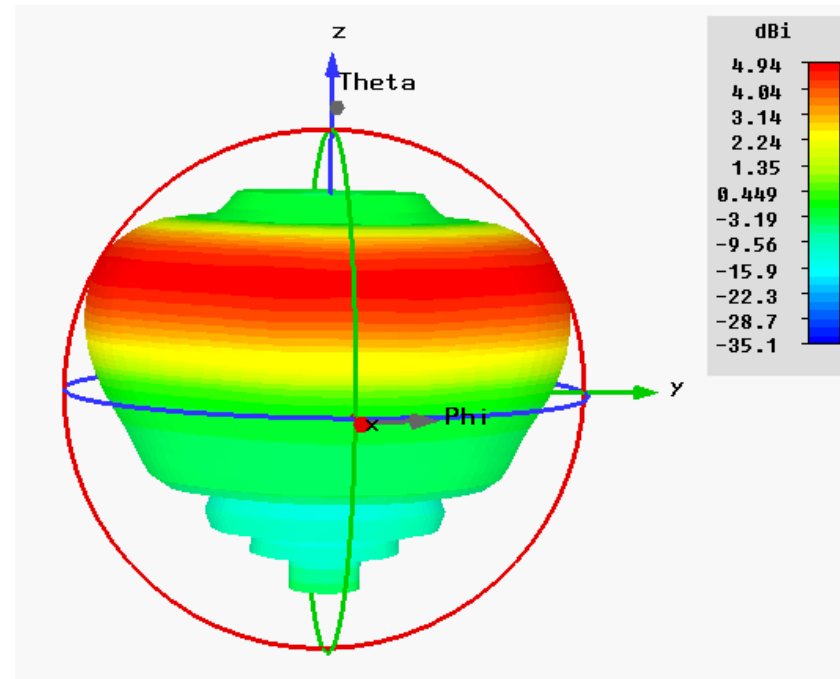
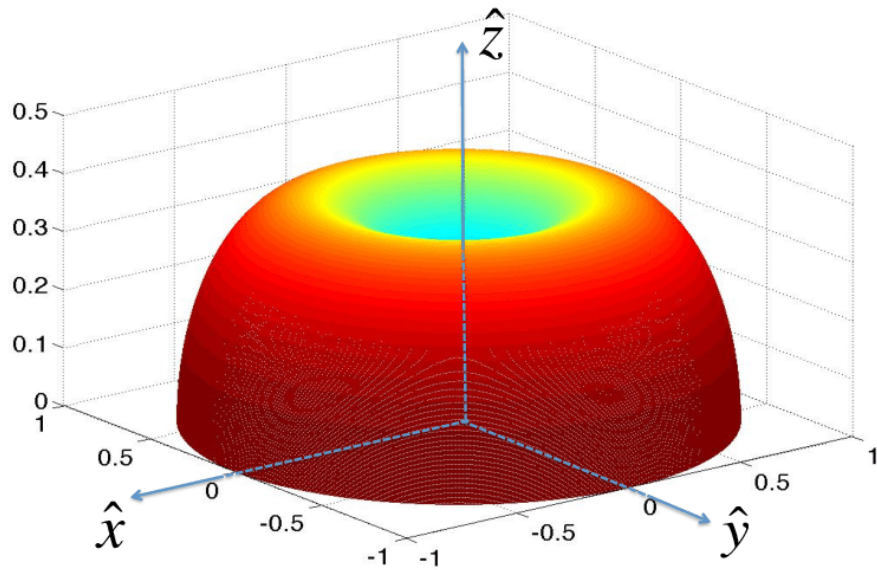
# MONOPÓL

- Monopól je poloviční dipól umístěný na zemní desce.
- Za předpokladu že je zemní kovová deska nekonečně dlouhá a dokonale vodivá, potom monopól odpovídá dipólu, jehož spodní část je obrazem horní části



# MONOPÓL

- Tvar vyzařování monopólu je stejný jako dipólu, s tím rozdílem, že z důvodu vyzařování pouze horní poloviny bude celkový vyzářený výkon roven polovině dipólu.
- Za jako vůbec nejčastěji používaný monopól se považuje čtvrtvlnný monopól s délkou jedné čtvrtiny vlnové délky



# CO LZE NA ANTÉNĚ MĚŘIT

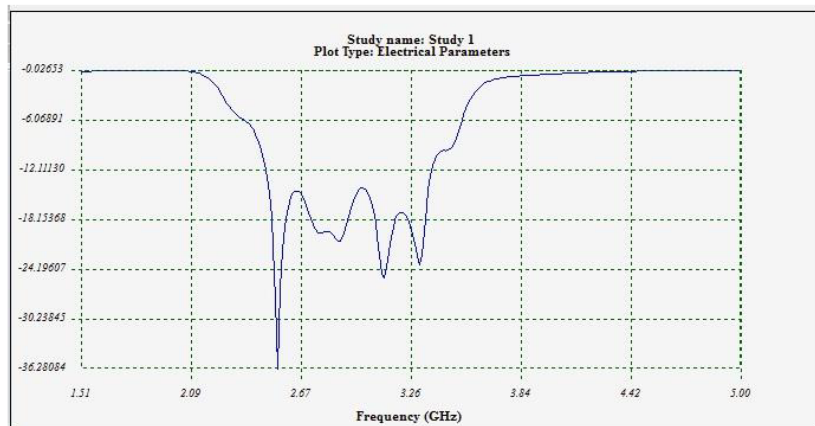
- Obvodové parametry
  - Impedance (impedanční přizpůsobení)
  - Vyzařovací odpor
  - Ztráty
- Vyzařovací parametry
  - 3D vyzařovací charakteristiky
  - šířka svazku
  - úroveň postranních laloků
  - Zisk

# MĚŘENÍ IMPEDANCE

- Impedance antény se měří s využitím vektorového obvodového analyzátoru
  - Měří se nepřímo, pomocí velikosti odraženého výkonu od vstupního portu antény
  - Měří se rozptylový parametr  $S_{11}$
  - PSV (Poměr stojatého vlnění)

$$PSV = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}$$

- Je nutné provádět kalibraci přístroje



# ANTÉNNÍ ZÓNY

- V blízké oblasti u antény se pole chová odchylně a není možné mluvit při konečných rozměrech anténní struktury o elektromagnetické vlně.
- Fázová rychlost, tedy rychlost pohybu siločar od zdroje může být v této oblasti větší než rychlost světla.
- S postupným vzdalováním od antény fázová rychlost klesá, až po skutečný „volný prostor“, kde dosáhne velikosti skupinové rychlosti, charakterizující skutečnou rychlost transportu energie.
- Proto se definují jednotlivé oblasti v okolí antény



# ANTÉNNÍ ZÓNY

- Blízká reaktanční oblast

- Je definována vnitřkem koule o poloměru (kdy anténa je v jejím středu):

$$R_1 = 0,62 \sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}$$

Kde:  $d$  – je největší rozměr antény

$\lambda$  – vlnová délka

- Poyntingův vektor má v této oblasti v periodě téměř nulovou střední hodnotu.

# ANTÉNNÍ ZÓNY

- Blízká zářivá oblast
  - Jedná se o oblast mezi reaktivní blízkou zónou a vzdálenou oblastí (zářivou oblastí) antény.
  - Kritérium vnějšího poloměru této oblasti je dáno maximální fázovou chybou  $\pi/8$  od rovinné vlny.
  - Vnější poloměr oblasti je pak dán vztahem:

$$R_2 = \frac{2d^2}{\lambda}$$

# ANTÉNNÍ ZÓNY

- Vzdálená oblast, vzdálená zóna antény
  - Je celá oblast vně koule o poloměru daném předešlou rovnicí.
  - Pro případ, že by  $\lambda > d$  se ke vztahu přidává vzdálenost  $\lambda$ .
  - Vnější poloměr oblasti je pak dán vztahem:

$$R_2 = \frac{2d^2}{\lambda} + \lambda$$

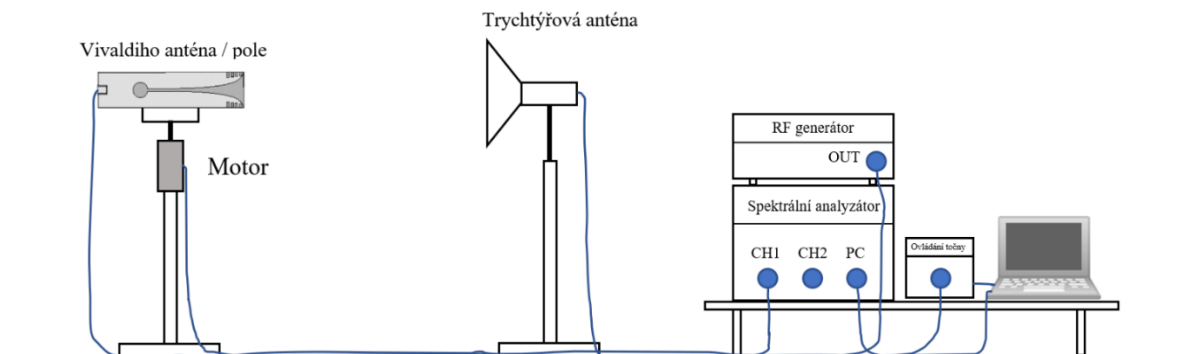
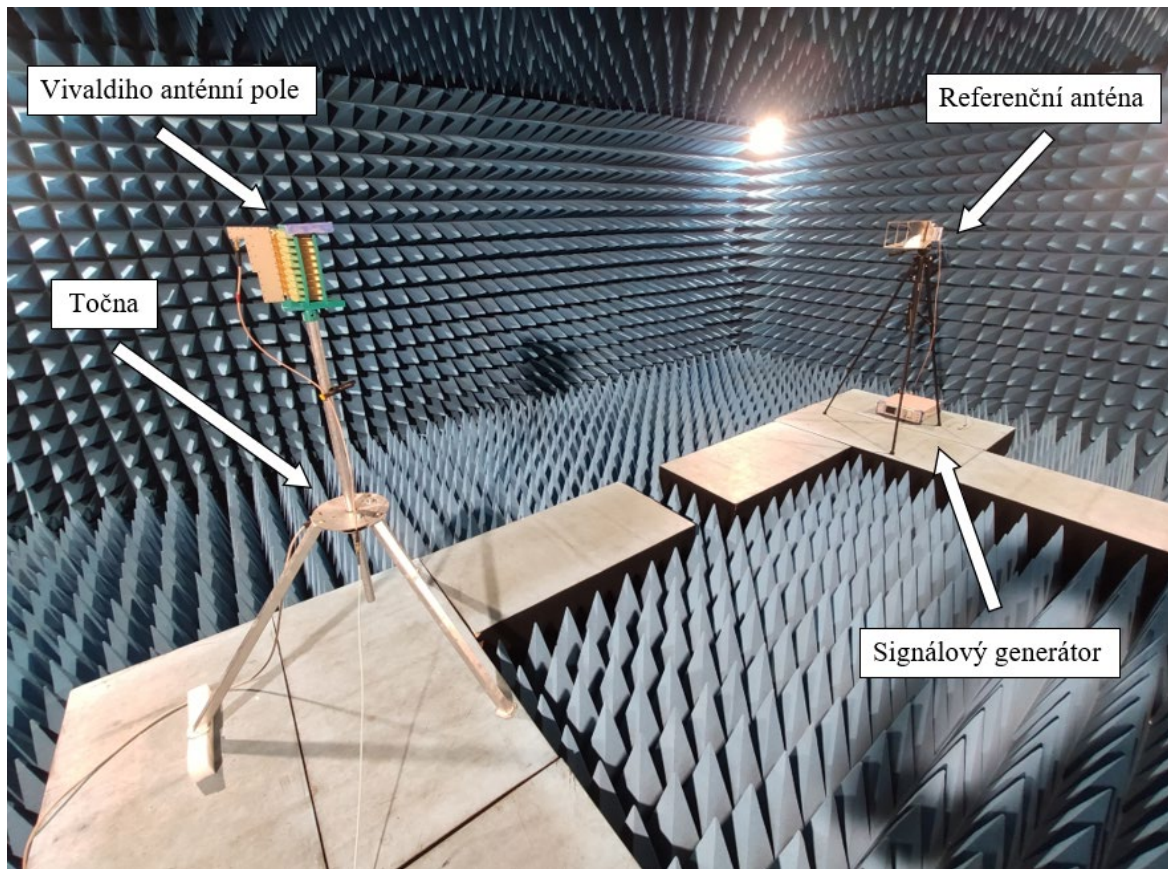
- Pole zde je již příčné – transverzální, tedy jeho složky jsou kolmé na směr šíření. Radiální složky pole jsou zanedbatelné

# ZÁKLADNÍ TYPY MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY

- ve volném prostoru
  - měření v reálných podmínkách s velkou vzdáleností měřené a měřicí antény s potlačením vlivů okolního prostředí
  - nad polovodivým zemským povrchem
  - v otevřeném prostoru
- v anténní komoře
  - nad vodivou rovinou
  - v bezodrazovém prostoru

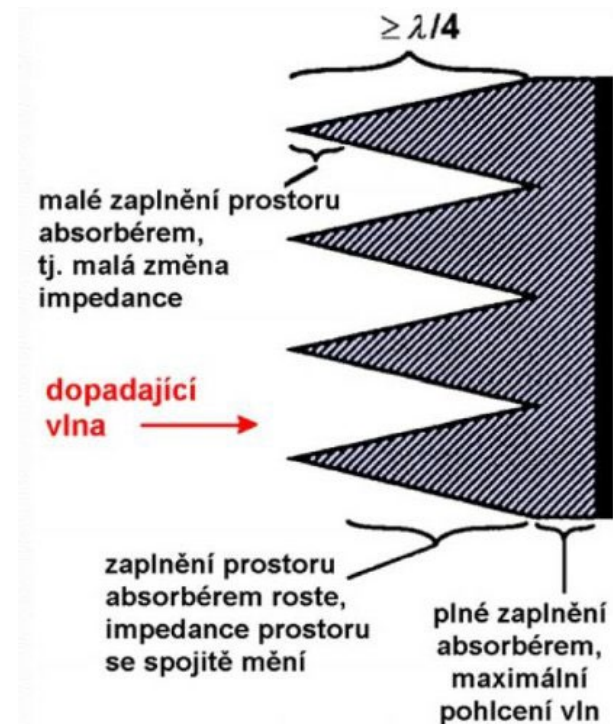
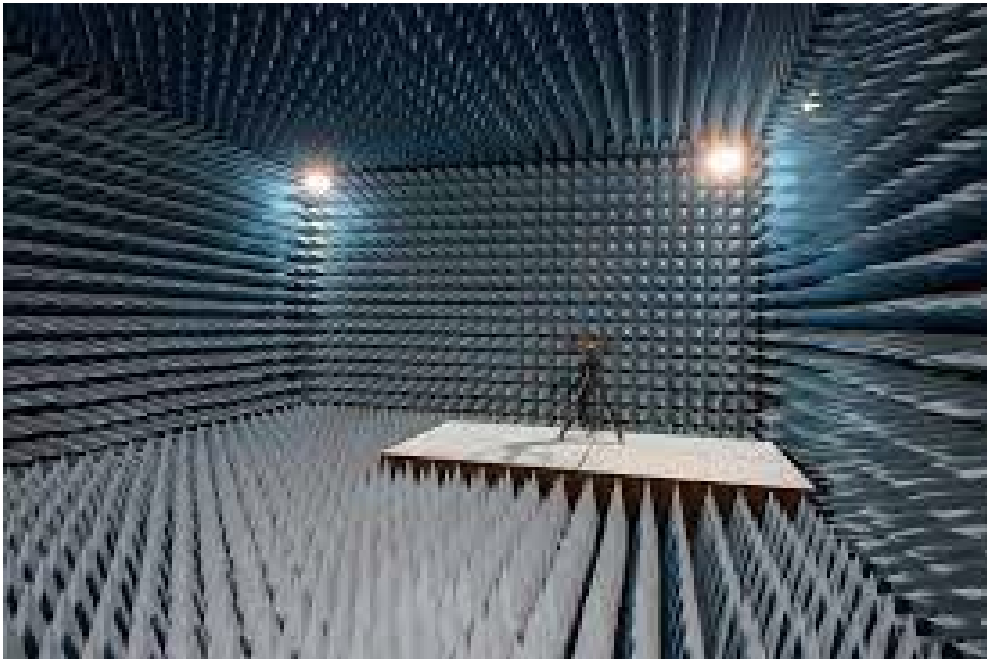
# MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍHO DIAGRAMU BEZODRAZOVÁ KOMORA

- Popis zapojení pracoviště



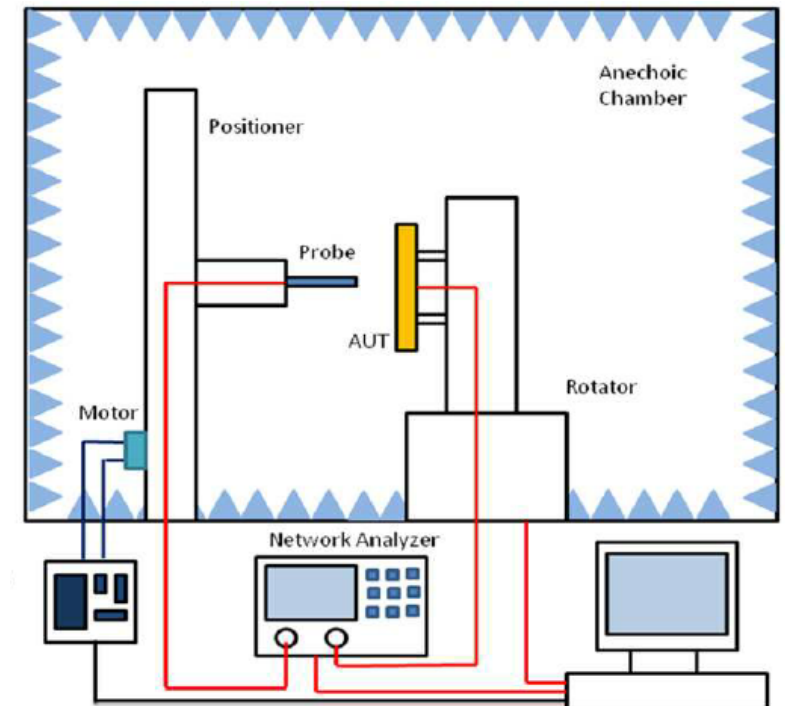
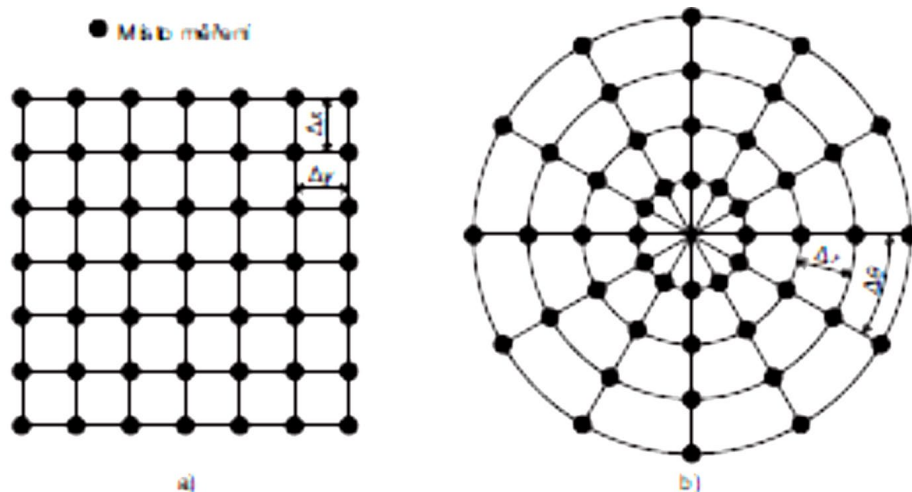
# MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍHO DIAGRAMU BEZODRAZOVÁ KOMORA

- Komory by měli splňovat podmínku nekonečně rozlehlého prostoru do všech směrů – využití absorpčních materiálů, které zabezpečují malý odraz dopadající vlny
- Zhotoveny s polyuretanu (molitan) či jiných pěnivých materiálů napuštěných vodivým materiálem
- Občas se využívají feritové absorbéry (80 – 550 MHz)



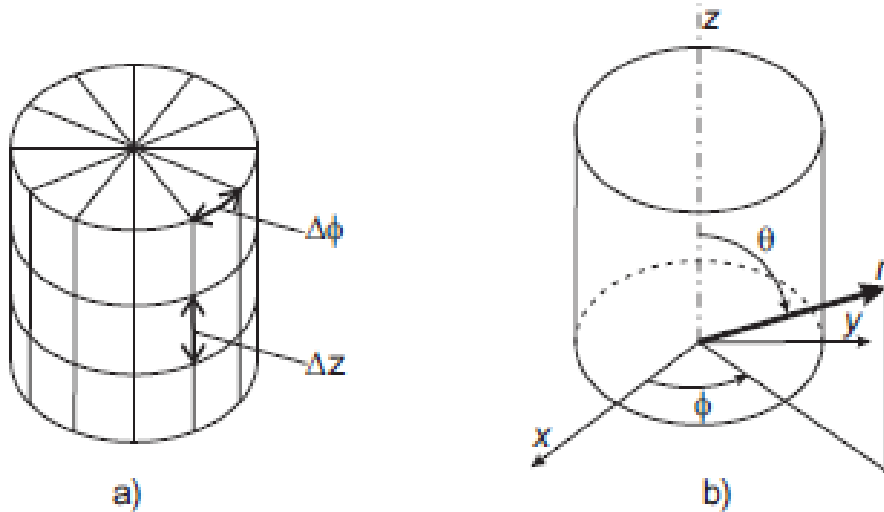
# MĚŘENÍ V BLÍZKÉ ZÓNĚ ANTÉNY – NA ROVINNÉ PLOŠE

- Je vhodné pro antény z velkým ziskem
- Mezi základní způsoby rozložení vzorků patří pravoúhlá, polární nebo bipolární mříž (Euklidova spirála)
- Nevýhodou pravoúhlé mříže je vysoká citlivost na chyby vzniklé nepřesným polohováním sondy a relativně složité polohovací zařízení.
- Maximální krok sondy v obou rovinách  $\lambda/2$
- Pro výpočet vyzařovacího diagramu se používají transformační vztahy



# MĚŘENÍ V BLÍZKÉ ZÓNĚ ANTÉNY – NA VÁLCOVÉ PLOŠE

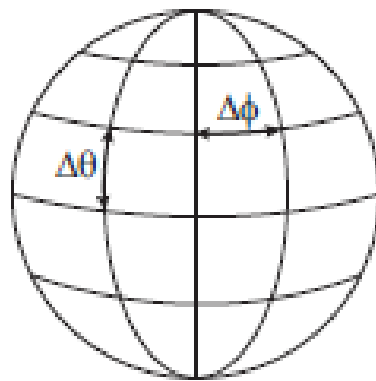
- Je vhodné pro málo směrové antény v horizontální rovině a směrové ve vertikální rovině.
- Zařízení pro snímání na válcové ploše se nejčastěji skládá z anténní točny, která měřenou anténou otáčí a sondou, která se pohybuje ve vertikálním směru.
- Pro výpočet vyzářovacího diagramu se používají transformační vztahy



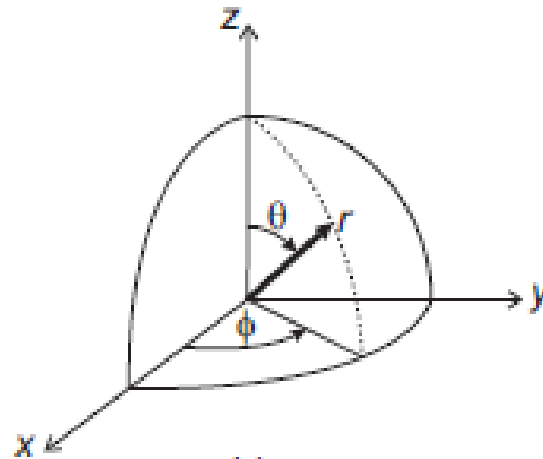


# MĚŘENÍ V BLÍZKÉ ZÓNĚ ANTÉNY – NA SFÉRICKÉ PLOŠE

- Je vhodné pro málo směrové antény
- Zařízení pro snímání na sférické ploše se může skládat pouze z otočného stolu a pohyblivé sondy
- Pro výpočet vyzářovacího diagramu se používají transformační vztahy

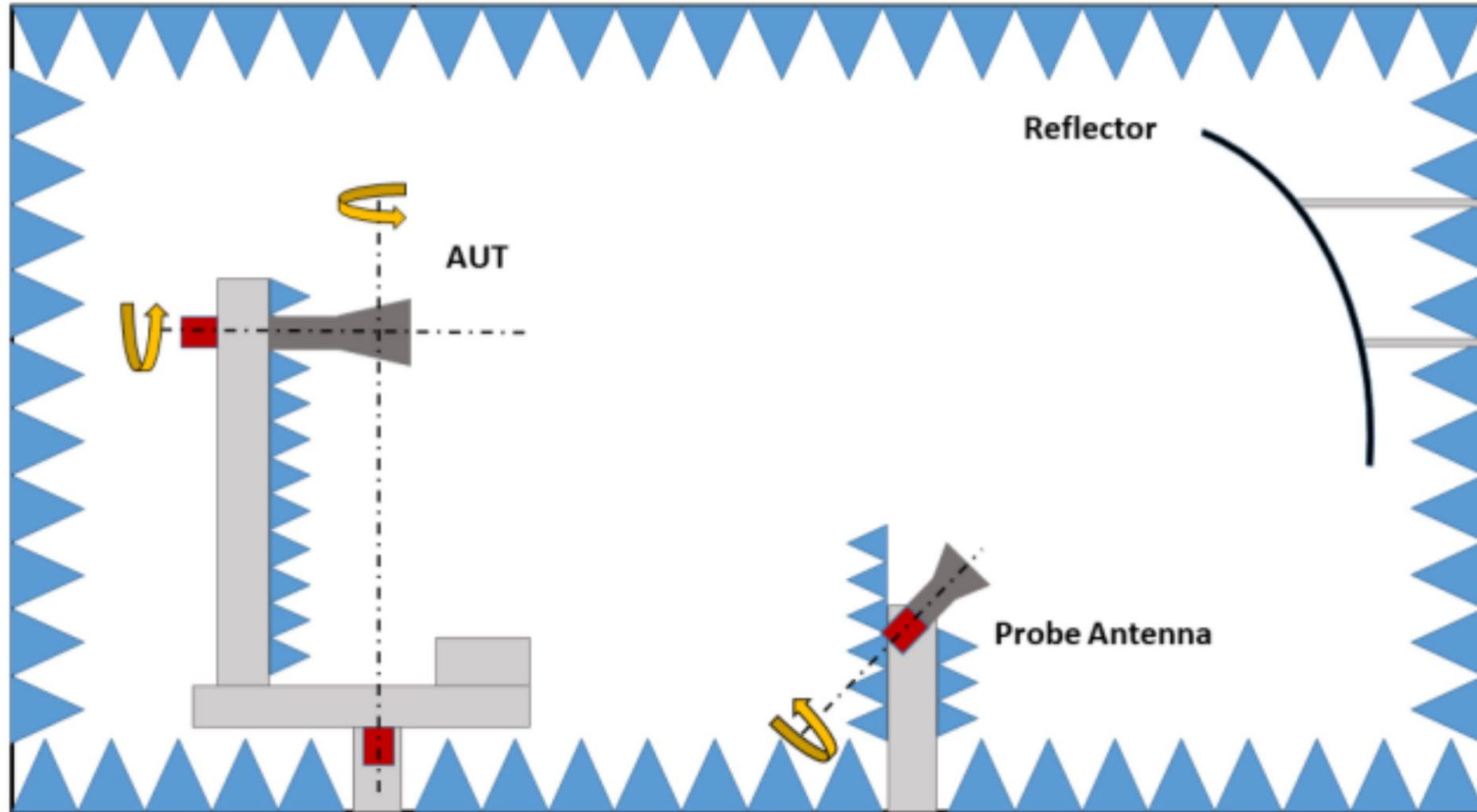


a)



b)

# MĚŘENÍ V KOMPAKTNÍ ANTÉNNÍ ZÓNĚ



# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO

- **Základní vlastnosti parametrického modelování v CST**
- **Cíl:** Seznámit se s prostředím CST a pochopit a aplikovat parametrické modelování v CST.
- **Postup:**
  - **Vytvoření parametrického modelu:**
    - Vytvořte nový projekt a zvolte typ simulace (např. elektromagnetická simulace).
    - Vytvořte základní geometrický model (např. kvádr) a definujte jeho rozměry jako parametry (délka, šířka, výška).
  - **Nastavení parametrů:**
    - Vytvořte parametry v sekci "Parameters" a přiřadte jim počáteční hodnoty.
    - Použijte tyto parametry při definování geometrie modelu.
  - **Simulace s parametry:**
    - Spusťte simulaci a analyzujte výsledky.
    - Změňte hodnoty parametrů a znovu spusťte simulaci, abyste viděli, jak změny ovlivňují výsledky.

# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO

- **Návrh jednoduchého dipólu a zobrazení jeho vyzařovacího diagramu**
- **Cíl:** Navrhnout jednoduchý dipól a zobrazit jeho vyzařovací diagram.
- **Postup:**
  - **Vytvoření modelu dipólu:**
    - Vytvořte nový projekt a zvolte typ simulace (anténní simulace).
    - Vytvořte model dipólu pomocí dvou tenkých vodičů (např. válců) umístěných kolmo na sebe.
  - **Nastavení parametrů dipólu:**
    - Definujte délku a průměr vodičů jako parametry.
    - Nastavte materiál vodičů (např. měď) a připojte zdroj signálu k dipólu.
  - **Simulace a zobrazení vyzařovacího diagramu:**
    - Spusťte simulaci a zobrazte vyzařovací diagram dipólu.
    - Analyzujte vyzařovací diagram v různých rovinách (např. horizontální a vertikální).

# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO

- **Ukázka vyhodnocení šířky svazku, směrovosti a zisku v prostředí CST**
- **Cíl:** Vyhodnotit šířku svazku, směrovost a zisk antény v prostředí CST.
- **Postup:**
  - **Nastavení simulace:**
    - Použijte model dipólu z předchozí části.
    - Nastavte simulaci tak, aby zahrnovala výpočet vyzařovacího diagramu a dalších parametrů antény.
  - **Vyhodnocení šířky svazku:**
    - Změřte šířku svazku na úrovni -3 dB od maximální hodnoty vyzařování.
    - Zaznamenejte hodnoty a porovnejte je s teoretickými předpoklady.
  - **Vyhodnocení směrovosti:**
    - Určete směrovost v programu CST a porovnejte ji s teoretickými předpoklady
  - **Vyhodnocení zisku:**
    - Určete zisk v programu CST a porovnejte jej se směrovostí a diskutujte důvody proč je zisk nižší než směrovost

# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO – NÁVRH DIPÓLU

- **Nakreslení parametrického modelu dipólu v CST LE**
- **Cíl:** Naučit se vytvořit parametrický model dipólu v CST Studio Suite Learning Edition (CST LE).
- **Postup:**
  - **Vytvoření nového projektu:**
    - Spusťte CST LE a vytvořte nový projekt.
    - Zvolte typ simulace (např. elektromagnetická simulace).
  - **Vytvoření geometrie dipólu:**
    - Vytvořte dva válce, které budou představovat ramena dipólu.
    - Nastavte délku a průměr válců jako parametry
  - **Definování parametrů:**
    - V sekci "Parameters" vytvořte nové parametry pro délku a průměr ramen dipólu.
    - Přiřaďte tyto parametry k rozměrům válců.
  - **Nastavení materiálů:**
    - Nastavte materiál válců na vodivý materiál (např. měď).
  - **Napájení dipólu:**
    - Přidejte zdroj signálu na střed dipólu, kde se ramena setkávají.
    - Nastavte parametry zdroje, jako je frekvence a amplituda.
  - **Simulace:**
    - Spusťte simulaci a analyzujte výsledky.

# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO – NÁVRH DIPÓLU

- **Analýza vlivu délky jednotlivých ramen na vyzařovací diagram**
- **Cíl:** Analyzovat, jak změna délky ramen dipólu ovlivňuje jeho vyzařovací diagram.
- **Postup:**
  - **Nastavení parametrů délky:**
    - Vytvořte několik variant modelu dipólu s různými délkami ramen (např.  $0.25\lambda$ ,  $0.5\lambda$ ,  $1\lambda$ ).
  - **Simulace pro různé délky:**
    - Pro každou variantu spusťte simulaci a zaznamenejte vyzařovací diagram.
  - **Analýza výsledků:**
    - Porovnejte vyzařovací diagramy pro různé délky ramen.
    - Identifikujte, jak změna délky ovlivňuje směrovost a šířku svazku.

# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO – NÁVRH DIPÓLU

- **Analýza vlivu tloušťky ramen dipólu na vyzařovací diagram a využitelnou šířku frekvenčního pásma dipólu**
- **Cíl:** Analyzovat, jak změna tloušťky ramen dipólu ovlivňuje jeho vyzařovací diagram a šířku frekvenčního pásma.
- **Postup:**
  - **Nastavení parametrů tloušťky:**
    - Vytvořte několik variant modelu dipólu s různými tloušťkami ramen (např. různé průměry válců).
  - **Simulace pro různé tloušťky:**
    - Pro každou variantu spusťte simulaci a zaznamenejte vyzařovací diagram a frekvenční odezvu.
  - **Analýza výsledků:**
    - Porovnejte vyzařovací diagramy a frekvenční odezvy pro různé tloušťky ramen.
    - Identifikujte, jak změna tloušťky ovlivňuje směrovost, šířku svazku a šířku frekvenčního pásma.



# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO – NÁVRH DIPÓLU

- **Analýza polohy napájení na tvar vyzařovacího diagramu**
- **Cíl:** Analyzovat, jak změna polohy napájení dipólu ovlivňuje jeho vyzařovací diagram.
- **Postup:**
  - **Nastavení různých poloh napájení:**
    - Vytvořte několik variant modelu dipólu s různými polohami napájení (např. střed, čtvrtina délky ramene).
  - **Simulace pro různé polohy napájení:**
    - Pro každou variantu spusťte simulaci a zaznamenejte vyzařovací diagram.
  - **Analýza výsledků:**
    - Porovnejte vyzařovací diagramy pro různé polohy napájení.
    - Identifikujte, jak změna polohy napájení ovlivňuje tvar a směrovost vyzařovacího diagramu.

# PRAKTICKÁ ČÁST – PRÁCE V SW CST MW STUDIO – NÁVRH DIPÓLU

- **Návrh monopólu v CST a porovnání vyzařovacího diagramu s dipólem**
- **Cíl:** Navrhnout monopól a porovnat jeho vyzařovací diagram s dipólem.
- **Postup:**
  - **Vytvoření modelu monopólu:**
    - Vytvořte nový projekt v CST a zvolte typ simulace (např. anténní simulace).
    - Vytvořte model monopólu pomocí jednoho válce umístěného vertikálně na vodivé ploše (zemní rovině).
  - **Nastavení parametrů monopólu:**
    - Definujte délku a průměr monopólu jako parametry.
    - Nastavte materiál monopólu (např. měď) a připojte zdroj signálu k základně monopólu.
  - **Simulace monopólu:**
    - Spusťte simulaci a zaznamenejte vyzařovací diagram monopólu.
  - **Porovnání s dipólem:**
    - Porovnejte vyzařovací diagram monopólu s vyzařovacím diagramem dipólu.
    - Analyzujte rozdíly v tvaru, směrovosti a šířce svazku mezi monopólem a dipólem.

# PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY ANTÉN

- **Laboratorní úloha: Měření vyzářovací charakteristiky antény ve vzdálené zóně v bezodrazové komoře**
- Cílem této laboratorní úlohy je měřit vyzářovací charakteristiku antény ve vzdálené zóně (far-field) v bezodrazové komoře. Měření bude prováděno v horizontálním a vertikálním řezu vyzářovací charakteristikou.
- **Potřebné vybavení**
  - Bezodrazová komora
  - Testovaná anténa
  - Referenční anténa
  - Pozicionér (anténní točna)
  - Vysílač signálu (generátor signálu)
  - Přijímač signálu (spektrální analyzátor)
  - Koaxiální kabely a konektory
  - Počítač s ovládacím softwarem pro anténní točnu a měřicí přístroje

# PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY ANTÉN

- **Laboratorní úloha: Měření vyzářovací charakteristiky antény ve vzdálené zóně v bezodrazové komoře**
- **Postup**
- **Příprava zařízení:**
  - Umístěte testovanou anténu na otočný stůl v bezodrazové komoře.
  - Umístěte referenční anténu ve vzdálené zóně od testované antény. Vzdálenost by měla být dostatečně velká, aby splňovala podmínky pro měření ve vzdálené zóně
- **Nastavení měřicího systému:**
  - Připojte generátor signálu k referenční anténě.
  - Připojte přijímač signálu k druhé referenční (testované anténě).
  - Ujistěte se, že všechny kabely a konektory jsou správně připojeny a že systém je kalibrován.
- **Kalibrace systému:**
  - Proveďte kalibraci měřicího systému pomocí dvou referenčních antén. Zaznamenejte úroveň signálu přijímaného referenční anténou.
  - Kalibraci proveďte pro všechny frekvence, které budou použity při měření.

# PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKY ANTÉN

- **Laboratorní úloha: Měření vyzářovací charakteristiky antény ve vzdálené zóně v bezodrazové komoře**
- **Měření vyzářovací charakteristiky:**
  - Nastavte generátor signálu na požadovanou frekvenci a amplitudu.
  - Pomocí anténní točny otáčejte testovanou anténu v horizontálním řezu (azimutální úhel) a zaznamenávejte úroveň přijímaného signálu v pravidelných intervalech (např. každých 2°).
  - Opakujte měření pro vertikální řez (elevace) otáčením antény ve vertikální rovině.
- **Zpracování dat:**
  - Zaznamenejte naměřené hodnoty do tabulky a vytvořte grafy vyzářovací charakteristiky pro horizontální a vertikální řez.
  - Analyzujte šířku svazku, směrovost a zisk antény na základě naměřených dat.
- **Vyhodnocení výsledků:**
  - Porovnejte naměřené vyzářovací charakteristiky s teoretickými předpoklady a specifikacemi antény.

# ZDROJE

- [1] Procházka, Miroslav. Antény : encyklopedická příručka. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-166-7.
- [2] Mazánek, Miloš. Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03997-7.
- [3] Mazánek, Miloš. Antény a šíření vln. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01855-5.

Vytvořeno v rámci projektu: **DANTE**, reg. č. NPO\_UPCE\_MSMT-16591/2022

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

