

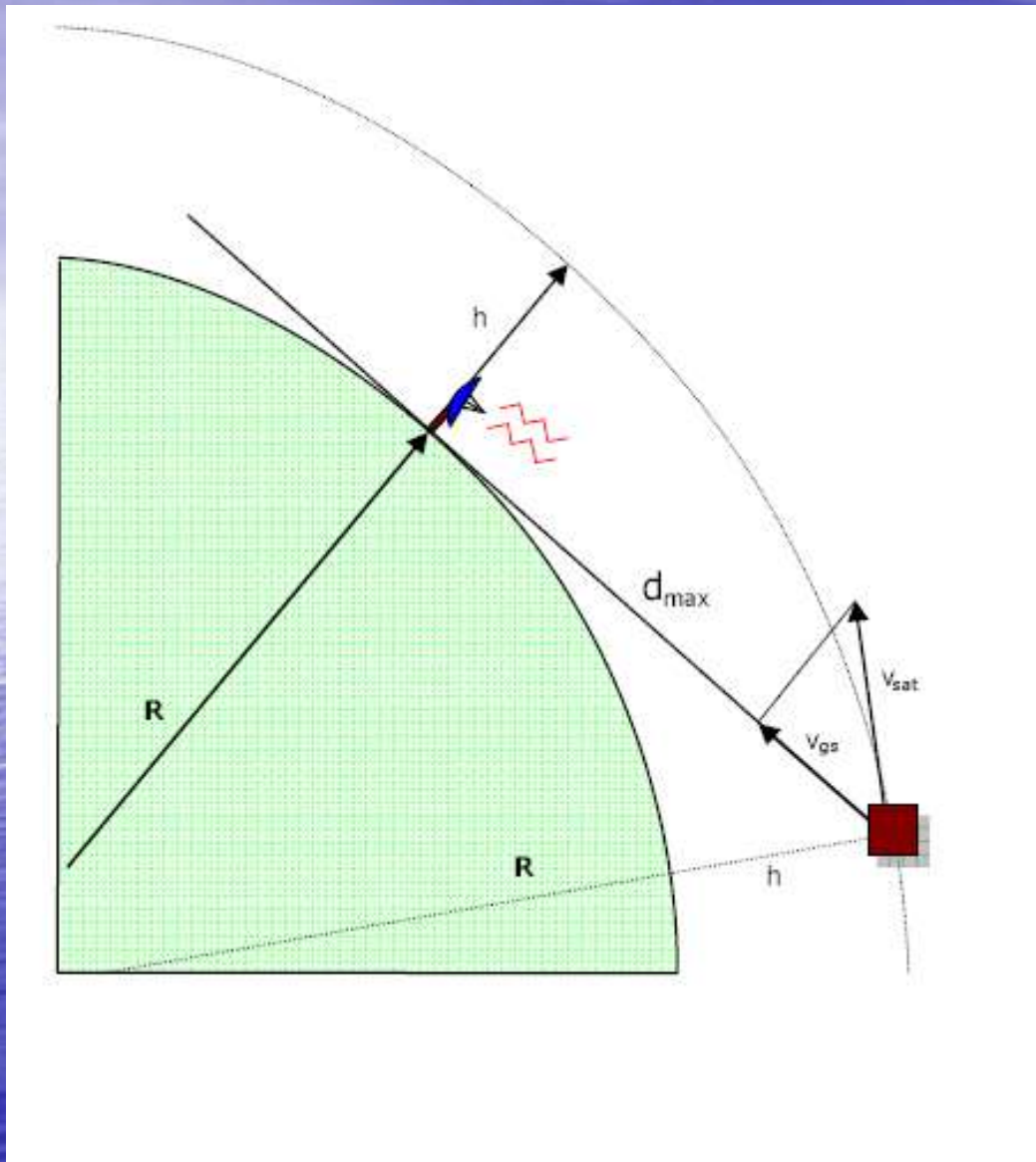
Užití elektricky fázovaných anténních řad v satelitní komunikaci

Michal Pokorný

Katedra aplikované elektroniky a
telekomunikací ZČU v Plzni

mpokorny@kae.zcu.cz

Satelit na oběžné dráze – zjednodušený



Komunikační vzdálenost:

- Požadavky IARU (AMSAT) – pozemní anténa by neměla mít elevaci pod 10° .
- $d_{\max}$:

$$d_{\max} = \sqrt{(R + h)^2 - R^2}$$

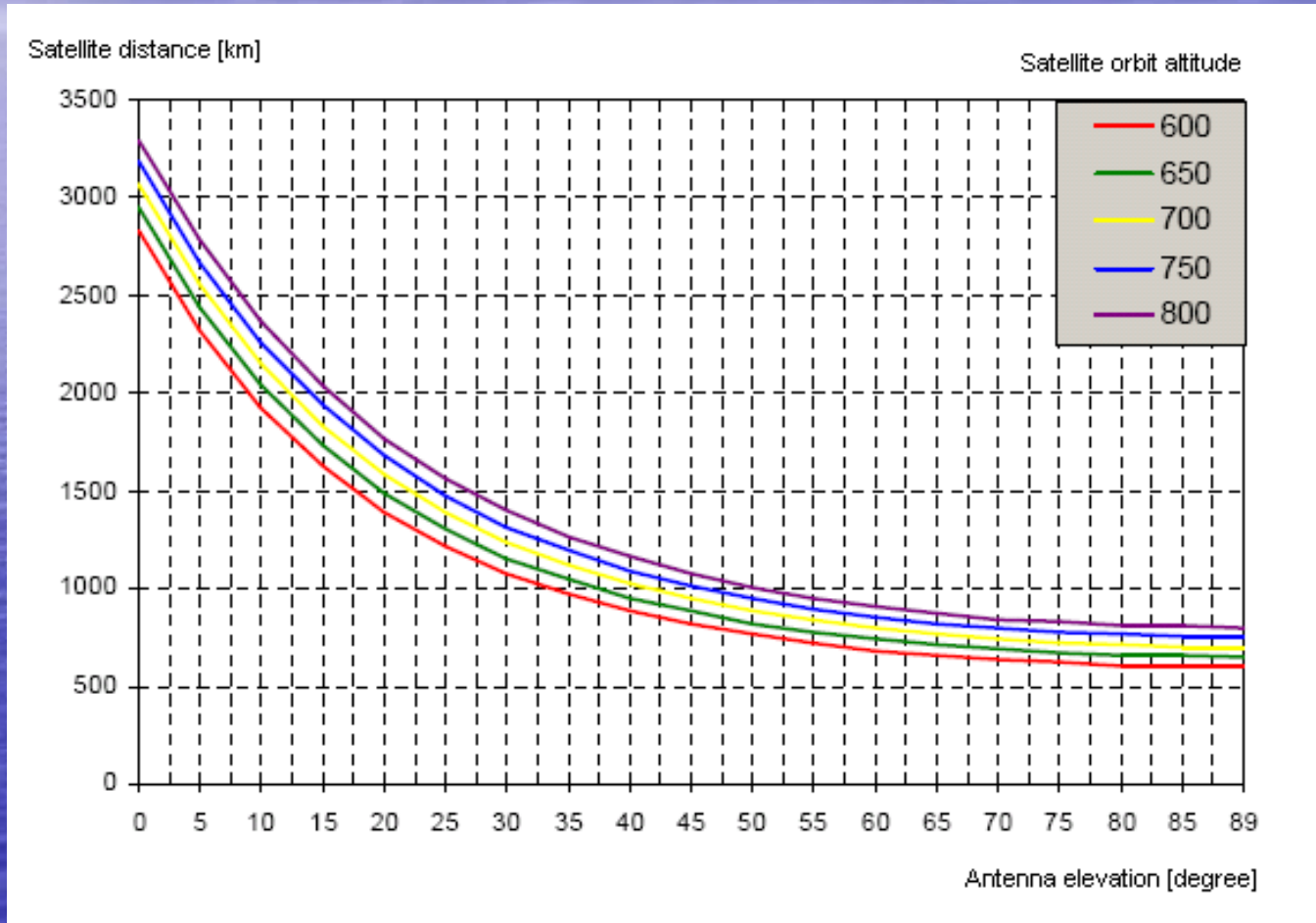
R – poloměr Země (6378 km)

h – Výška dráhy (altitude)

- Většinu času během komunikace se satelit nachází v nízkých elevacích

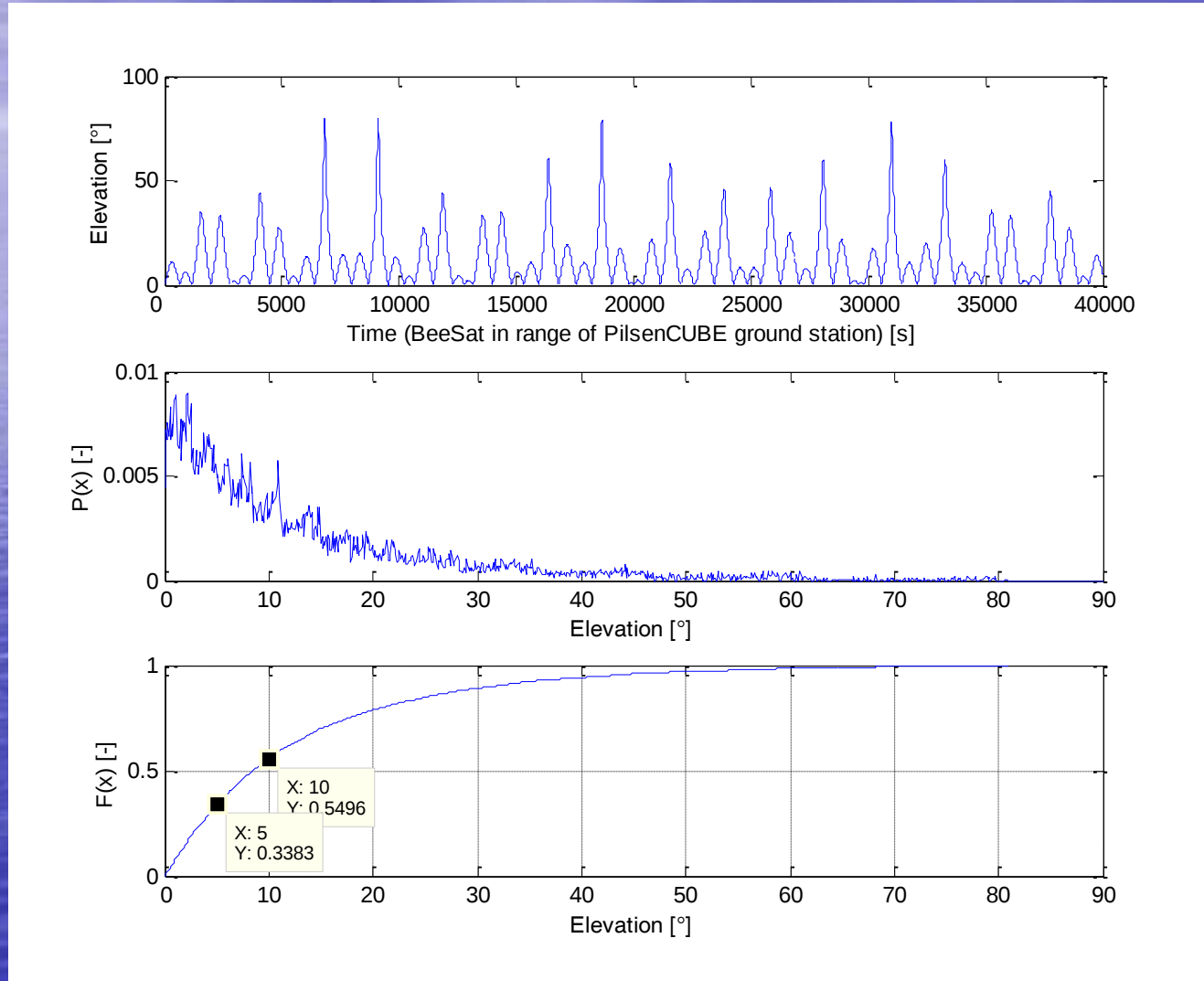
Maximální vzdálenost satelitu od pozemní stanice

$$d'(\alpha) = \frac{(R+h) \sin \left\{ 90^\circ - \alpha - \sin^{-1} \left[\frac{R}{R+h} \sin(90^\circ + \alpha) \right] \right\}}{\sin(90^\circ + \alpha)}$$

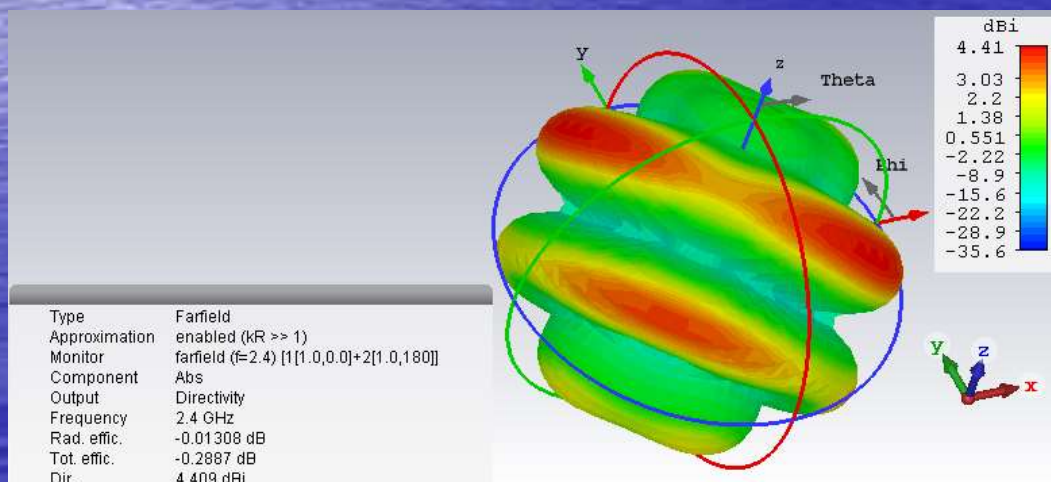
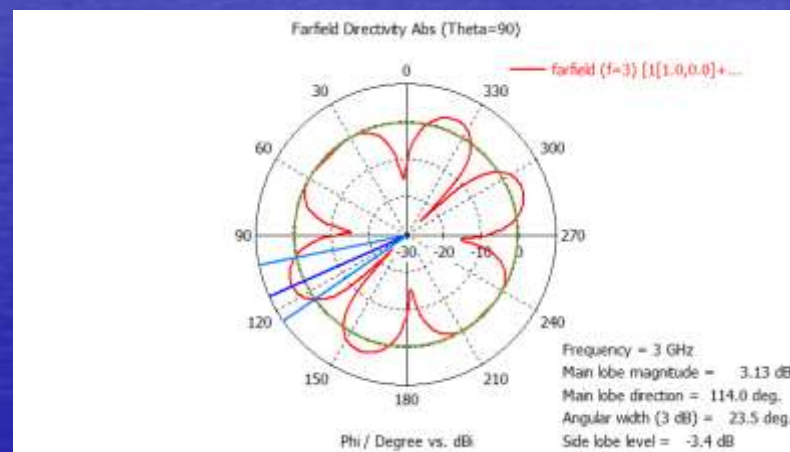
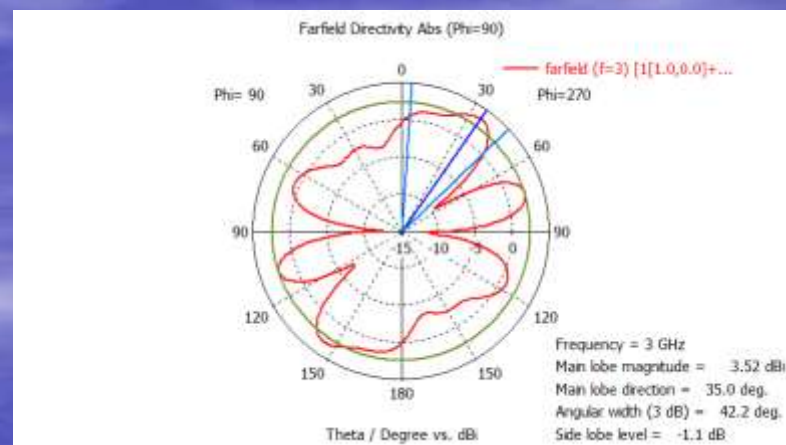
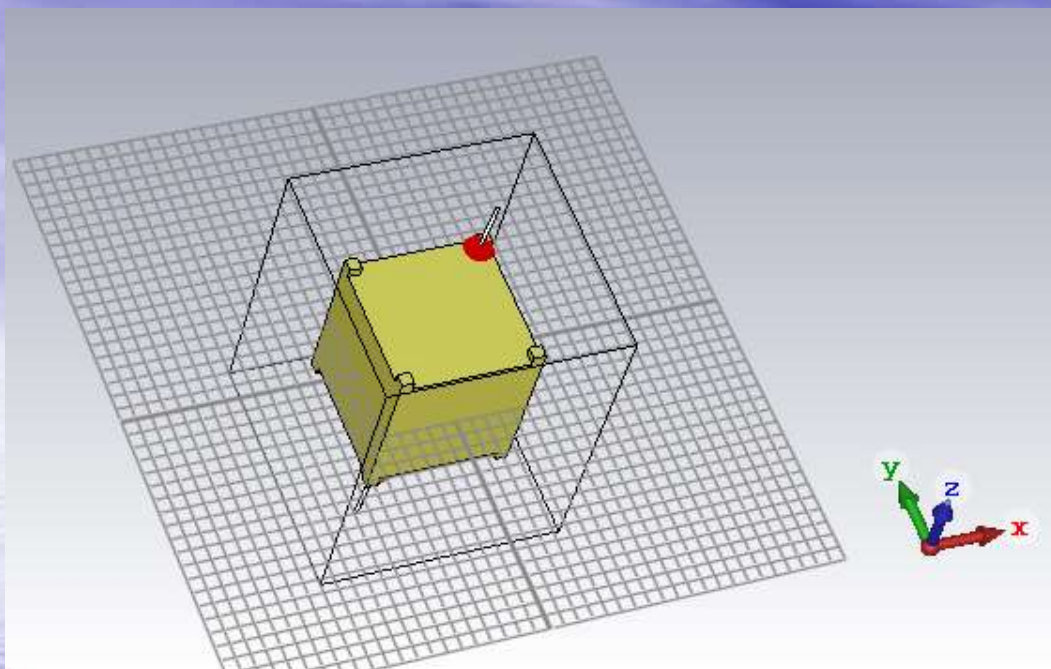


Časové možnosti satelitní komunikace

- Téměř 55% komunikačního času se LEO satelity nacházejí pod 10° elevace.



Anténní systém PilsenCUBE satelit – 2.4 GHz



PilsenCUBE/VZLUSAT-1 pozemní anténní systém

S – band 1.8 m parabolický reflektor+ helix ozařovač s 30 dBi ziskem.



Kde můžeme vidět elektricky fázovatelnou anténní řadu?

- Hlavní anténní lalok je možno elektricky tvarovat a naklánět. Anténa neobsahuje mechanické komponenty
- Hlavní aplikace:
 - Radarové antény
 - Mobilní komunikace (3G and vyšší)
 - Satelitní komunikace – autofocus antény
 - Automobilová technika – adaptivní tempomaty



O našem projektu

- Start: 2017, od 2018 není moc řešen. Priorita sat. PilsenCUBE.
- GaČR s Katedrou elektromagnet. pole CVUT 2020 – 2023?
- Hlavní cíl: Konstrukce antény pro satelitní pozemní segment pro S - mikrovlnné pásmo na bázi elektricky fázovatelných anténních řad bez mechanického rotátoru. Pro tyto účely použít standardně nabízené elektronické komponenty. Zvážit realizaci i pro UHF pásmo.
- Důvody:

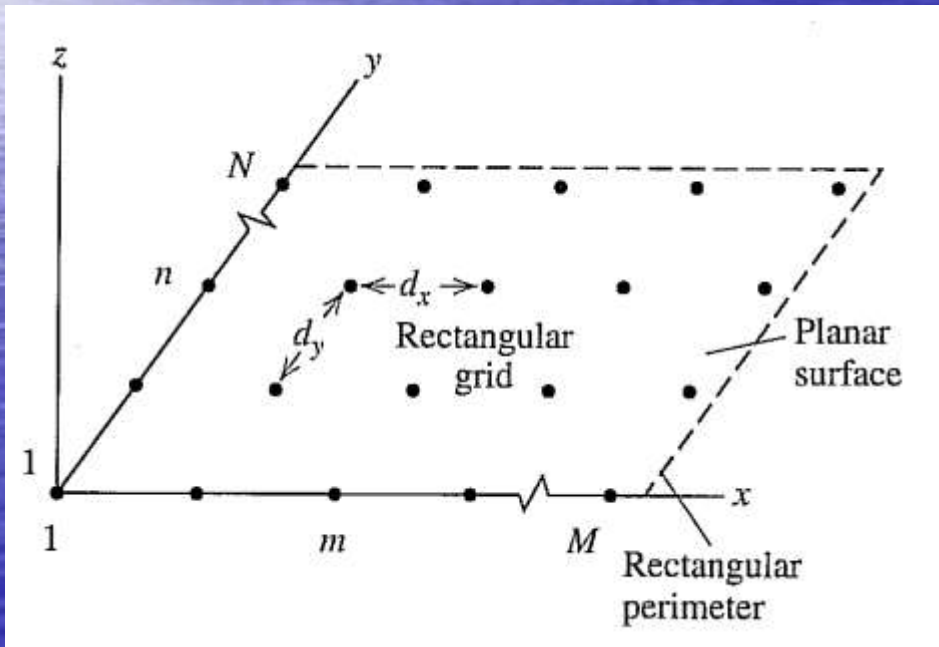
Realizace tohoto typu antény umožní snadnější rozšíření bez obslužných základnových stanic po celém světě, které budou téměř bezúdržbové a řiditelné z jednoho místa. Pro polární satelitní dráhy a umístění pozemního segmentu v blízkých polárních zeměpisných šířkách dochází k významnému prodloužení komunikačních oken.

Fázovatelná anténní řada vs. standardní řešení

	Standardní řešení	Fázovatelná ant. řada
Odolnost na počasí	Nízká	Vysoká
Stabilita při zaměřování	Nízká	Vysoká
Přesnost zaměřování	Závislá na mech. komponentech	Závislá na rozlišení posouvačů fáze
Rychlost zaměřování	Nízká	Velmi vysoká
Počet sled. cílů	1	>1
Nároky obsluha a servis	Velmi vysoké	Nízké
Náročné části	Mechanika	RF a elektronika

Základní principy I.

- Planární pole o velikosti $m \times n$, které obsahuje jednotlivé anténní elementy se směrovou charakteristikou $F_{m,n}(\theta, \phi)$.
- Se změnou napájecího proudu každým ant. elementem $I_{m,n}$
 - Amplitudou – tvar hlavního vyzařovacího laloku
 - Fází – náklon hlavního vyzařovacího laloku



$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} F_{m,n}(\theta, \phi) \cdot I_{m,n} e^{jkr_{m,n}}$$

$$r_{m,n} = m \cdot d_x \vec{x}_0 + n \cdot d_y \vec{y}_0$$

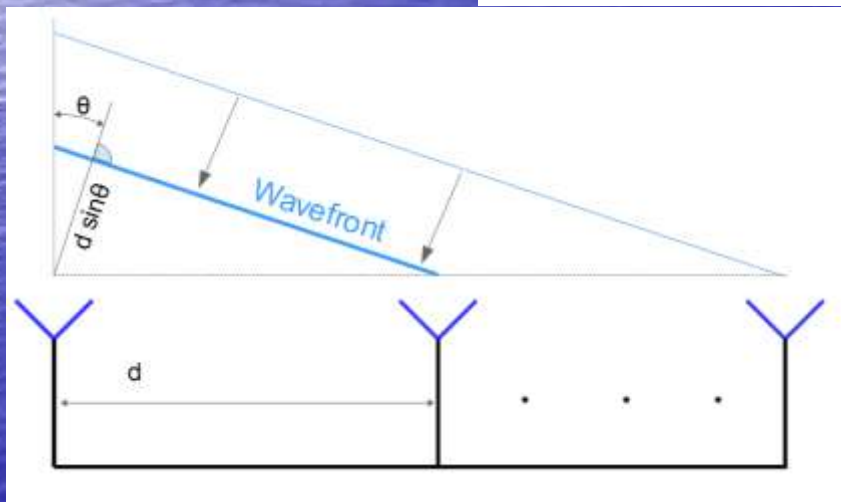
$$r_{m,n} = \sin \theta (m \cdot d_x \cos \phi + n \cdot d_y \sin \phi)$$

Není zahrnuto vzájemné ovlivňování jednotlivých anténních elementů .

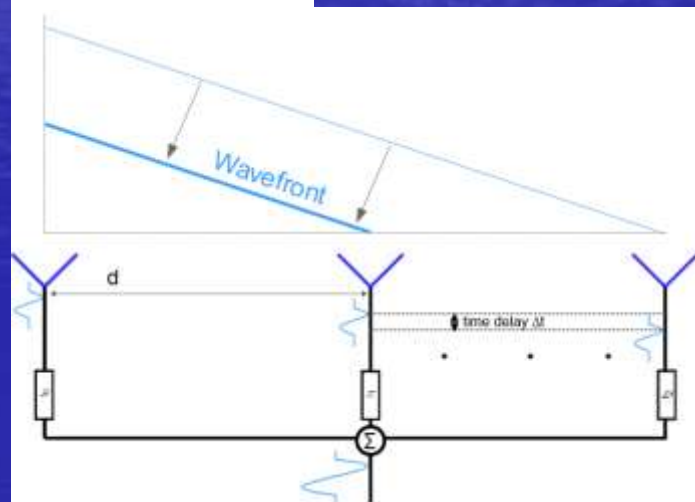
Základní principy II.

- Tvar směrové charakteristiky:
 - Uniformní rozložení (napájení) – stejné amplitudy napájení
 - Binomické rozložení – maximálně potlačené postranní laloky
 - Čebyševovo rozložení – stejnoměrně velké postranní laloky
 - Taylorovo rozložení – pozvolný pokles postranních laloků
- Směrování hlavního laloku: - fázový posunem (zpožděním) napájením.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}$$

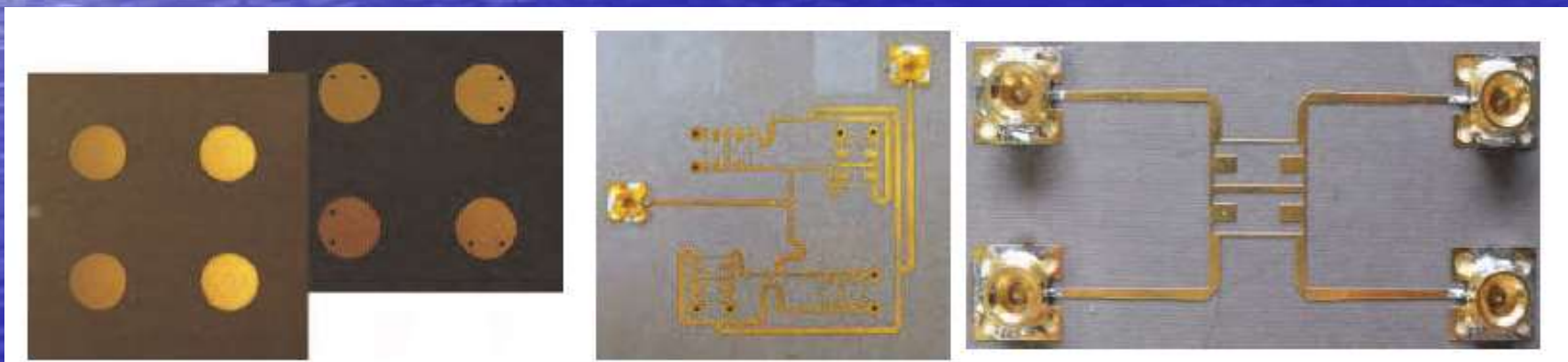
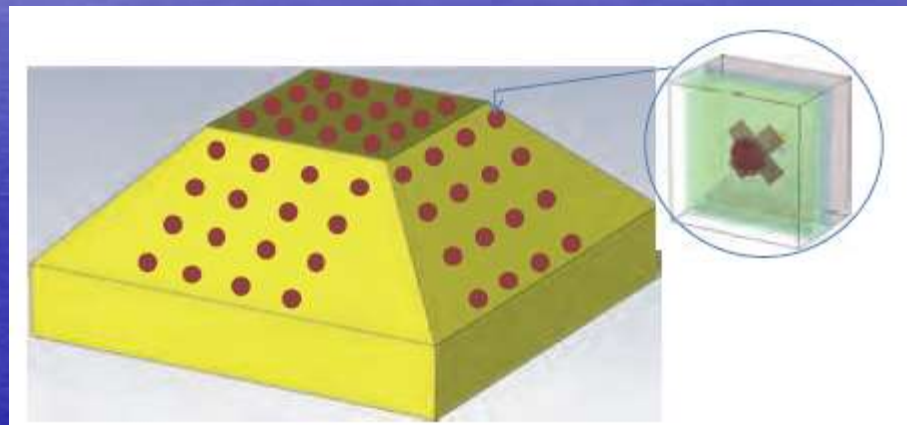


$$\Delta t = \frac{d \sin \theta}{c}$$



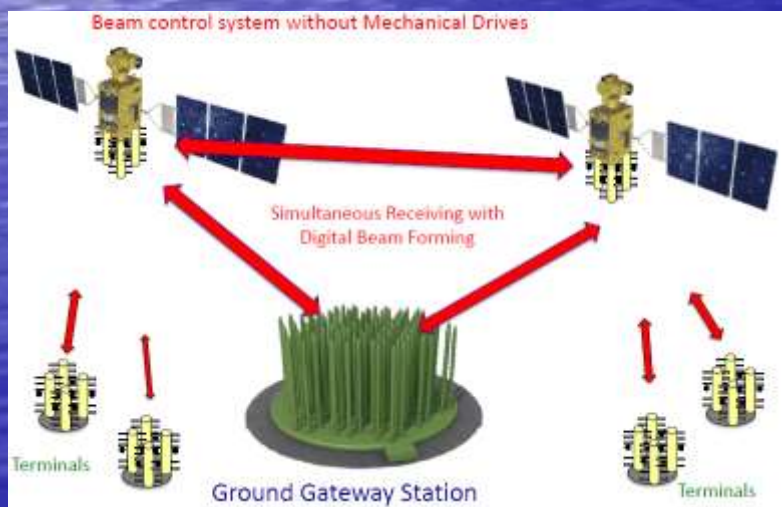
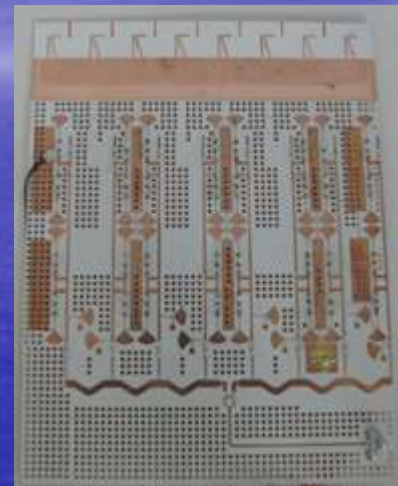
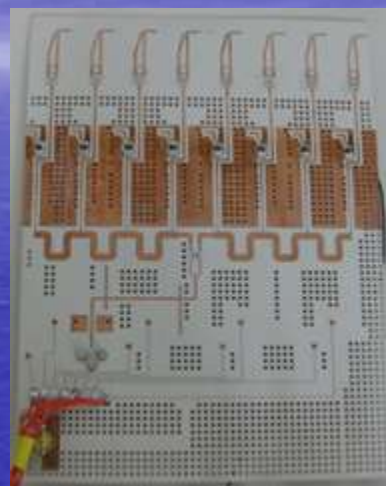
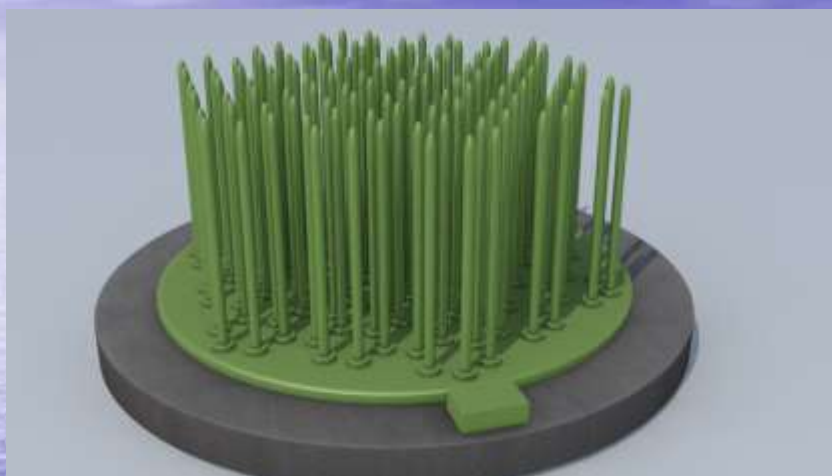
Podobné (konkurenční) projekty I.

- Universidad Polytécnica de Madrid
- Frekvenční rozsah: Tx 7.9 – 8.4 GHz
Rx 7.25 – 7.75 GHz
- Šířka hlav. laloku: 5° (-3dB)
- Maximální zisk: 25 dB



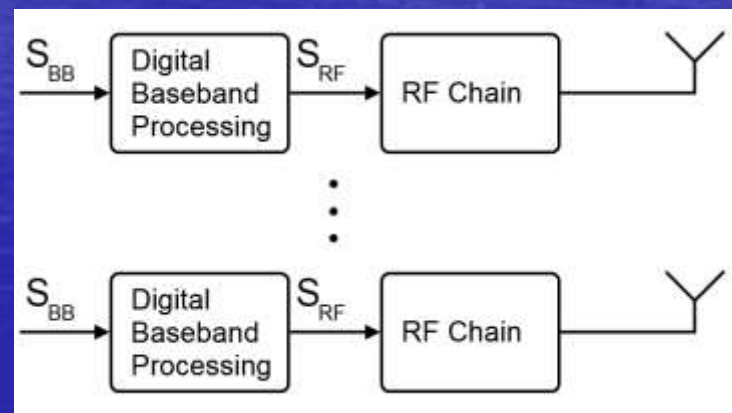
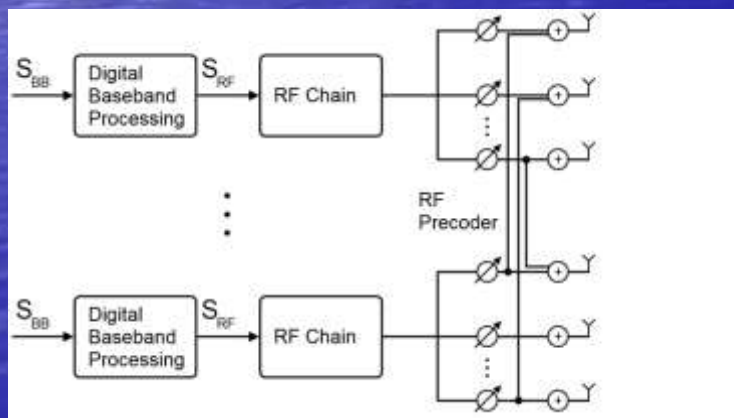
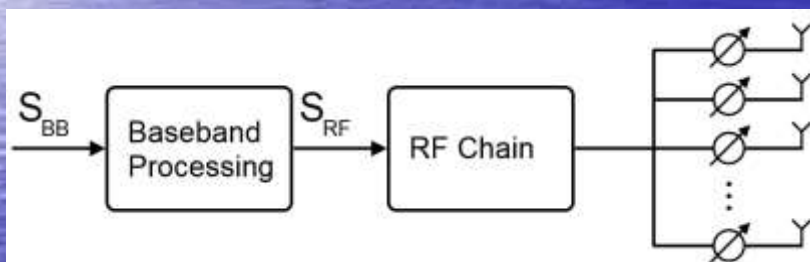
Podobné (konkurenční) projekty II.

- University of Kobe (prof. Nobuyuki Kaya)
- X – band anténa



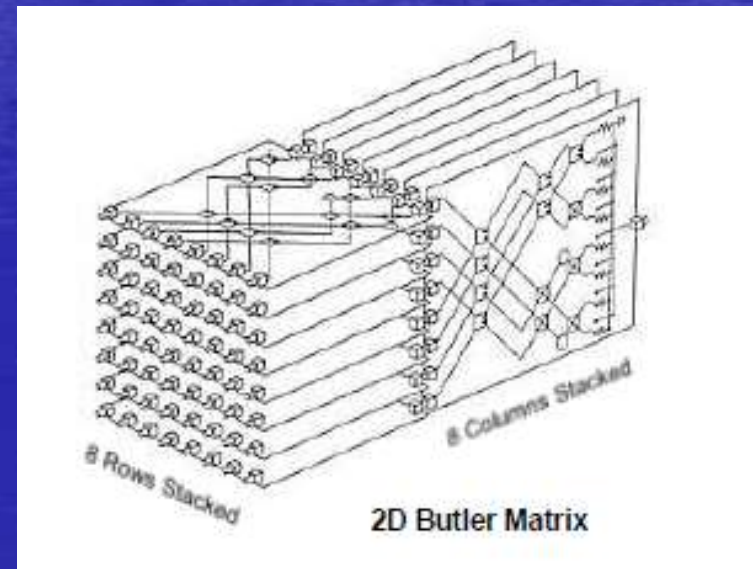
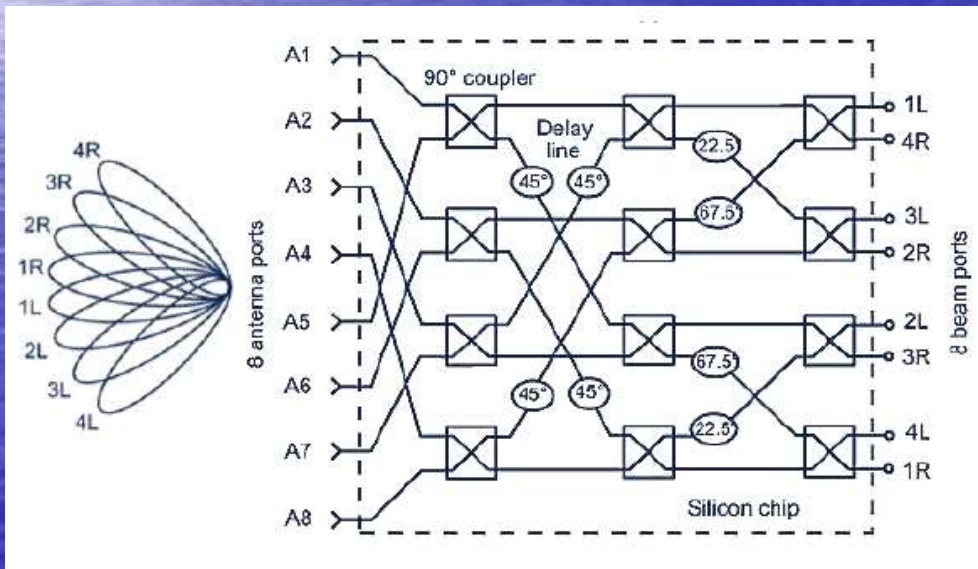
Principy vychylování a tvarování anténního laloku.

- Analogové – každý anténní element má vlastní fázový posouvač a atenuátor.
- Digitální – každý anténní element má svůj RF front end a digitální zpracování .
- Hybridní – Každý anténní element má svůj vlastní fázový posouvač a atenuátor, ale určitá skupina má své digitální zpracování.

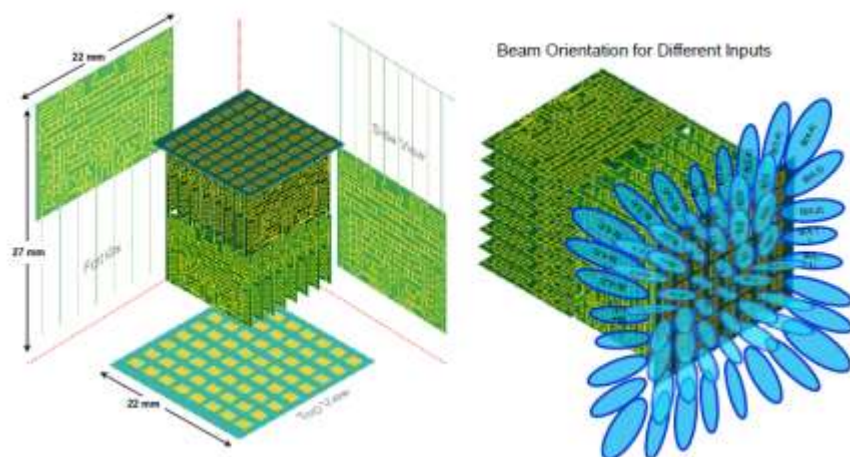
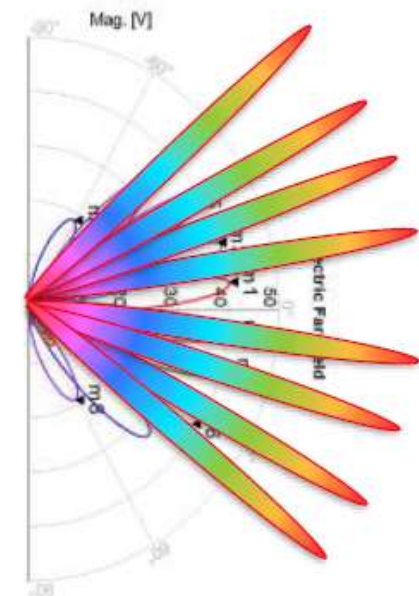
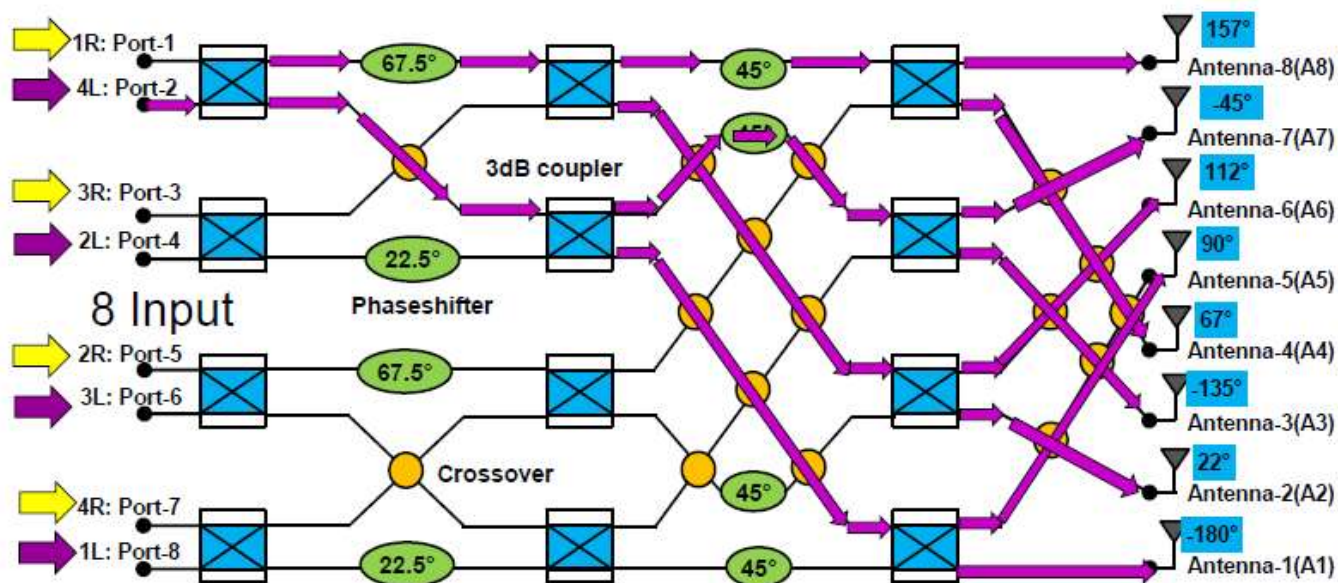


Tvarování anténního laloku - spínáním I.

- **Butlerova matice** - pasivní struktura $N \times N$ pro řízení směřování. Struktura pro analogové směřování anténního laloku, která použitím vhodné obvodové topologie se zapojením kvadrurních SVČ, pevných fázových posunů a RF křížení umožňuje analogové směřování anténního laloku pomocí přepínačů.
- Výhodou tohoto provedení je jeho jednoduchost a absenci analogových nebo krokových fázových posouvačů, avšak to

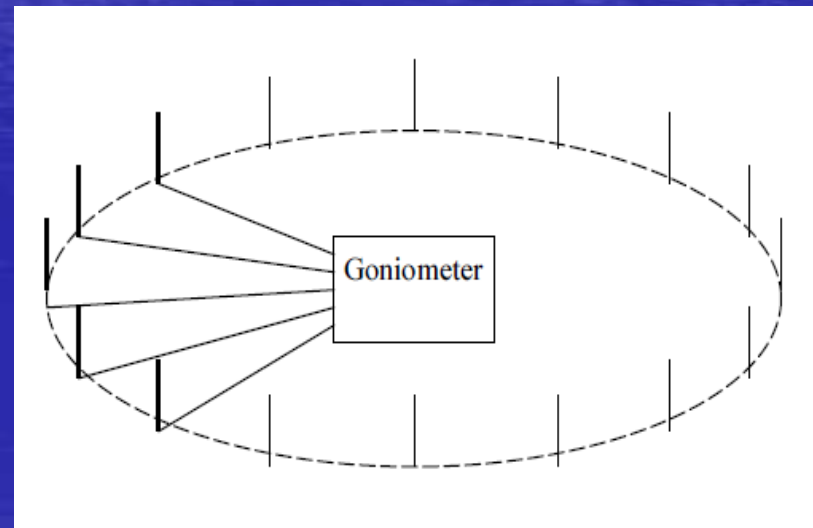
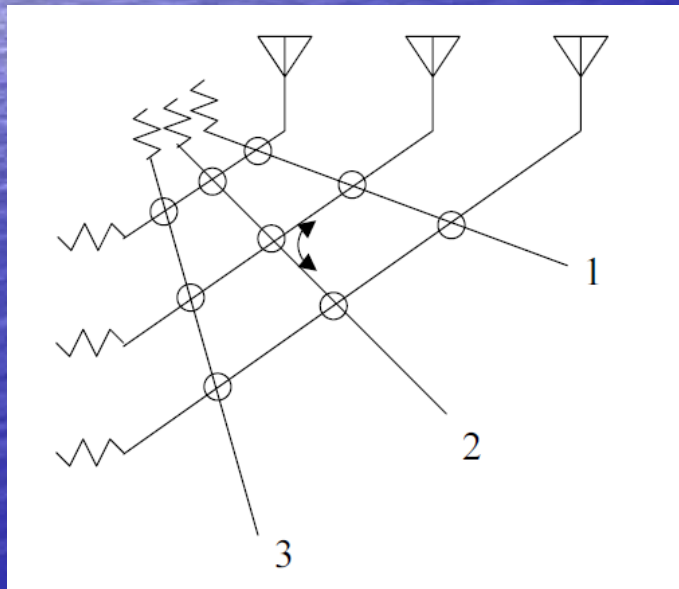


Butlerova matice - funkce



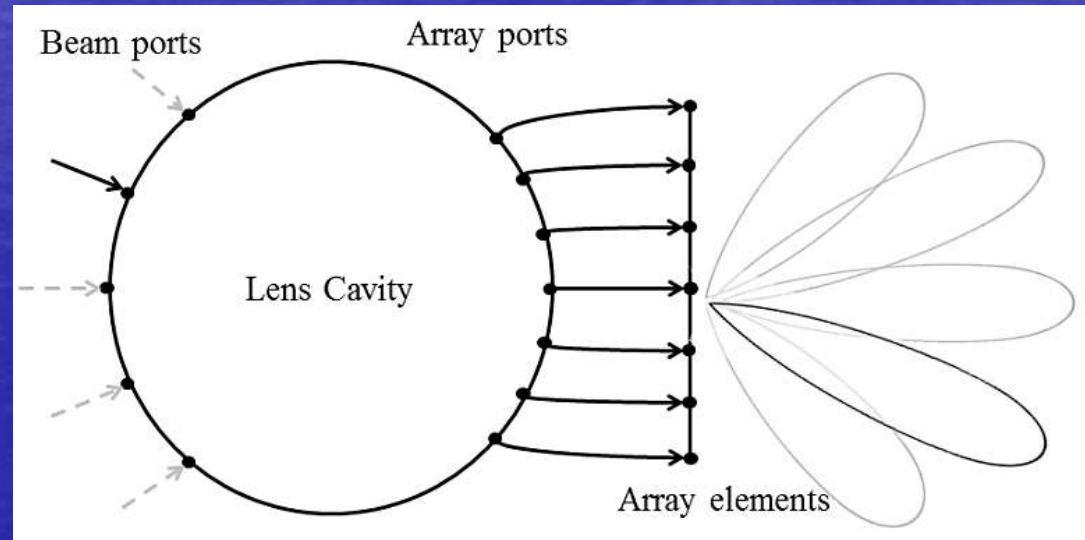
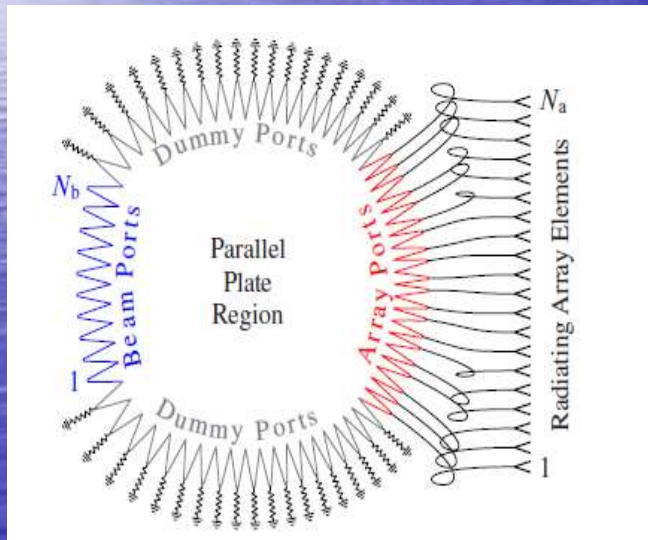
Tvarování anténního laloku - spínáním II.

- Blass matice - využívá úseky vedení a směrově odbočnice k tvarování vyzařovacího laloku. K příčným liniím jsou připojeny jednotlivé anténní elementy a k vodorovným napájecí porty. Vodorovné linie mají stejné délky a vykazují konstantní zpoždění. Příčné pak mají různé délky a tedy i zpoždění.
- Wullenweber pole - se skládá z kruhového uspořádání anténních elementů v azimutu (pokrytí plných 360 stupňů). Řízení je prováděno přepínáním signálů anténních prvků v daném směru.



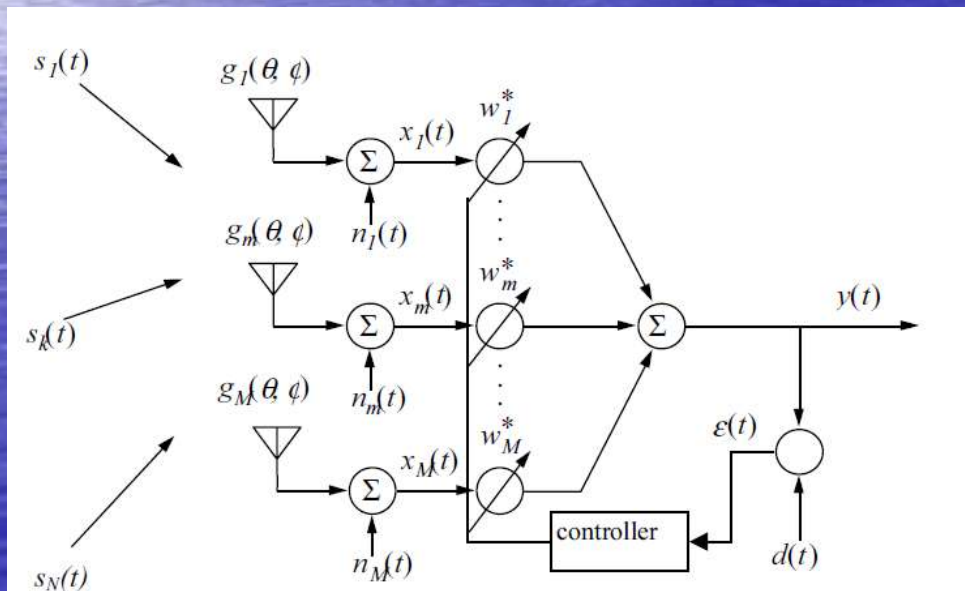
Tvarování anténního laloku - spínáním III.

- Rotmanova čočka - „Parallel plate“ planární struktura pro směřování anténního laloku, vykazující velkou širokopásmovost. Některé porty jsou zakončeny vlnovou impedancí (Dummy ports), jiné slouží k napájení jednotlivých zářičů (Array ports) a výběrem jednoho z napájecích portů (Beam ports) dochází k diskrétnímu vychylování hlavního anténního laloku



Principy algoritmů směřování anténního laloku

- Cílem adaptivní algoritmů je zaměřovat a tvarovat anténní lalok tak, aby bylo dosaženo maximální amplitudy nebo signál/šum poměru na portu antény. To je docíleno nastavení parametru (fázové posuny, amplitudy apod. - váhové parametry) anténní řady tak, aby bylo dosaženo minimální střední kvadratické odchylky (mean squared error) mezi výstupním signálem anténní rady a referenční zdrojovým signálem.

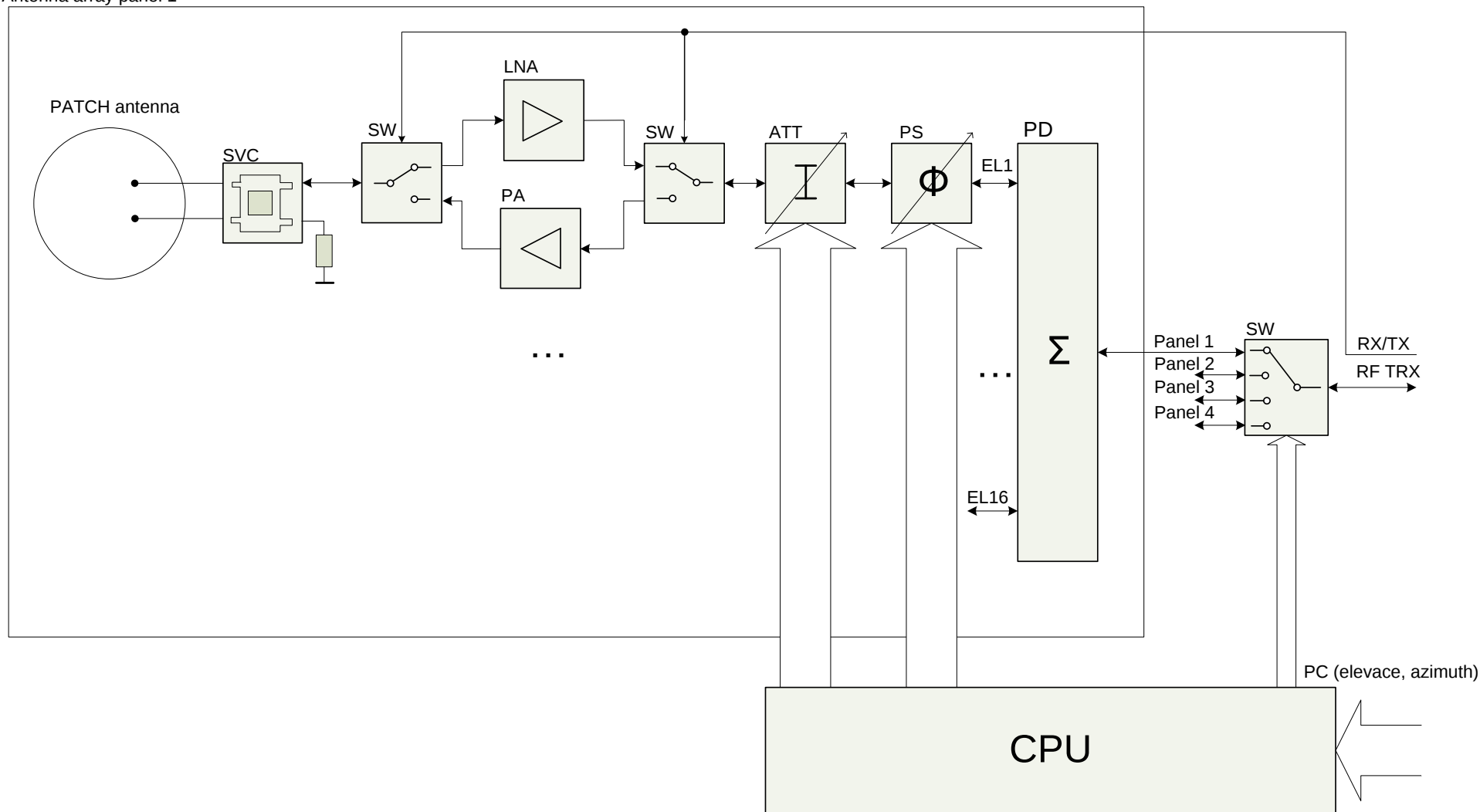


Používané Agoritmy:

- LMS (Least mean squares)
- DMI (Direct sample covariance matrix inversion)
- RLS (Recursive least squares)
- CMA (Constant modulus algorithm)

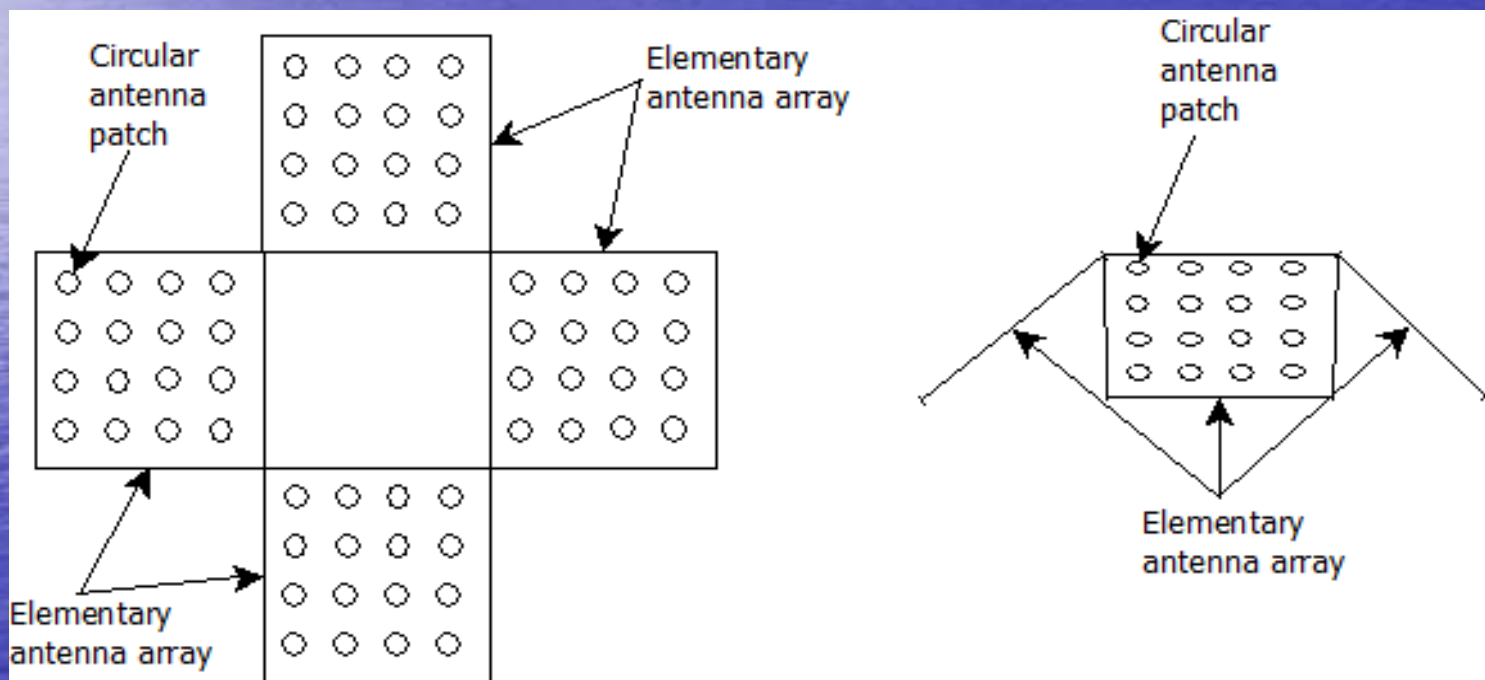
Koncept naší elektricky fázovatelné antény I.

Antenna array panel 1



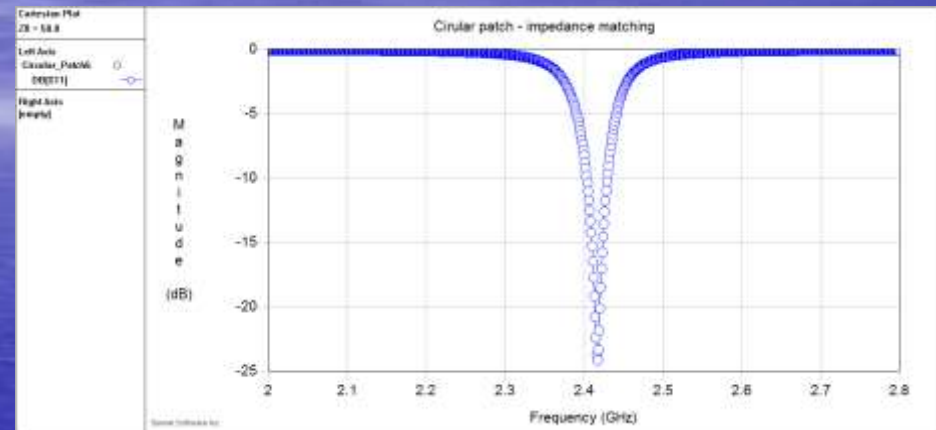
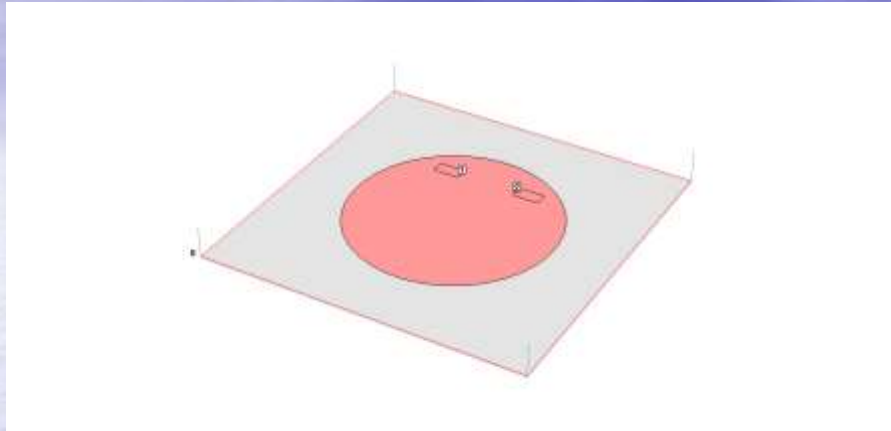
Koncept naší elektricky fázovatelné antény II.

- Kruhové patche s 8 dBi max. ziskem a $\pm 30^\circ$ anténním lalokem
- Jedno elementární anténní pole 4x4 dosahuje 20 dBi max. zisk
- Vždy aktivní pouze jediné elementární pole

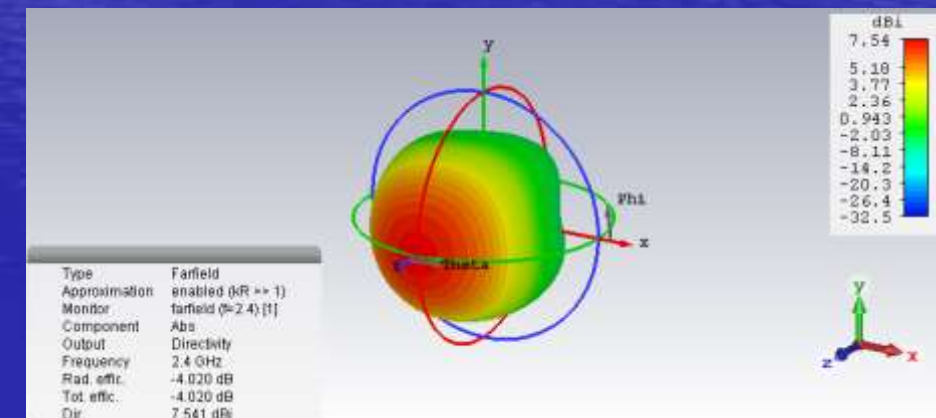
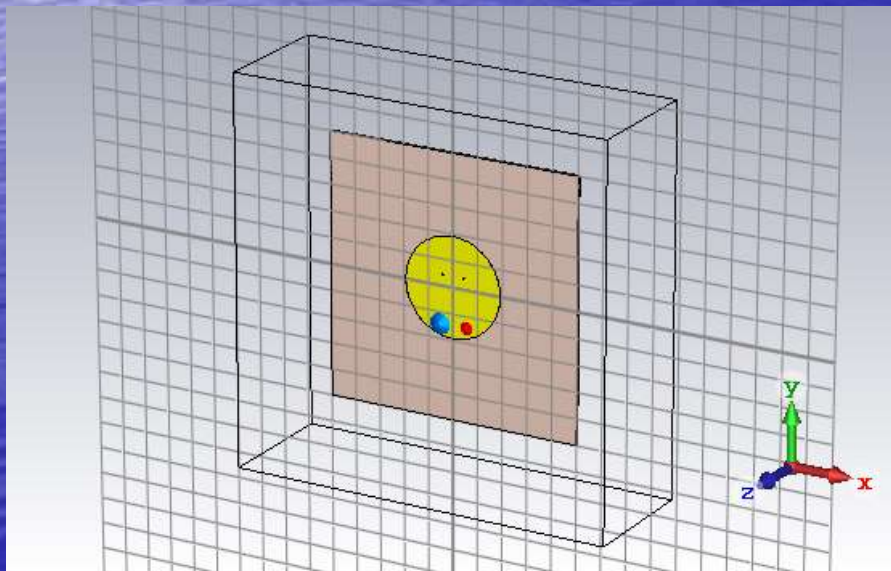


Simulace elementárního kruhového patche

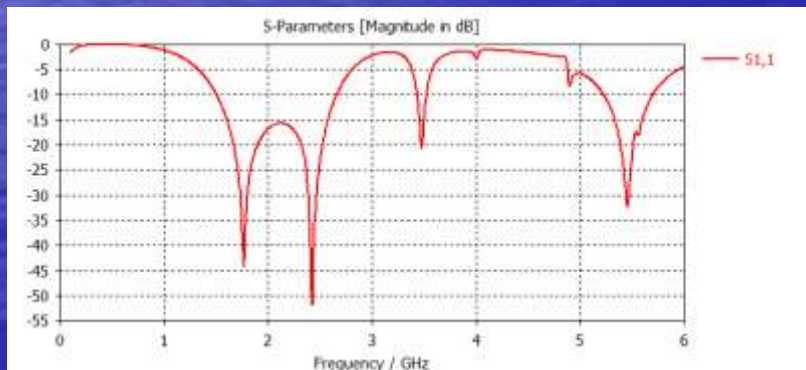
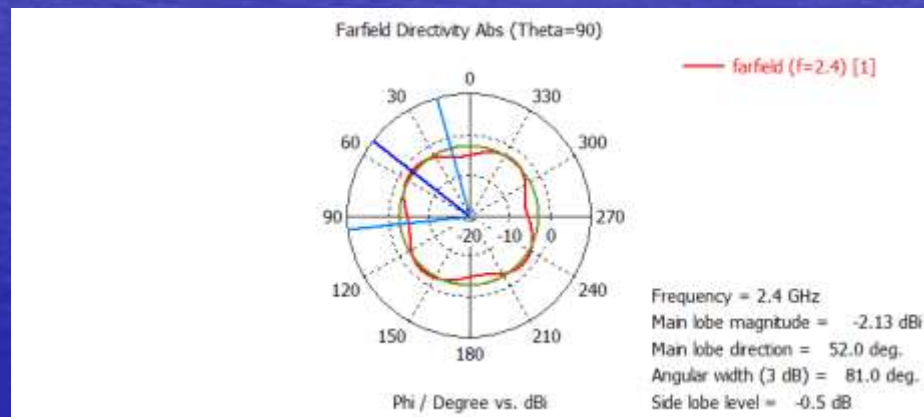
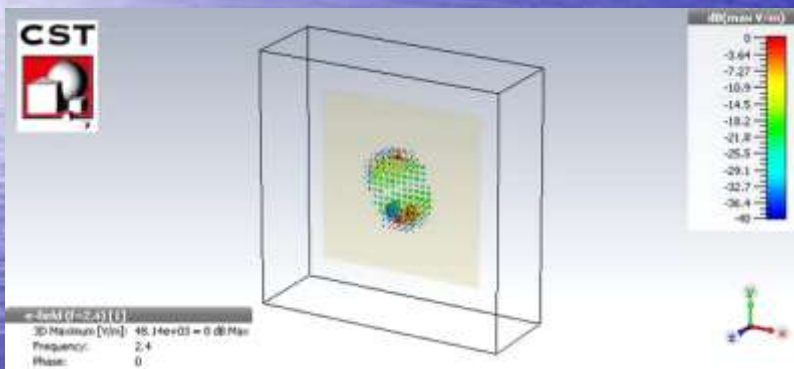
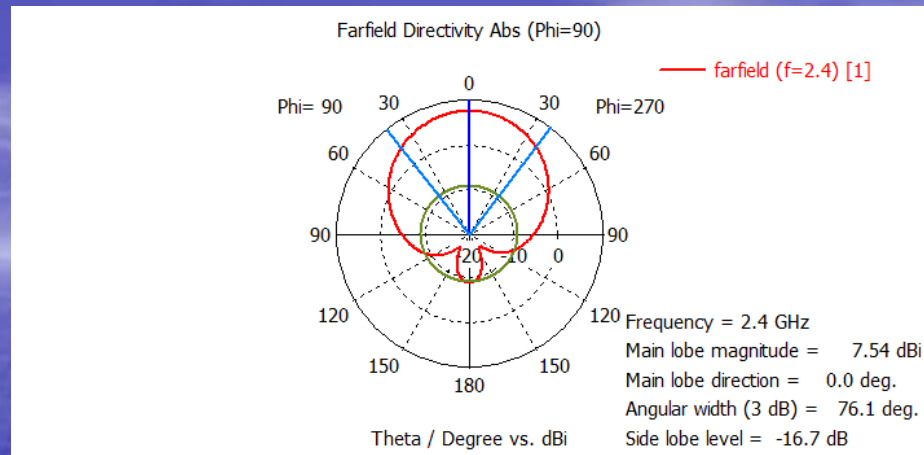
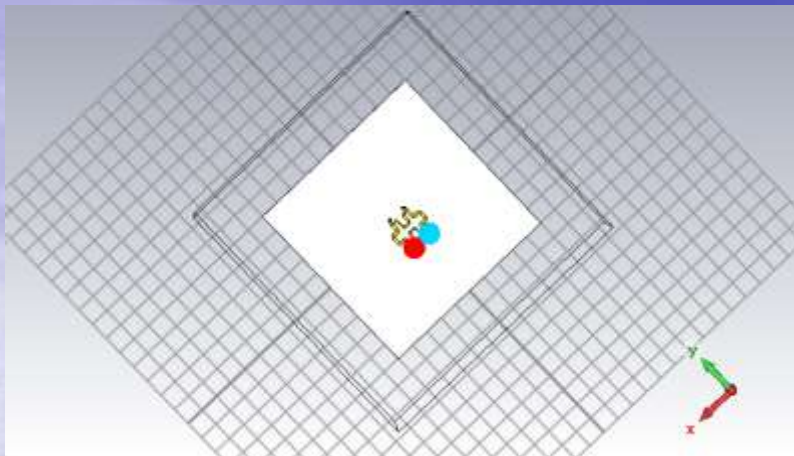
- Sonnet – 2.5D simulátor – Momentová metoda



- CST Microwave studio – 3D simulátor – FDTD method

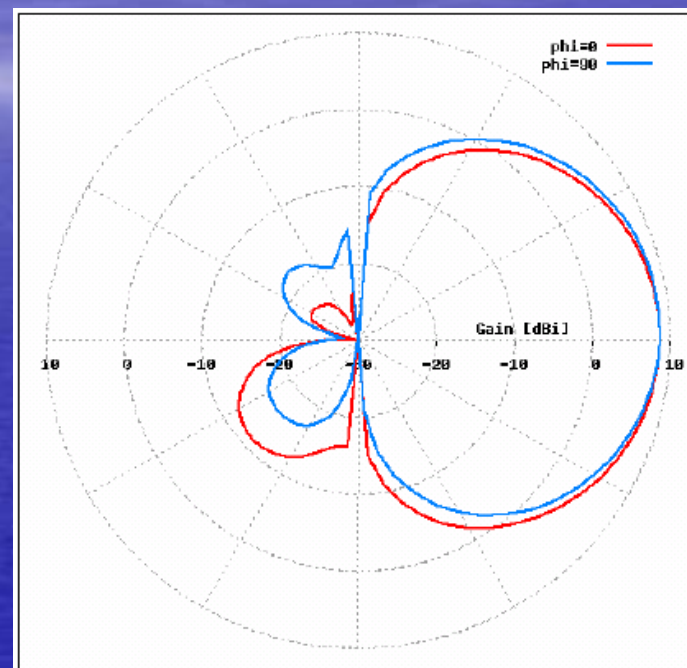


Simulace elementárního kruhového patche II.



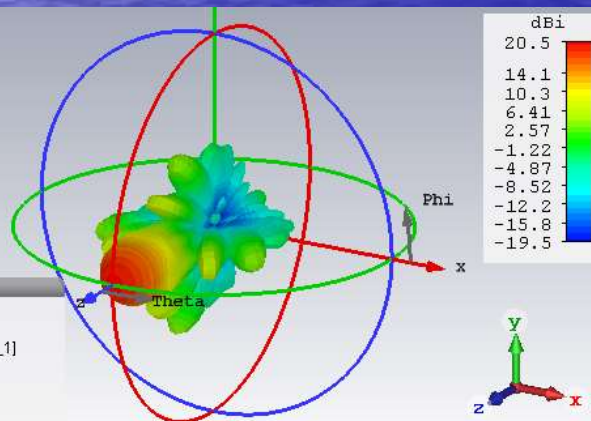
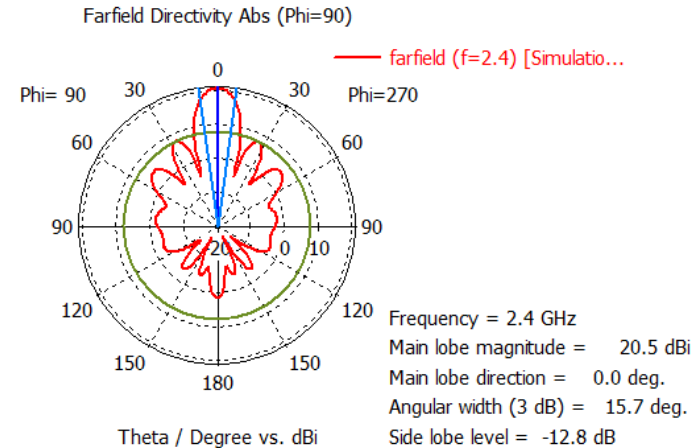
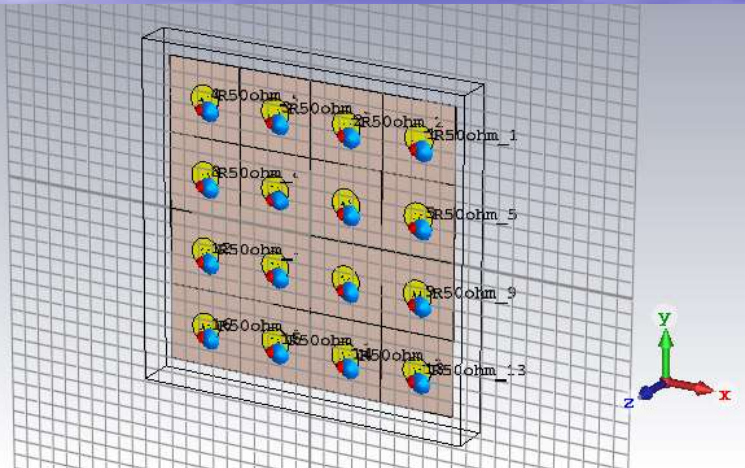
Realizace elementárního kruhového patche

- Levotočivá kruhová polarizace
- 8 dBi zisk, 60° (-3dB) šířka hlavního vyzařovacího laloku

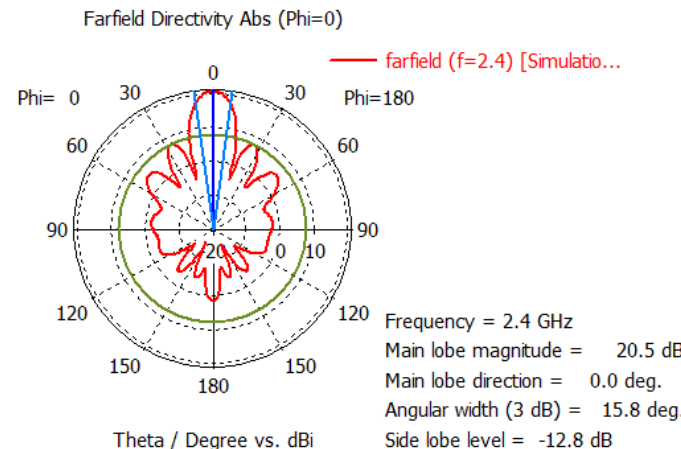


Analýza anténního pole 4x4

- Transverzální anténní pole se vzdáleností ant. elementů $\lambda/2$, uniformní napájení:

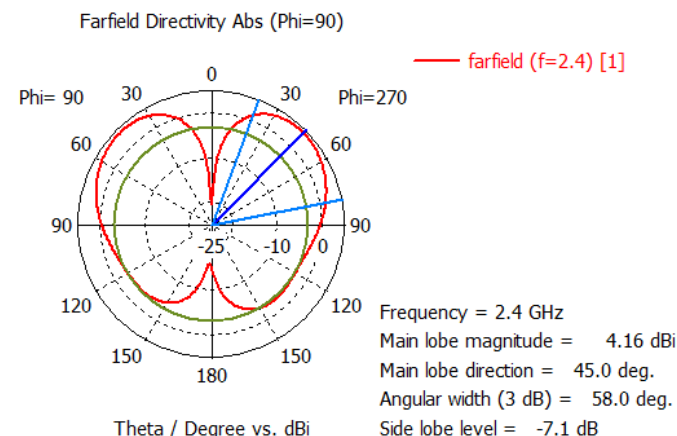
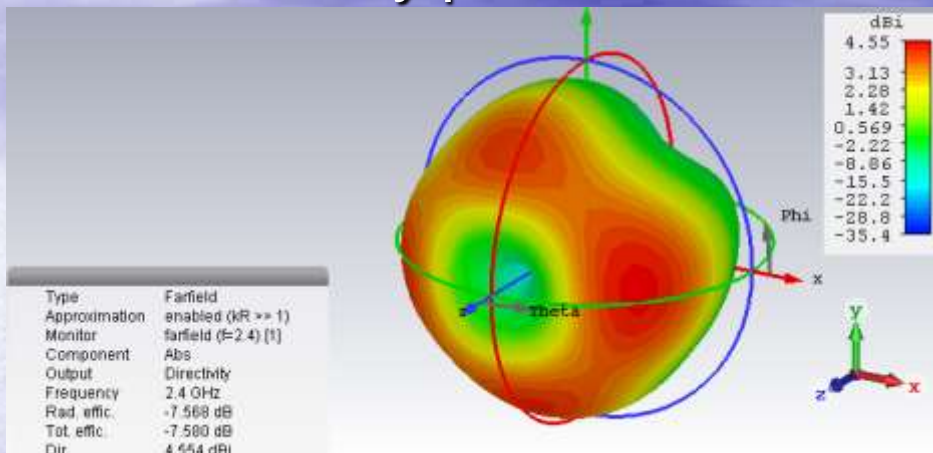


Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Monitor	farfield (f=2.4) [Simulation_1]
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	2.4 GHz
Rad. eff.	-4.937 dB
Tot. eff.	-4.939 dB
Dir.	20.52 dBi

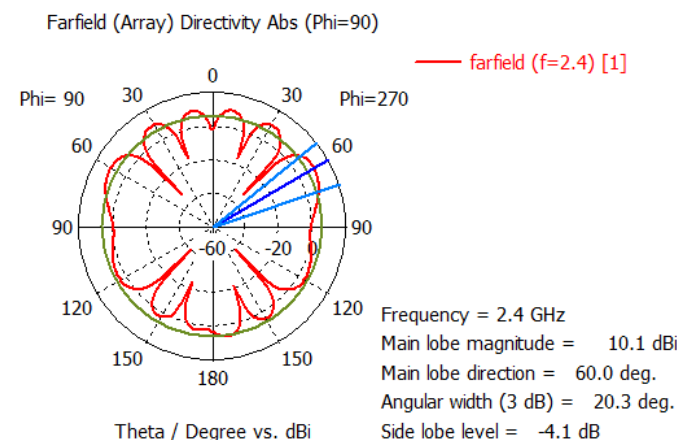
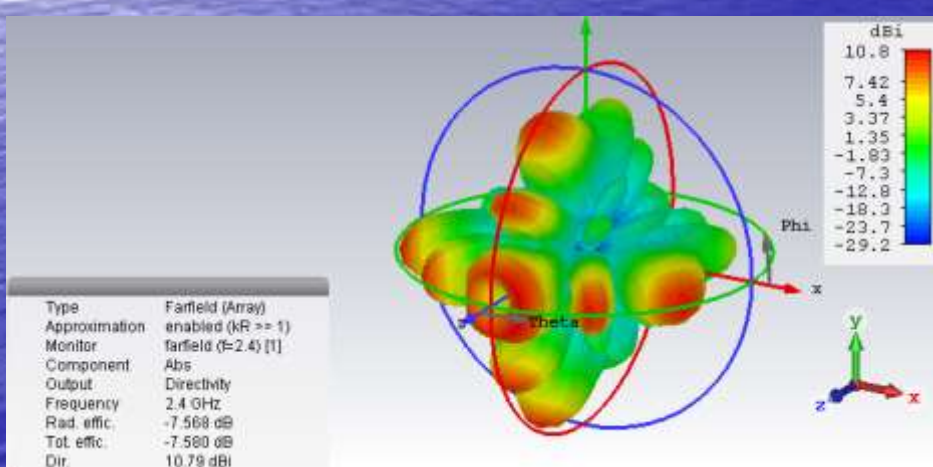


Analýza anténního pole 4x4 – chybný návrh

- $\lambda/2$ kruhový patch:

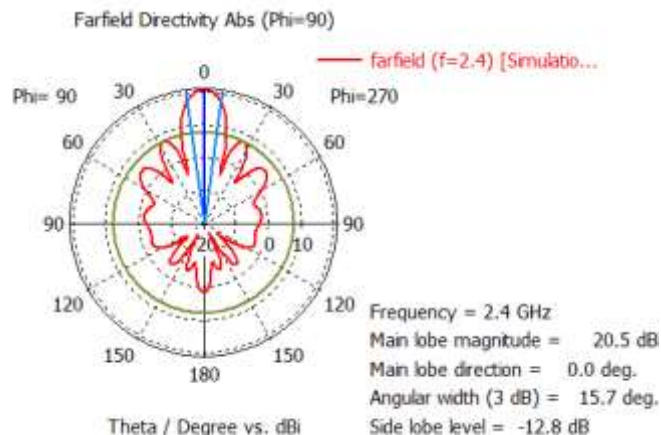


- v transverzální ant. řadě 4x4 s uniformním napájením:

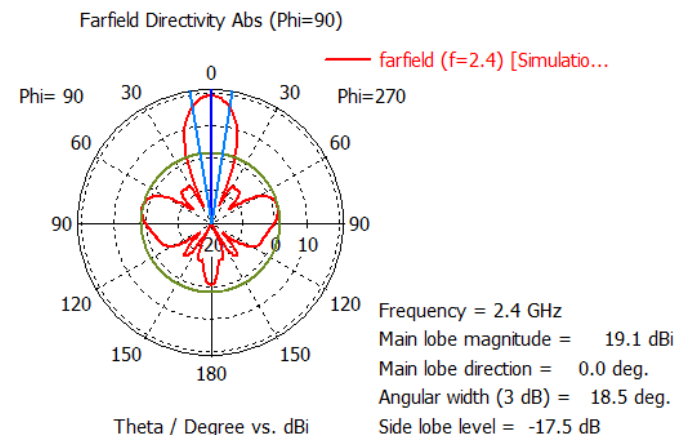


Analýza anténního pole 4x4 – napájení I.

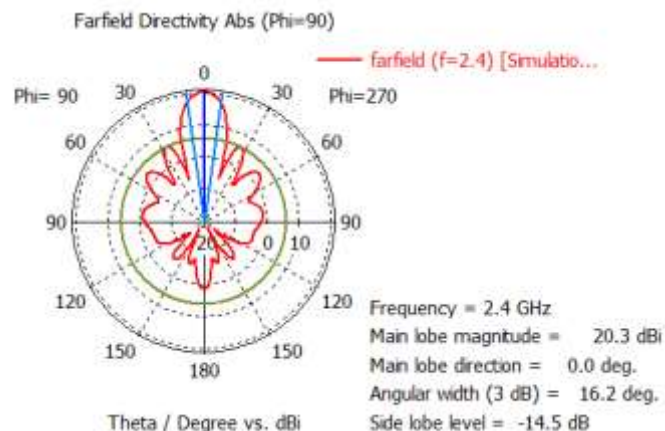
Uniformní



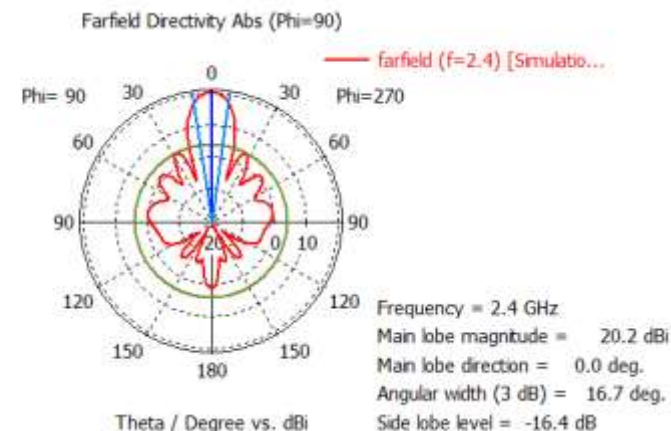
Binomické



Čebyšev 15 dB

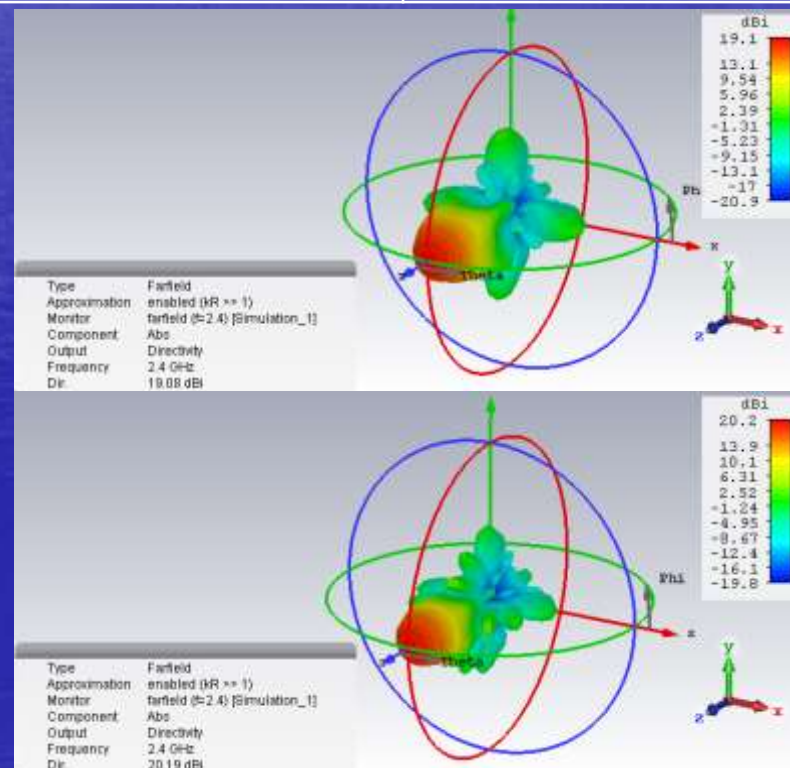
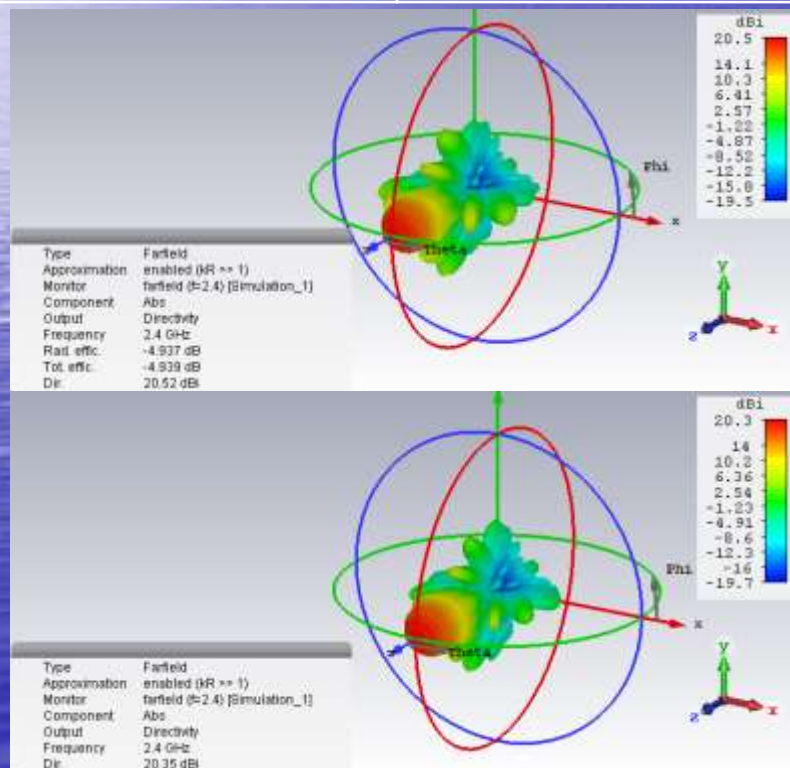


Taylor



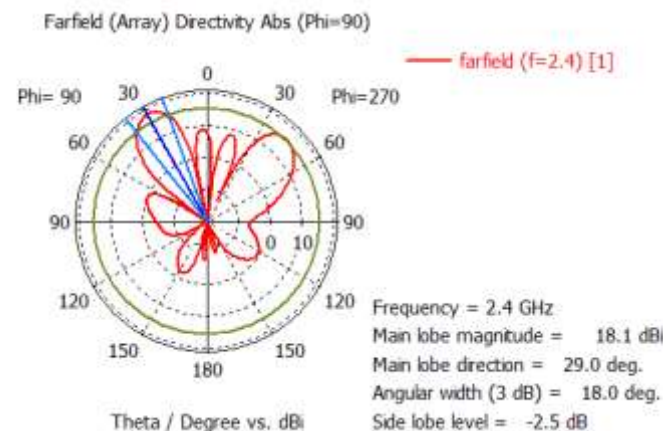
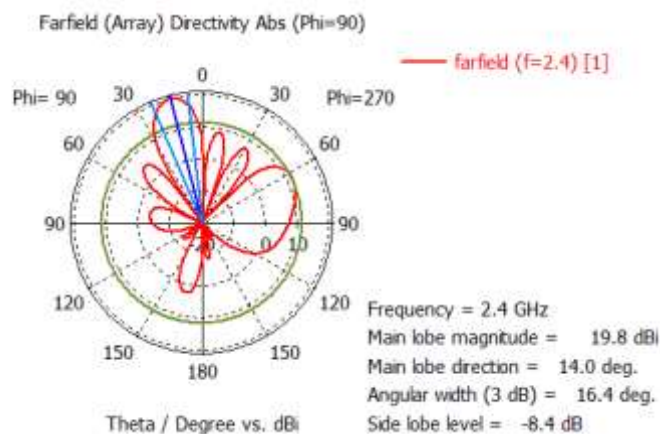
Analýza anténního pole 4x4 – napájení II.

	Maximální zisk [dB]	3 dB hlavní lalok [°]	Potlačení post. laloků [dB]
Uniformní	20,5	15,8	12,8
Binomické	19,1	18,5	17,5
Čebyšev 15dB	20,3	16,2	14,5
Taylor	20,2	16,7	16,4

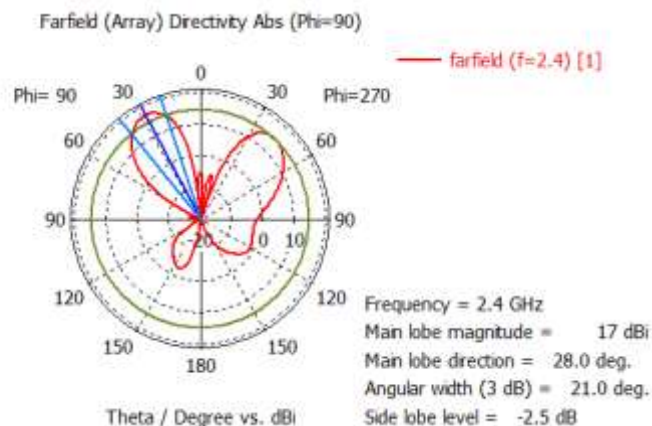
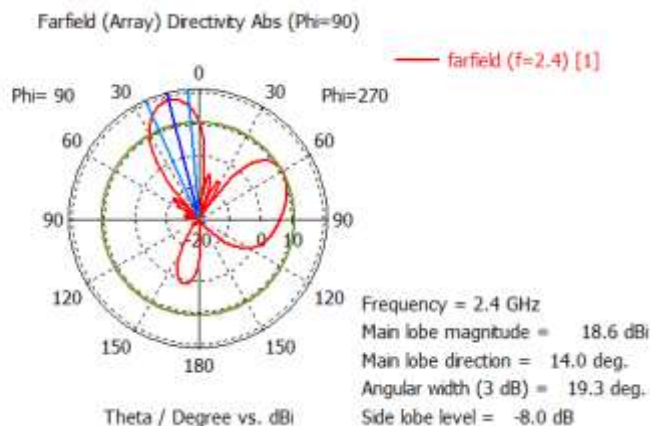


Analýza anténního pole 4x4 – vychylování hl. laloku I.

- Uniformní napájení – 15° a 30°

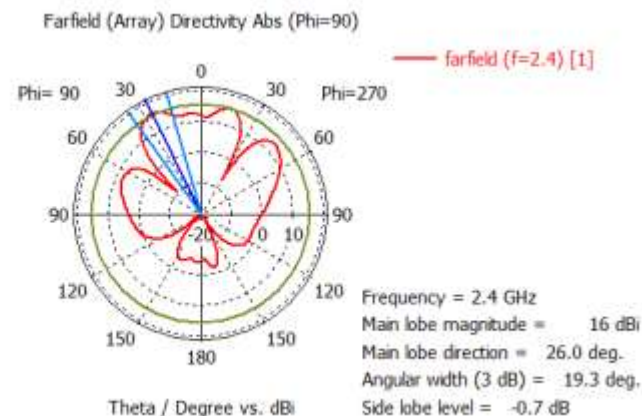
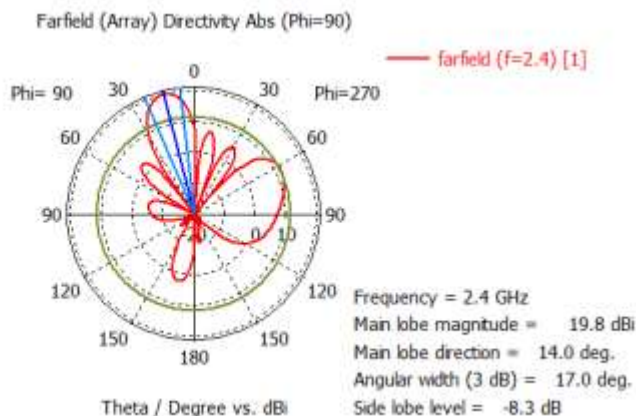


- Binomické napájení – 15° a 30°

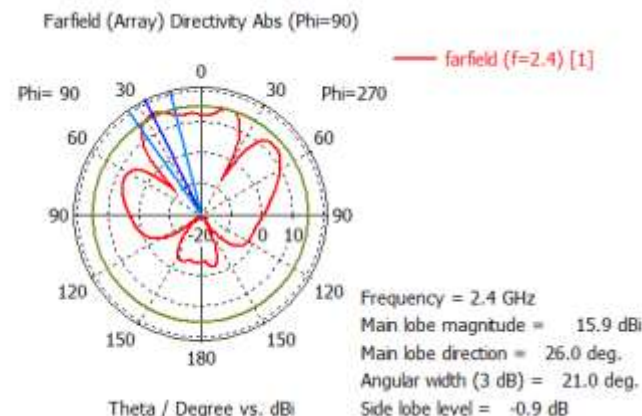
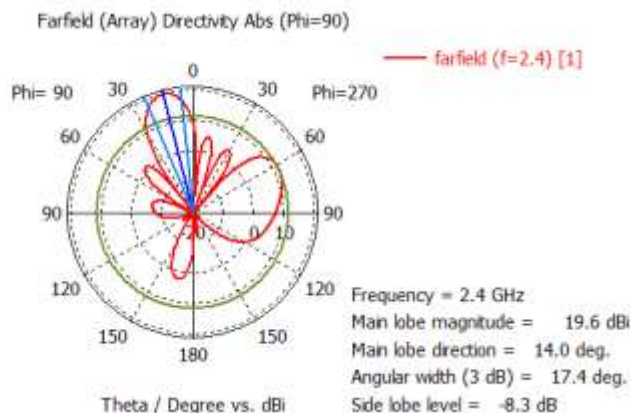


Analýza anténního pole 4x4 – vychylování hl. laloku II.

- Čebyšev 15dB napájení – 15° a 30°



- Taylor napájení – 15° a 30°



Analýza anténního pole 4x4 – vychylování hl. laloku III.

- Vychýlení hlavního laloku 15°

Napájení	Maximální zisk [dB]	3 dB hlavní lalok [°]	Potlačení post. laloků [dB]
Uniformní	19,8	16,4	8,4
Binomické	18,6	19,4	8,0
Čebyšev 15dB	19,8	17,0	8,3
Taylor	19,6	17,4	8,3

- Vychýlení hlavního laloku 30°

Napájení	Maximální zisk [dB]	3 dB hlavní lalok [°]	Potlačení post. laloků [dB]
Uniformní	18,1	18,0	2,5
Binomické	17,0	21,0	2,5
Čebyšev 15dB	16,0	19,3	0,7
Taylor	15,9	21,0	0,9

Vybrané elektronické komponenty

- Peregrine PE44820
 - 8 bit int. posouvač fáze – minimální krok 1.4°
 - frekvenční rozsah 1.7 – 2.2 GHz (širokopásmový mód), 1.1 - 3 GHz (úzkopásmový mód).
 - Paralelní a sériová řídicí sběrnice, nastavitelná adresa
- Peregrine PE43705
 - 7 bit – krokový atenuátor s 0.25 dB minimálním krokem
 - frekvenční rozsah 0.05 – 8 GHz
 - Paralelní a sériová řídicí sběrnice, nastavitelná adresa
- Skyworks RFX2401C
 - ISM 2.4 GHz pásmo front end se dvěma RF přepínači
 - PA: 22dBm výstupním výkonem, 25 dB zisk
 - LNA: NF 2.5 dB, 12 dB zisk

Nejbližší cíle projektu:

- Realizace a test elementární antény a její mikrovlnné obvody.
- Simulace kompletního malého anténního pole o velikosti 4x4.
- Realizace kompletního jednoduchého anténního pole o velikosti 4x4
- Realizace řídicího software tohoto anténního pole

Dlouhodobé cíle projektu:

- Návrh a realizace většího anténního pole (s velikostí 8x8 lze dosáhnout až 26 dBi)
- Realizace kompletní antény plně nahrazující konvenční řešení
- Uvažovat o použití podobného konceptu pro VHF a UHF pásma.

Děkuji moc za pozornost

mpokorny@kae.zcu.cz

Radiokomunikace Pardubice 2019