

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Porovnání metod syntézy plošného anténního pole
Bc. David Tisoň

Diplomová práce
2020

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Tisoň**
Osobní číslo: **I17184**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Porovnání metod syntézy plošného anténního pole**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Úkolem studenta bude se teoreticky seznámit s několika typy metod syntéz anténních řad a polí. Student si důkladně nastuduje problematiku syntézy anténní řady. Seznámí se s různými metodami syntézy anténních řad založených na vhodné volbě amplitudy a fáze signálu na jednotlivých elementech (rovnoměrné rozložení, trojúhelníkové rozložení, gaussovo rozložení, Taylorovo rozložení, Dolph-Chebyshevovo rozložení, Fourierova syntéza a Woodwardova syntéza). Jednotlivé typy syntéz aplikuje na čtvercové anténní pole 8x8 elementů a naprogramuje je v GUI Matlabu. U jednotlivých typů syntéz půjde nastavovat jejich základní parametry a jejich změna se projeví na zobrazovaném vyzářovacím diagramu. Student porovná jednotlivé typy syntézy s ohledem na nejvyšší směrovost anténního pole a zároveň největší odstup postranních laloků.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

VOLAKIS, John Leonidas. Antenna engineering handbook. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2007. ISBN 9780071475747.

STUTZMAN, Warren L. a Gary A. THIELE. Antenna theory and design. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013. ISBN 9780470576649.

MILLIGAN, Thomas A. Modern antenna design. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2005. ISBN 0471457760.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zálabský

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

15. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



Ing. Jan Pidaněk, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2018

Prohlašuji:

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

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 5. 2020

David Tisoň

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Zálabskému, Ph.D. za odborné vedení a rady, které mi věnoval. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu a trpělivost v průběhu mého studia.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá zhodnocením a porovnáním metod syntézy anténního pole. Práce je rozdělena na několik částí. Nejdříve je popsáno vyzařování elementárních zdrojů, antén, anténních soustav a jsou zde dále zmíněny důležité parametry antén. V dalších částech jsou popsány vlastnosti metod syntéz anténního pole a je popsána aplikace vyvinutá k jejich vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Antény, Anténní pole, syntéza

TITLE

Comparison of methods for the synthesis of a planar antenna array.

ANNOTATION

The diploma thesis deals with the evaluation and comparison of methods of antenna array synthesis. Work is divided into several parts. There is description of radiation of elementary sources, antennas, antenna systems described here and important antenna parameters are further mentioned here. The following sections describe the properties of antenna array synthesis methods. Application developed to evaluate them is described here.

KEYWORDS

Antennas, antenna array, synthesis

OBSAH

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Seznam zkratek	13
Úvod	14
1 Záření elementárních zdrojů	15
1.1 Elementární elektrický dipól	15
2 Záření antén	17
2.1 Lineární antény	17
2.2 Záření anténních soustav	18
3 Parametry antén	19
3.1 Vyzařovací charakteristika	19
3.1.1 Šířka hlavního laloku	19
3.1.2 Odstup postranních laloků	20
3.1.3 Činitel zpětného záření	21
3.2 Účinnost antény	21
3.3 Směrovost antény	22
3.4 Zisk antény	22
3.5 Efektivní plocha antény	22
3.6 Šířka pásma antény	23
4 Anténní řady	23
4.1 Rozdělení anténních řad	23
4.1.1 Lineární anténní řady	24
4.1.2 Rovinné anténní řady	24
4.1.3 Konformní anténní řady	24
4.2 Činitel lineární anténní řady	24
5 Syntézy lineární anténní řady	26
5.1 Rovnoměrné rozložení	26

5.2	Dolph-Chebyshevova syntéza.....	27
5.3	Gaussova syntéza.....	28
5.4	Trojúhelníkové rozložení.....	30
5.5	Taylorova syntéza.....	31
5.6	Fourierova syntéza.....	34
5.7	Woodwardova syntéza.....	35
6	Aplikace pro syntézu anténních řad.....	38
6.1	Hlavní režimy aplikace.....	38
6.2	Mezelementová vzdálenost.....	39
6.3	Výpočet počtu zářičů.....	40
6.4	Výběr syntéz.....	40
6.4.1	Rovnoměrné rozdělení.....	41
6.4.2	Chebyshevova syntéza.....	41
6.4.3	Taylorova syntéza.....	42
6.4.4	Gaussova syntéza.....	42
6.4.5	Trojúhelníkové rozložení.....	42
6.4.6	Fourierova syntéza.....	43
6.4.7	Woodwardova syntéza.....	45
6.5	Zobrazení výsledků.....	45
6.5.1	3D graf.....	46
6.5.2	Dvourozměrné grafy.....	47
6.6	Uložení výsledků.....	48
7	Porovnání syntéz.....	49
7.1	Změna mezelementové vzdálenosti.....	49
7.2	Rovnoměrné rozložení.....	51
7.3	Gaussova syntéza.....	52
7.4	Trojúhelníkové rozdělení.....	54
7.4.1	Trojúhelníkové rozdělení pro sudý počet prvků.....	54
7.4.2	Trojúhelníkové rozdělení pro lichý počet prvků.....	55
7.4.3	Porovnání trojúhelníkových rozložení.....	57

7.5	Dolph-Chebyshevova syntéza.....	58
7.6	Taylorova syntéza	60
7.7	Porovnání Taylorovy a Chebyshevovy syntézy.....	62
7.8	Fourierova syntéza.....	63
7.9	Woodwardova syntéza.....	66
7.10	Porovnání Woodwardovy a Fourierovy syntézy	67
	Závěr	68
	Použitá literatura	70
	Seznam elektronických příloh	71

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – půlvlnný dipól	15
Obr. 2 – šířka hlavního laloku	20
Obr. 3 – odstup postranních laloků	21
Obr. 4 – rovnoměrné rozložení	26
Obr. 5 – Dolph-Chebysheva syntéza.....	28
Obr. 6 – Gaussova syntéza	29
Obr. 7 – Trojúhelníkové rozložení	31
Obr. 8 – Taylorova syntéza	33
Obr. 9 – Fourierova syntéza	35
Obr. 10 – Woodwardova syntéza	37
Obr. 11 – náhled aplikace.....	38
Obr. 12 – režimy aplikace	38
Obr. 13 – Mezielementová vzdálenost.....	39
Obr. 14 – rozměry anténního pole.....	40
Obr. 15 – zadání Chebyshevovy syntézy	41
Obr. 16 – zadání Taylorovy syntézy	42
Obr. 17 – amplitudy trojúhelníkového rozdělení	43
Obr. 18 – zadání Fourierovy syntézy	44
Obr. 19 – zadání požadovaného tvaru.....	45
Obr. 20 – výběr grafu	46
Obr. 21 – šířka svazku.....	46
Obr. 22 – rozměry pole	46
Obr. 23 – 3D graf	47
Obr. 24 – dvourozměrné grafy	48
Obr. 25 – uložení hodnot.....	48
Obr. 26 – mezielementová vzdálenost $0,5\lambda$ a $0,3\lambda$	49
Obr. 27 – mezielementová vzdálenost $0,5\lambda$ a $0,8\lambda$	50
Obr. 28 – difrakční laloky	51
Obr. 29 – srovnání Gaussovy syntézy.....	52
Obr. 30 – Gaussova syntéza pro malý počet prvků.....	53
Obr. 31 – trojúhelníkové rozdělení pro sudý počet prvků	54
Obr. 32 – trojúhelníkové rozdělení pro lichý počet prvků.....	55

Obr. 33 – činitel řady trojúhelníkového rozdělení pro pět prvků.....	56
Obr. 34 – porovnání činitele řady pro sudý a lichý počet prvků.....	57
Obr. 35 – Chebyshevova syntéza s odstupem laloků -40dB a -60dB	58
Obr. 36 – velké požadavky na Chebyshevovu syntézy	60
Obr. 37 – Taylorova syntéza s použitím čtvrtého a šestého řádu.....	61
Obr. 38 – porovnání Chebyshevovy a Taylorovy syntézy pro odstup -40 dB.....	62
Obr. 39 – porovnání Chebyshevovy a Taylorovy syntézy pro odstup -60 dB.....	63
Obr. 40 – Fourierova syntéza pro tvar kosenkanty	64
Obr. 41 – koeficienty Fourierovy syntézy.....	65
Obr. 42 – Fourierova syntéza pro tvar obdélníkového okna.....	65
Obr. 43 – Woodwardova syntéza pro tvar kosenkanty	66
Obr. 44 – porovnání Woodwardovy a Fourierovy syntézy	67

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: rovnoměrné rozložení	52
Tabulka 2: Gaussova syntéza	53
Tabulka 3: trojúhelníkové rozložení pro sudý počet prvků	55
Tabulka 4: trojúhelníkové rozložení pro lichý počet prvků	56
Tabulka 5: Dolph-Chebysheva syntéza pro -40 dB	59
Tabulka 6: Dolph-Chebysheva syntéza pro -80 dB	59
Tabulka 7: Taylorova syntéza čtvrtého řádu pro -60 dB.....	61
Tabulka 8: Taylorova syntéza šestého řádu pro -60 dB.....	62

SEZNAM ZKRATEK

SLL	Side Lobe Level, odstup postranních laloků
BW	Beam Width, šířka hlavního svazku

ÚVOD

V současné době jsou stále používanější anténní pole. Děje se tak díky jejich menším rozměrům a možnosti elektronického vychylování svazku, které umožňuje vyzařovat do okolí bez nutnosti mechanického otáčení anténního pole. Rostou tak požadavky na lepší vlastnosti anténních polí zejména co se týče úpravy jejich vyzařovacích charakteristik.

Cílem této práce je porovnání vybraných syntéz anténního pole a zhodnocení jejich vlivu na změnu tvaru činitele anténní řady.

V teoretické části této práce (kapitoly 1 až 5) je nejprve popsán princip vyzařování základních anténních elementů a následně také anténních řad a anténních soustav. Druhá kapitola popisuje nejpodstatnější parametry pro návrh anténních systémů, jako jsou například šířka svazku, odstup postranních laloků, směrovost a zisk. Dále je zde popsáno dělení anténních řad, výpočet činitele řady a celého vyzařovacího diagramu anténního systému. Nakonec jsou uvedeny vybrané syntézy anténních řad, jejich princip a výpočet.

V praktické části (kapitoly 6 a 7) je sestaven program v prostředí Matlab s grafickým uživatelským rozhraním, který má dvě základní funkcionality. Buď na základě známého počtu anténních elementů a jejich rozestupu vypočítá 3D vyzařovací diagram anténního pole nebo jeho řezy ve vertikální a horizontální rovině a určí patřičné šířky svazků pro uživatelem zvolené metody syntézy. Druhou variantou je, že uživatel nezná počet prvků anténního pole, ale zná požadovanou hodnotu šířky hlavního svazku a požadovaný odstup postranních laloků a vybere si vhodnou metodu syntézy, přičemž program vypočítá minimální potřebný počet prvků anténního pole nezbytný pro dosažení požadovaných parametrů. V obou případech SW vypočítá fázové a amplitudové rozložení signálu na jednotlivých prvcích anténního systému a umožní uložení těchto hodnot do souboru.

Velice podstatnou částí vytvořeného softwarového nástroje je možnost vytvářet požadovaný nestandardní či vychýlený tvar anténního diagramu s využitím Fourierovy nebo Woodwardovy syntézy. Uživatel zadá požadovaný počet zářičů a požadovaný tvar vyzařovacího diagramu ve vertikální a v horizontální rovině a program na základě těchto požadavků určí amplitudy a fáze signálu na jednotlivých prvcích anténního pole a opět umožní jejich uložení do souboru.

Nedílnou součástí praktické části je též porovnání parametrů vyzařovacích diagramů získaných různými metodami syntéz a různým nastavením mezielementových vzdáleností.

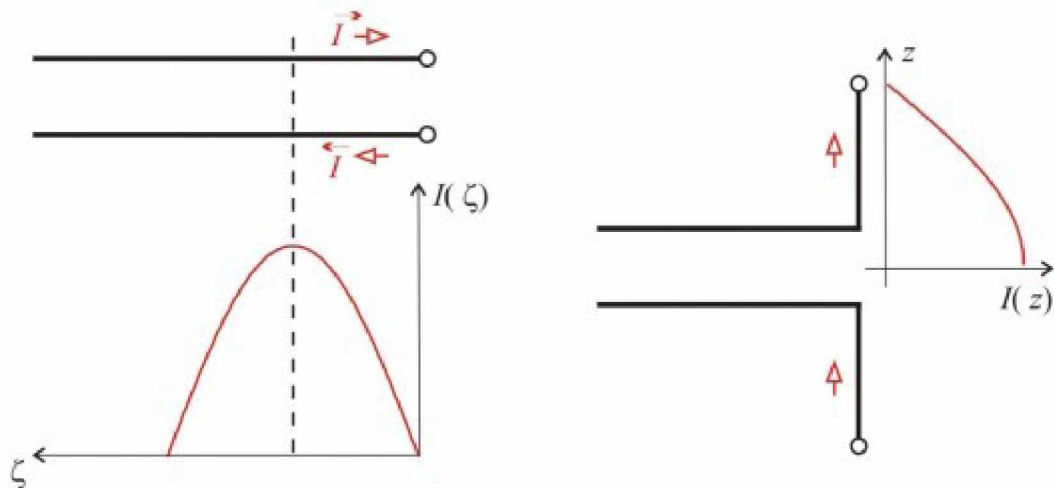
1 ZÁŘENÍ ELEMENTÁRNÍCH ZDROJŮ

Anténa se dá považovat na prvek, který převádí elektrický proud šířící se podél vedení na elektromagnetickou vlnu, která se šíří volným prostorem.

Za jednu z nejpoužívanějších antén lze označit elektrický dipól, na kterém lze princip vzniku elektromagnetické vlny dobře demonstrovat. [4]

1.1 Elementární elektrický dipól

Na dipól můžeme pohlížet jako na dvě vedení naprázdno (zakončené nekonečnou impedancí). Pokud konce vedení otočíme o 90° vznikne elektrický dipól. Mají-li jeho ramena délku $d=\lambda/4$ mluvíme o půlvlnném dipólu. [5]



Obr. 1 – půlvlnný dipól [5]

Pro popis vyzařování je potřeba znát především intenzitu elektrického a magnetického pole ve vzdálené oblasti od zdroje záření. Za předpokladu, že v okolí zářiče je vakuum (podobně pro čistý suchý vzduch) platí následující rovnice [4,5].

$$dE = 60I \left[j \frac{k}{2} \sin(\vartheta dz) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (1.1)$$

$$dH = \frac{dE}{120\pi} \quad (1.2)$$

Kde: k – vlnové číslo $k = 2\pi/\lambda$,

I – proud procházející zářičem,

dE – změna intenzity elektrického pole,

dH – změna intenzity magnetického pole,

ϑ – úhel vyzařování,

r – vzdálenost od bodu vyzařování.

Platí, že vektory E a H jsou navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé ke směru šíření r .

Člen $60I \frac{e^{-jkr}}{r}$, který je ve vztahu pro výpočet intenzity elektrického pole, je obsažen ve všech výpočtech intenzity pole lineárních antén a udává rozpínání intenzity elektrické energie v podobě kulové vlny.

Zbývá část výpočtu je unikátní pro každou anténu. Této části se říká Funkce záření antény.

Pro dipól platí:

$$F(\vartheta, \varphi) = j \frac{k}{2} \sin(\vartheta dz) \quad (1.3)$$

Pro výpočet intenzity elektrického pole pro libovolnou lineární anténu pak platí

$$E = 60IF(\vartheta, \varphi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (1.4)$$

2 ZÁŘENÍ ANTÉN

Anténu lze vnímat jako skupinu elementárních zdrojů, které do svého okolí vyzařují elektromagnetické vlnění. Při výpočtech musíme brát v úvahu, že vyzařování z jednoho elementárního zdroje se navzájem sčítá se zářením ostatních zdrojů. V bodě vzdáleném několik vlnových délek od antény dochází k fázovému posuvu vln z jednotlivých elementárních zdrojů, přičemž mohou nastat i dva krajní případy. Jednak se fáze vln může lišit o 180° , v takovém případě se vlny vzájemně odečtou, ale též se fáze vln mohou lišit o celé násobky 360° , v takovém případě se vlny sečtou.

2.1 Lineární antény

Lineární antény lze považovat za soubor několika elementárních dipólů, kde každý dipól vyzařuje vlastní vlnění. V bodě příjmu se sčítají příspěvky od jednotlivých členů lineární anténní řady. Vlivem jejich různých poloh vůči tomuto bodu se sčítají s různými amplitudami a fázemi, které jsou dány právě jejich polohou vůči bodu $E^{(P)}$. [4,5]

Intenzitu elektrického pole E v bodě P , která je dána součtem všech příspěvků v jednotlivých úsecích antény lze vypočítat dle rovnice 2.1.

$$E^{(P)} = \int_0^l 60I(z)j \frac{k}{2} \sin(\vartheta) dz \frac{e^{-jkr(z,\zeta)}}{r(z,\zeta)} \quad (2.1)$$

Kde: $I(z)$ – proud elementem záření,

l – délka antény,

z, ζ – vzájemně kolmé souřadnice bodu P .

Vezmeme-li v úvahu, že vysílací a přijímací anténa leží obvykle daleko od sebe může se vztah (2.1) zjednodušit a výpočet provést pouze pro vzdálenou zónu, kde platí, že rozměry antény jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností k bodu příjmu.

$$E(\vartheta) = 60j \frac{k}{2} \sin(\vartheta) \frac{e^{-jkr}}{r} \int_0^l I(z) e^{jk \cos(\vartheta) z} dz \quad (2.2)$$

2.2 Záření anténních soustav

Anténní soustava je tvořena více anténami napájenými ze stejného zdroje. Anténní soustavy vznikají hlavně kvůli jejich lepším vlastnostem z hlediska směrovosti.[4]

Jednotlivé antény (prvky) se zpravidla umísťují do jedné řady, obvykle se stejnými vzdálenostmi od sebe, poté mluvíme o lineárních anténních řadách.

Intenzita elektrického pole ve vzdáleném bodě je pak dána rovnicí 2.3

$$E^{(P)} = 60I_1F_0 \frac{e^{-jkr_1}}{r} + 60I_2F_0 \frac{e^{-jkr_2}}{r} + 60I_3F_0 \frac{e^{-jkr_3}}{r} + \dots \quad (2.3)$$

Kde: I_n – proudy na prvcích anténní soustavy,

r_n – vzdálenosti prvků soustavy od bodu příjmu.

Dosadí-li se místo absolutních hodnot vzdáleností jejich rozdíly od středu soustavy $r_i = r - \Delta r_i$ dostaneme vztah 2.4.

$$E^{(P)} = 60I_0F_0(\varphi, \vartheta)F_{sk}(\varphi, \vartheta) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.4)$$

Kde: F_{sk} – skupinová funkce záření daná vztahem

$$F_{sk}(\varphi, \vartheta) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{I_0} e^{jk\Delta r_i} \quad (2.5)$$

Záření anténní soustavy tedy závisí na volbě jednotlivých prvků reprezentovaných F_0 a na jejich rozmístění a buzení vyjádřeném funkcí F_{sk} .

3 PARAMETRY ANTÉN

Každá anténa či jejich soustava vyzařuje do svého okolí elektromagnetické vlnění odlišně. Základní představu o tom, jak anténa vyzařuje tuto energii do svého okolí udávají základní parametry antén.

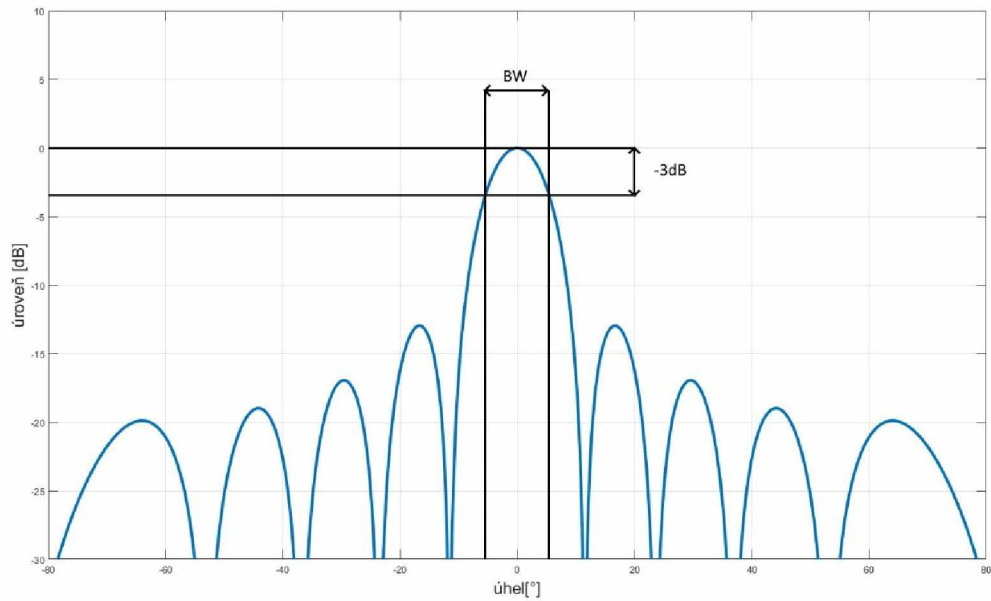
3.1 Vyzařovací charakteristika

Rozložení vyzařování elektromagnetické energie do okolí antény vyjadřuje vyzařovací charakteristika. Vyzařovací charakteristika graficky znázorní, jaká je intenzita elektrického pole, v závislosti na směru vyzařování antény. Tato charakteristika se obvykle určuje ve dvou směrech, a to v horizontálním a ve vertikálním. Spojením těchto diagramů dostaneme trojrozměrný diagram, díky kterému získáme představu o tom, jak anténa vyzařuje elektromagnetickou energii do svého okolí.

V odborné literatuře se často setkáme s pojmem výkonová vyzařovací charakteristika což je závislost vyzářeného výkonu na směru vyzařování. Pro směr vyzařování se obvykle používá kartézský souřadnicový systém nebo se diagram vyjádří v polárních souřadnicích.

3.1.1 Šířka hlavního laloku

Jednou z nejdůležitějších věcí, které nás u antény zajímají je šířka hlavního vyzařovacího svazku, tedy úhel, ve kterém vyzářený výkon v hlavním laloku poklesne o 3 dB. To znamená, že vyzářený výkon je o polovinu menší než výkon vyzářený ve směru maxima.



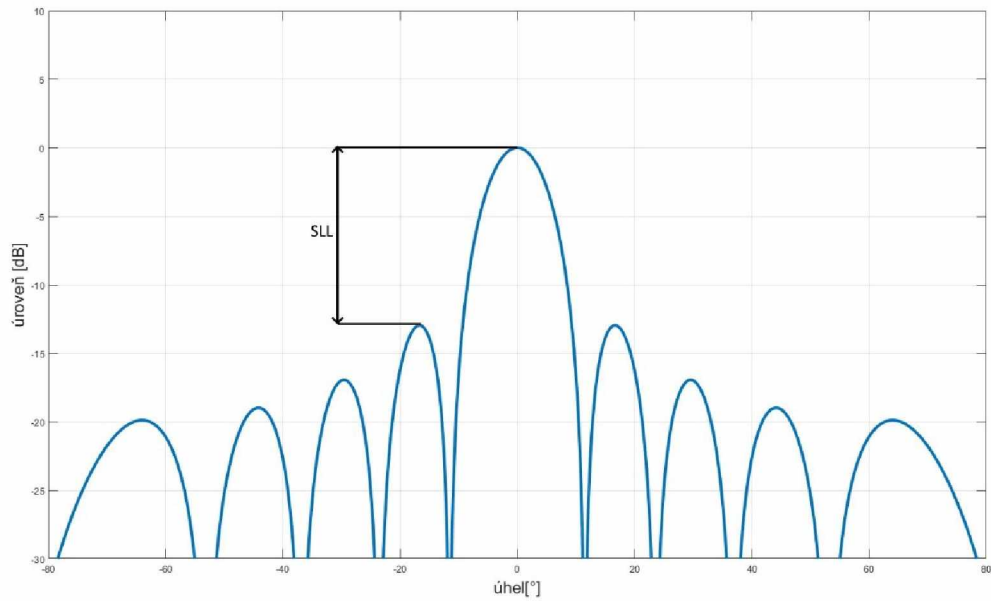
Obr. 2 – šířka hlavního laloku

3.1.2 Odstup postranních laloků

Kromě směru hlavního laloku se příspěvky od dílčích částí antény sčítají i v dalších směrech vyzařování.

Vznikají tak lokální maxima, která se střídají s minimy. Body mezi minimy se nazývají laloky.

Odstup postranních laloků se definuje jako rozdíl mezi amplitudy vyzařování ve směru maxima a nejvyšší hodnotou amplitudy jiného než hlavního laloku. Hodnota tohoto parametru se obvykle udává v dB a označuje se jako SLL (Side Lobe Level).



Obr. 3 – odstup postranních laloků

3.1.3 Činitel zpětného záření

Činitel zpětného záření je poměr mezi intenzitou elektrického pole v maximu záření ve směru kolmém na přední část antény a intenzitou v opačném směru.

Běžně je také označován jako předozadní poměr a jeho hodnota se též obvykle udává v dB.

3.2 Účinnost antény

Účinnost antény je dána poměrem příkonu a výkonu, který anténa vyzáří do svého okolí.

Účinnost antény je definována vztahem:

$$\eta = \frac{R_{vst}}{R_{vst} + R_{ztr}} \quad (3.1)$$

Kde: R_{vst} – odpor záření antény

R_{ztr} – ztrátový odpor antény

Pro dosažení vysoké účinnosti antény je nutné, aby anténa měla buď malý ztrátový odpor nebo velký odpor záření.

3.3 Směrovost antény

Jeden z hlavních parametrů antény je její směrovost. Směrovost antény je poměr intenzity elektrického pole dané antény a antény referenční. Je zvykem uvádět směrovost antény v decibelech.[9]

$$D_{dB} = 20 \log \left(\frac{E_{max}}{E_{ref}} \right)^2 \quad (3.2)$$

Jako referenční anténa se obvykle předpokládá izotropická anténa. Izotropická anténa je teoretická vyzařující stejný výkon do všech směrů. Při výpočtu směrovosti antény oproti anténě izotropické se označí jednotky dB_i.

Druhou nejčastější referenční anténou pro výpočet směrovosti je půlvlnný dipól. Při tomto výpočtu se pak jednotky označí jako dB_d.

3.4 Zisk antény

Zisk antény se obvykle určuje ve směru maxima vyzařování a je definován jako hodnota směrovosti vynásobena účinností antény.[8]

$$G = 10 \log (\eta D_{max}) \quad (3.3)$$

3.5 Efektivní plocha antény

Efektivní plocha antény je pouze teoretické hodnota, která udává, jakou plochu má anténa v kolmém směru k šíření vln. Je tedy vždy menší než fyzická plocha antény.[8]

$$A = G \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.4)$$

3.6 Šířka pásma antény

Šířka pásma je rozsah frekvencí, ve kterých je anténa schopna přijímat nebo vysílat signál, aniž by její zisk ve směru maxima poklesl o požadovanou hodnotu. Rovněž musí platit, že v tomto pásmu se výrazně nezmění další vlastnosti antény jako vyzařovací charakteristika či její účinnost.

4 ANTÉNNÍ ŘADY

Soustava více identických zářičů tvoří anténní řadu. Výhodou anténních řad je možnost poměrně jednoduše ovlivňovat rozložení amplitudy a fáze na apertuře, a tak ovlivňovat vyzařovací charakteristiku celé anténní řady. Požaduje se zejména dosažení požadovaného tvaru a šířky hlavního laloku a obvykle též, aby postranní laloky byly co možná nejmenší. Další výhodou anténních řad je jejich velikost, jsou o dost menší než například antény reflektorové nebo čočkové. [1]

Velikou výhodou při použití anténních řad v radarové technice je možnost elektronického vychylování anténního svazku prostřednictvím nastavování vhodných fázových posuvů vysílaného signálu jednotlivými elementy anténní řady, což umožňuje elektronicky řídit směr záření i tvar anténního svazku. [1]

4.1 Rozdělení anténních řad

Dle rozložení anténních prvků můžeme anténní řady do tří skupin.

- Lineární
- Rovinné
- Komfortní

Anténní řady můžeme také rozdělit dle směru maxima vyzařování na dvě skupiny.

- Soufázové
- Protifázové

Soufázové anténní soustavy mají maximum vyzařování kolmé na anténní řadu. V tomto směru dochází ke sčítání fází ve všech anténní prvků. U soustav protifázových dochází ve směru kolmém na anténní řadu příspěvky jednotlivých prvků vyruší a anténa tímto směrem nezáří.

4.1.1 Lineární anténní řady

Lineární anténní řadu tvoří prvky, které leží na jedné přímce. Vzdálenost mezi jednotlivými prvky je ekvidistantní, mezi jednotlivými zářiči jsou tedy stejné vzdálenosti.

Lineární řady jsou obvykle tvořeny elementárními dipóly, trychtýři nebo patch anténami, ale obecně ji může tvořit jakýkoliv elementární zářič.

4.1.2 Rovinné anténní řady

Rovinná anténní řada vznikne spojením alespoň dvou lineárních anténních řad. Opět zde platí, že jednotlivé řady jsou v rovině a vzdálenosti mezi jednotlivými anténními prvky jsou stejné.

4.1.3 Konformní anténní řady

Na rozdíl od předchozích řad prvky konformní anténní řady neleží na jedné přímce, ale jejich tvar je přizpůsoben tvaru struktury, na kterou jsou namontovány. Typické bývá rozmístění anténních prvků do kruhu, aby bylo možné přijímat signál ze všech směrů.

4.2 Činitel lineární anténní řady

Předpokládáme-li, že lineární anténní řada je buzena vysokofrekvenčním napětím s kruhovým kmitočtem ω a komplexní amplitudou

$$A_n e^{-j\Psi_n} \quad (4.1)$$

Kde: n – pořadí vyzařovacího prvku

A_n – amplituda n -tého vyzařovacího prvku

Ψ_n – fáze signálu na n -tého vyzařovacího prvku

Můžeme vypočítat příspěvek jednotlivých elementů lineární anténní řady

$$A_n e^{-j\psi_n} \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}R}}{R} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}x_n \sin(\theta)} f_0(\theta, \Phi) \quad (4.2)$$

Kde: λ – vlnová délka

R – vzdálenost bodu od zářiče

x_n – poloha fázového středu n -tého vyzařovacího prvku

$f_0(\Theta, \Phi)$ – směrová charakteristika jednoho vyzařovacího prvku

θ, Φ – úhly azimutu a elevace viz obr. 1.4

poté lze směrovou charakteristiku antény zapsat jako součin směrových charakteristik jednotlivých anténních prvků a činitele anténní řady

$$f(\Theta, \Phi) = f_0(\theta, \Phi) \cdot f_{\text{ř}}(\theta) \quad (4.3)$$

zmíněný činitel anténní řady se vypočítá

$$f_{\text{ř}} = \frac{1}{C} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{-j\psi_n} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda}nd \cdot \sin(\theta)} \quad (4.4)$$

Kde: C – normalizační konstanta sloužící k tomu, aby $f_{\text{ř}} = 1$ v maximu vyzařování

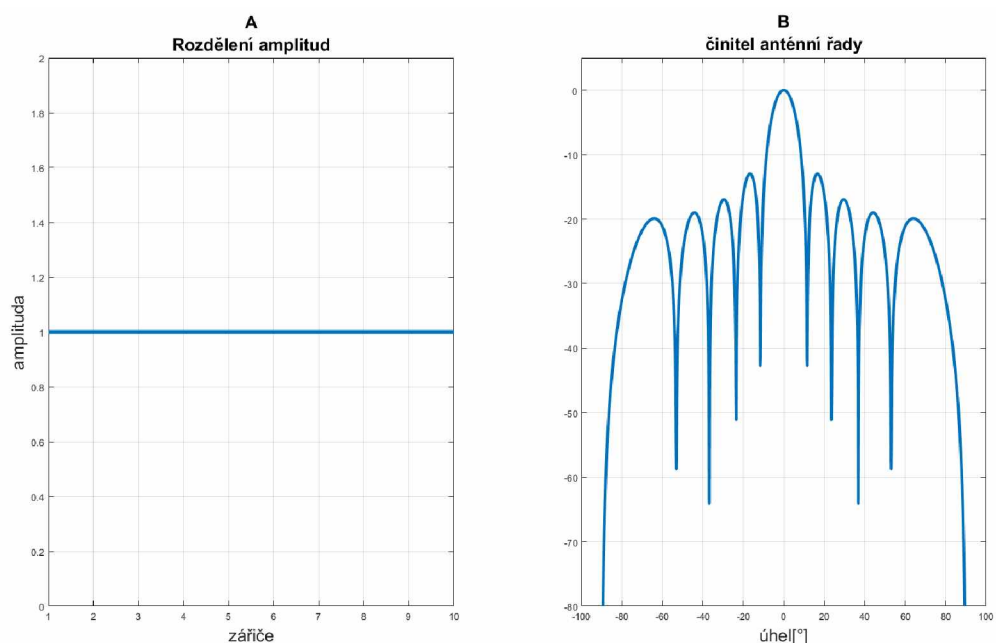
5 SYNTÉZY LINEÁRNÍ ANTÉNNÍ ŘADY

Syntéza anténních řad umožňuje nastavovat požadovaný tvar vyzařovacího diagramu. Nejčastěji se používá pro zmenšení postranních laloků a pro úpravu šířky a tvaru hlavního laloku. Dalším důvodem, proč využít syntézu je vychýlení hlavního svazku anténní řady.

Pro rovinné anténní řady, které vzniknou přidáním několika lineárních řad nad sebe se díky ortogonalitě počítá syntéza pro každou rovinu zvlášť, tedy jako pro lineární řadu.

5.1 Rovnoměrné rozložení

Nejjednodušší rozložením je tzv. rovnoměrné rozložení. Toto rozložení spočívá v tom, že všechny signály na anténních prvcích mají stejnou amplitudu i fázi.



Obr. 4 – rovnoměrné rozložení

Na Obrázku 4 je vidět příklad rovnoměrného rozdělení lineární anténní řady o 10 prvcích mezi nimiž je mezielementová vzdálenost $d = 0,5\lambda$. Na obrázku A je vidět, že všechny anténní prvky mají stejnou amplitudu. Na obrázku B vpravo je vykreslen činitel anténní řady.

5.2 Dolph-Chebysheva syntéza

Tato metoda počítá velikosti amplitud na jednotlivých anténních prvcích pomocí Chebyshevových polynomů. Výpočet má dvě varianty podle počtu anténních prvků, a to pro jejich sudý a lichý počet.[1] Pro výpočet je potřeba znát jaký odstup postranních laloků požadujeme, počet prvků lineární anténní řady. Amplitudy signálu pro anténní prvky se pak vypočtou dle rovnic 5.1 a 5.2.

Pro sudý počet prvků:

$$A_k = (2K - 1)x_0^{2k-1} \sum_{m=0}^{K-k} (-1)^{K-k-m} x_0^{2m} \frac{(K + k + m - 2)!}{m! (2k + m - 1)! (K - k - m)!} \quad (5.1)$$

Pro lichý počet prvků:

$$A_k = 2K x_0^{2k} \sum_{m=0}^{K-k} (-1)^{K-k-m} x_0^{2m} \frac{(K + k + m - 1)!}{m! (2k + m)! (K - k - m)!} \quad (5.2)$$

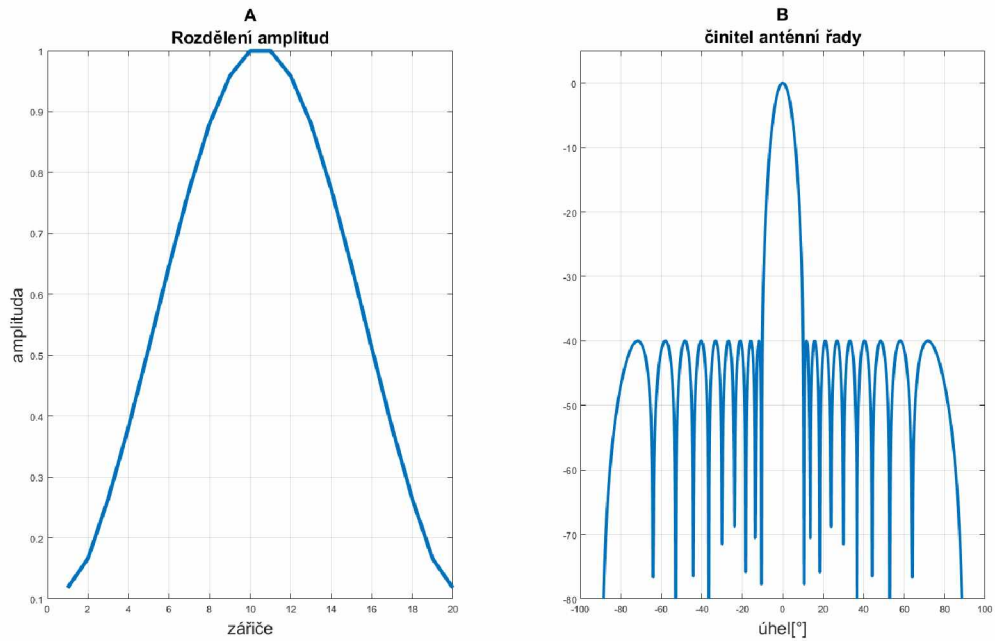
Kde: k je index anténního prvku,

K se rovná $N/2$ pro sudý počet prvků a $(N-1)/2$ pro lichý počet prvků,

m je řád Chebysheva polynomu,

$$x_0 = \frac{1}{2} [(C + \sqrt{C^2 + 1})^{\frac{1}{N-1}} + (C - \sqrt{C^2 + 1})^{\frac{1}{N-1}}],$$

C je žádaná hodnota potlačení postranních laloků.



Obr. 5 – Dolph-Chebyshevova syntéza

Na Obrázku 5 je vidět příklad Dolph-Chebyshevovy syntézy lineární anténní řady o 20 prvcích mezi nimiž je mezi elementová vzdálenost $d = 0,5\lambda$ a žadáným odstupem postranních laloků -40 dB. Na obrázku A je vidět rozložení amplitud, kde je vidět, že postranní elementy mají výrazně menší amplitudy. Na obrázku B vpravo je vykreslen činitel anténní řady, kde je vidět, že syntéza vyrovná všechny postranní laloky do jedné řady, z níž vyčnívá pouze hlavní lalok.

5.3 Gaussova syntéza

Tato syntéza využívá všeobecně známé Gaussovo rozdělení.

$$x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

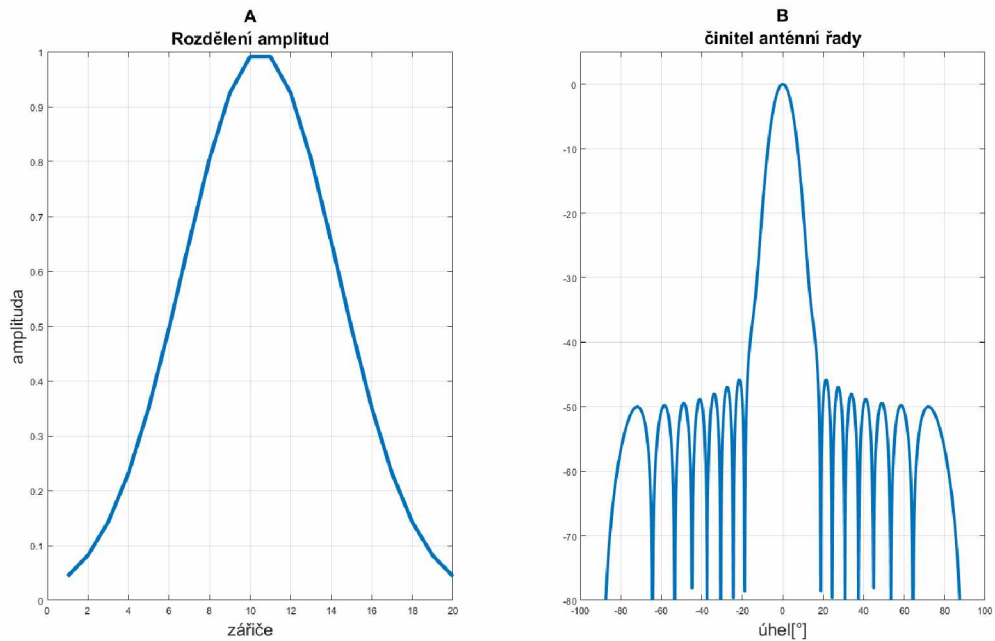
Jednotlivé koeficienty pro jednotlivé elementy lineární anténní řady se poté vypočtou dle rovnice 2.4 [3]

$$w(n) = e^{-\frac{1}{2}\left(\alpha\frac{n}{N-1}\right)^2} \quad (5.4)$$

Kde: n jsou jednotlivé anténní prvky

N je celkový počet anténních prvků

α je koeficient nepřímo úměrný směrodatné odchylce σ



Obr. 6 – Gaussova syntéza

Na Obrázku 6 je vidět příklad Gaussovy syntézy lineární anténní řady o 20 prvcích mezi nimiž je mezielementová vzdálenost $d = 0,5\lambda$. Na obrázku A je vidět rozložení amplitud, kde je vidět, že největší amplituda je na prvních uprostřed řady a po krajích klesá. Na obrázku B vpravo je vykreslen činitel anténní řady, na němž je vidět postupný útlum postranních laloků. Je vidět, jak je hlavní lalok úzký a u kořene se roztahuje do šířky.

5.4 Trojúhelníkové rozložení

Trojúhelníkové rozdělení je pojmenováno podle toho, jak vypadají koeficienty jednotlivých anténních prvků, ty totiž symetricky lineárně klesají směrem od středu a výsledek připomíná trojúhelník nebo „střechu“.

Aby na krajních anténních zářičích nebyla nulová amplituda a nebyly tak nevyužity volí se minimum, kterého můžou amplitudy dosáhnout.

Výpočet je rozdělen na dvě části podle toho, zda je index anténního prvku menší nebo větší než polovina z celkového počtu prvků.

Výpočet pro $n < N/2$

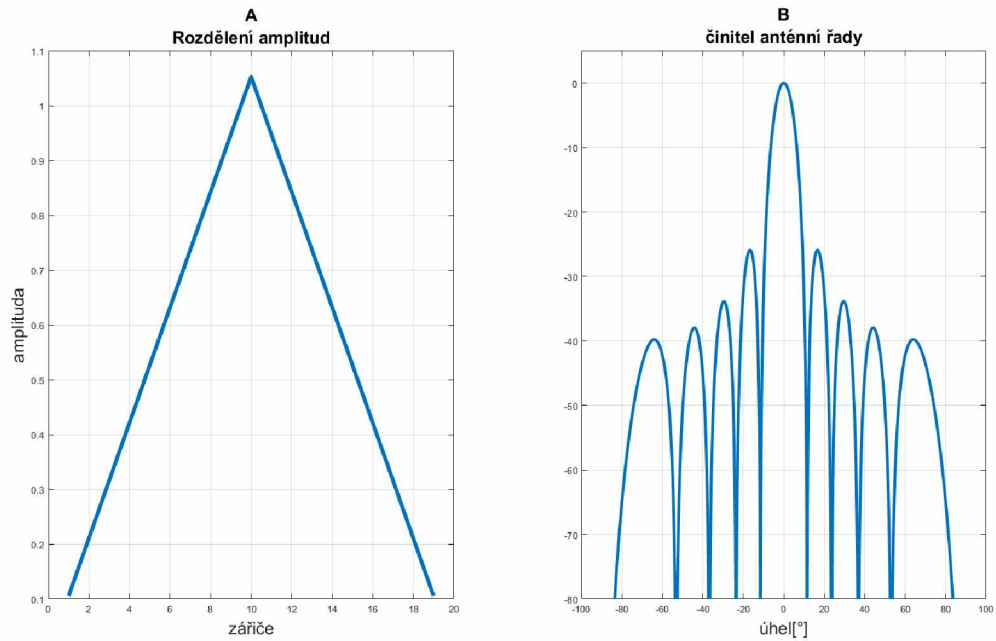
$$A_i = \frac{i}{N/2} \quad (5.5)$$

Výpočet pro $n > N/2$

$$A_i = \frac{(N + 1) - i}{N/2} \quad (5.6)$$

Kde: i je index anténního prvku,

N je celkový počet anténních prvků.



Obr. 7 – Trojúhelníkové rozložení

Na Obrázku 7 je vidět příklad trojúhelníkového rozdělení lineární anténní řady o 19 prvcích mezi nimiž je mezielementová vzdálenost $d = 0,5\lambda$. Na obrázku A je vidět rozložení amplitud, které připomíná trojúhelník. Na obrázku B vpravo je vykreslen činitel anténní řady, na němž je vidět, že postranní laloky, které jsou nejbližší k laloku hlavnímu nejsou tak dobře potlačeny jako u předchozích syntéz.

5.5 Taylorova syntéza

Tato syntéza využívá pro výpočet koeficientů Taylorovy polynomy. Stejně jako u Dolph-Chebyshevovy syntézy musíme znát požadovaný odstup postranních laloků a počet anténních prvků. Při výpočtu ještě musíme zadat řád Taylorova polynomu, který chceme pro výpočet použít.

$$A_n = 2 \sum_{m=1}^M F_m \cos \left(2\pi m \frac{k_n - \frac{1}{2}N + \frac{1}{2}}{N} \right) \quad (5.7)$$

Kde: M je řád Taylorova polynomu,

N je počet prvků anténní řady,

$k \in \langle 0, N-1 \rangle$,

F_m se vypočítá podle vzorce:

$$F_m = \frac{(-1)^{m+1} a_m}{2b_m} \quad (5.8)$$

Kde koeficienty a_m a b_m se vypočítají následovně

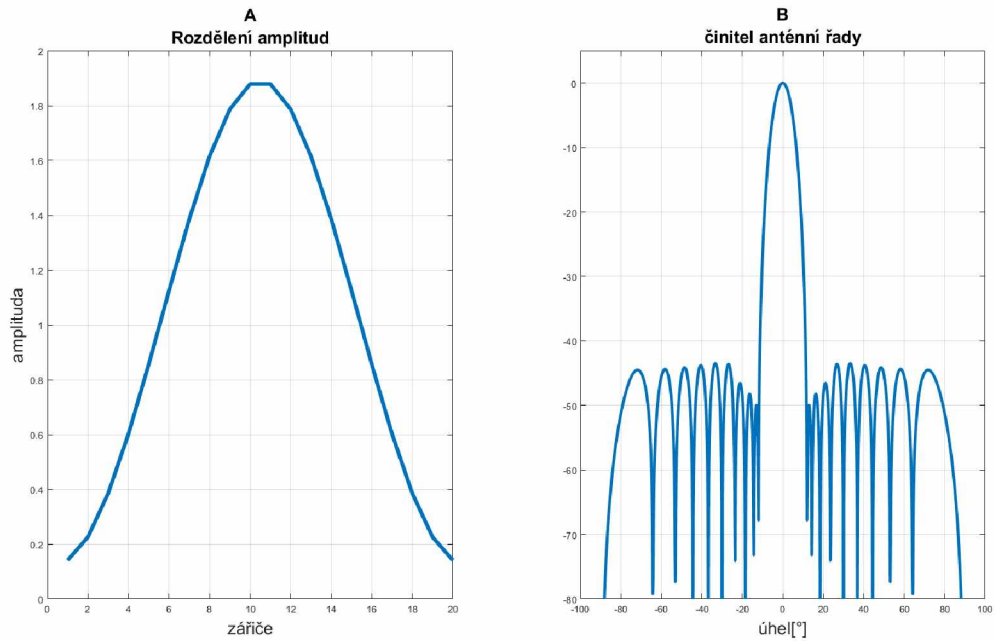
$$a_m = \text{prod} \left(\frac{1 - \frac{m^2}{\tau}}{A^2 + \left(x - \frac{1}{2}\right)^2} \right) \quad (5.9)$$

$$b_m = \text{prod} \left(\frac{1 - m^2}{y^2} \right) \quad (5.10)$$

Zde používané koeficienty se vypočtou:

$$\tau = \frac{M^2}{A^2 + \left(M - \frac{1}{2}\right)^2} \quad A = \frac{\cosh \left(10 \frac{SLL}{20} \right)}{\pi} \quad (5.11)$$

$$x = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m-1 \\ m+1 \\ \vdots \\ M \end{pmatrix} \quad y = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ M-1 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$



Obr. 8 – Taylorova syntéza

Na Obrázku 8 je vidět příklad Taylorovy syntézy lineární anténní řady o 20 prvcích mezi nimiž je mezelementová vzdálenost $d = 0,5\lambda$. Požadovaný odstup postranních laloků je -50 dB a byl zadán čtvrtý řád polynomu. Na obrázku A je vidět rozložení amplitud, které má podobný průběh jako mají předchozí syntézy, tedy větší amplitudy uprostřed anténní řady s klesáním amplitud na krajních prvních. Na obrázku B vpravo je vykreslen činitel anténní řady, kde je vidět, že odstup nejbližších postranních laloků je skutečně -50 dB, jak bylo požadováno. Nejvíce utlumeny jsou postranní laloky nejbliže hlavního laloku, což hlavní lalok zvýrazní.

5.6 Fourierova syntéza

Na rozdíl od předešlých syntéz Fourierova syntéza neovlivňuje pouze amplitudu na jednotlivých vyzařovacích prvcích, ale umožňuje měnit i fázi. Díky tomu je možné vytvarovat činitel řady do požadovaného průběhu.

Princip Fourierovy syntézy spočívá v rozkladu do Fourierovy řady (5.13), z níž se následně získají komplexní koeficienty (5.14). Amplitudy na jednotlivých zářičích se rovnají absolutním hodnotám komplexních koeficientů a fáze argumentům komplexních čísel. [6]

$$f_d(\omega) = K \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{(j2\pi n(\frac{d}{\lambda})\omega)} \quad (5.13)$$

Kde: K je normalizační konstanta,

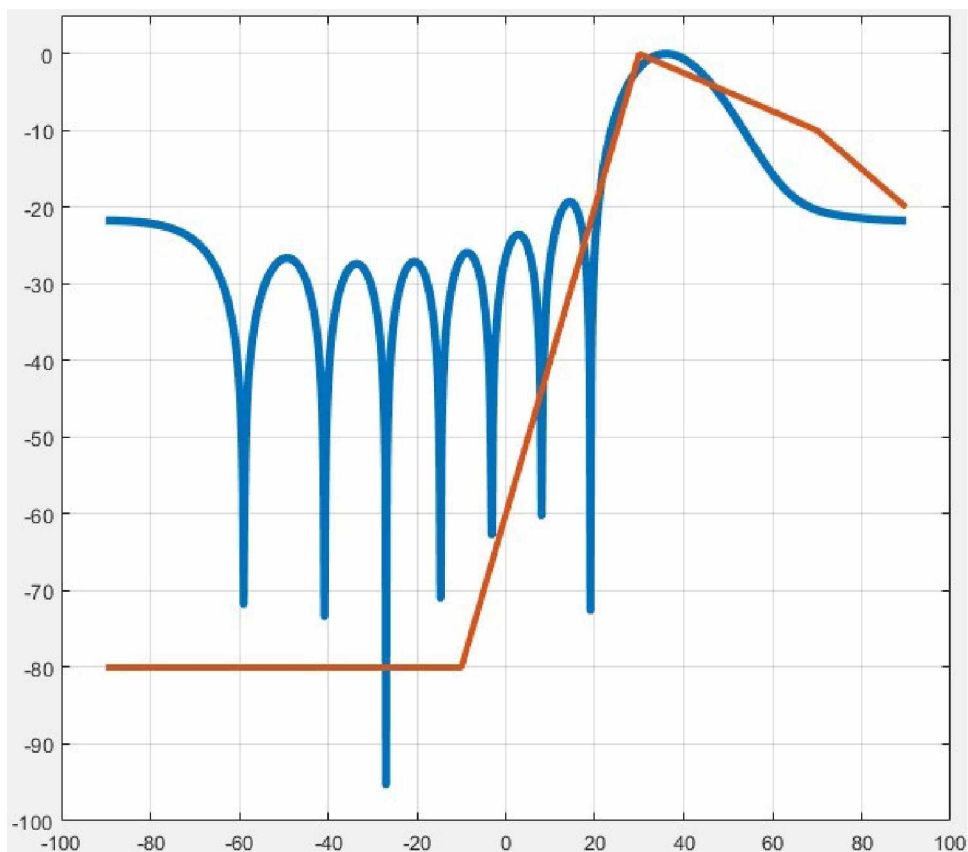
n je index vyzařovacího prvku,

d je vzdálenost mezi vyzařovacími prvky,

$\omega = \cos(\theta)$

A_n jsou Fourierovy koeficienty.

$$A_n = \frac{d}{\lambda} \int_{-d/\lambda}^{d/\lambda} f_d(\omega) e^{(j2\pi n(\frac{d}{\lambda})\omega)} d\omega \quad (5.14)$$



Obr. 9 – Fourierova syntéza

Na první pohled je vidět, že se Fourierova syntéza od předešlých výrazně liší. Červeně je vykreslen požadovaný průběh činitele anténní řady a modře pak výsledný průběh dosažený Fourierovou syntézou. Je vidět, že Fourierova syntéza zcela nevystihuje požadovaný průběh, ale snaží se mu co nejvíce přiblížit. Také je vidět, že maximum vyzařování není na 0° jak je tomu u amplitudových metod syntéz, ale může se posouvat do daného směru vyzařování dle zadání.

5.7 Woodwardova syntéza

Woodwardova syntéza, podobně jako Fourierova, umožňuje tvarování činitele řady do požadovaného tvaru. Tato metoda je založena na Fourierově metodě, ale předpokládá rozklad jednotlivých členů na harmonické funkce $\sin(x)/x$. výsledek je pak dán součtem jednotlivých přírůstků od každého anténního zářiče (5.15). [6,7]

$$AF(\theta) = \sum_{m=-M}^M b_m \frac{\sin \left[\frac{N}{2} kd(\cos\theta - \cos\theta_m) \right]}{N \sin \left[\frac{1}{2} kd(\cos\theta - \cos\theta_m) \right]} \quad (5.15)$$

Kde: m – index vyzařovacího prvku,

M – počet vyzařovacích prvků,

$N = 2M + 1$,

b_m – požadovaná amplituda,

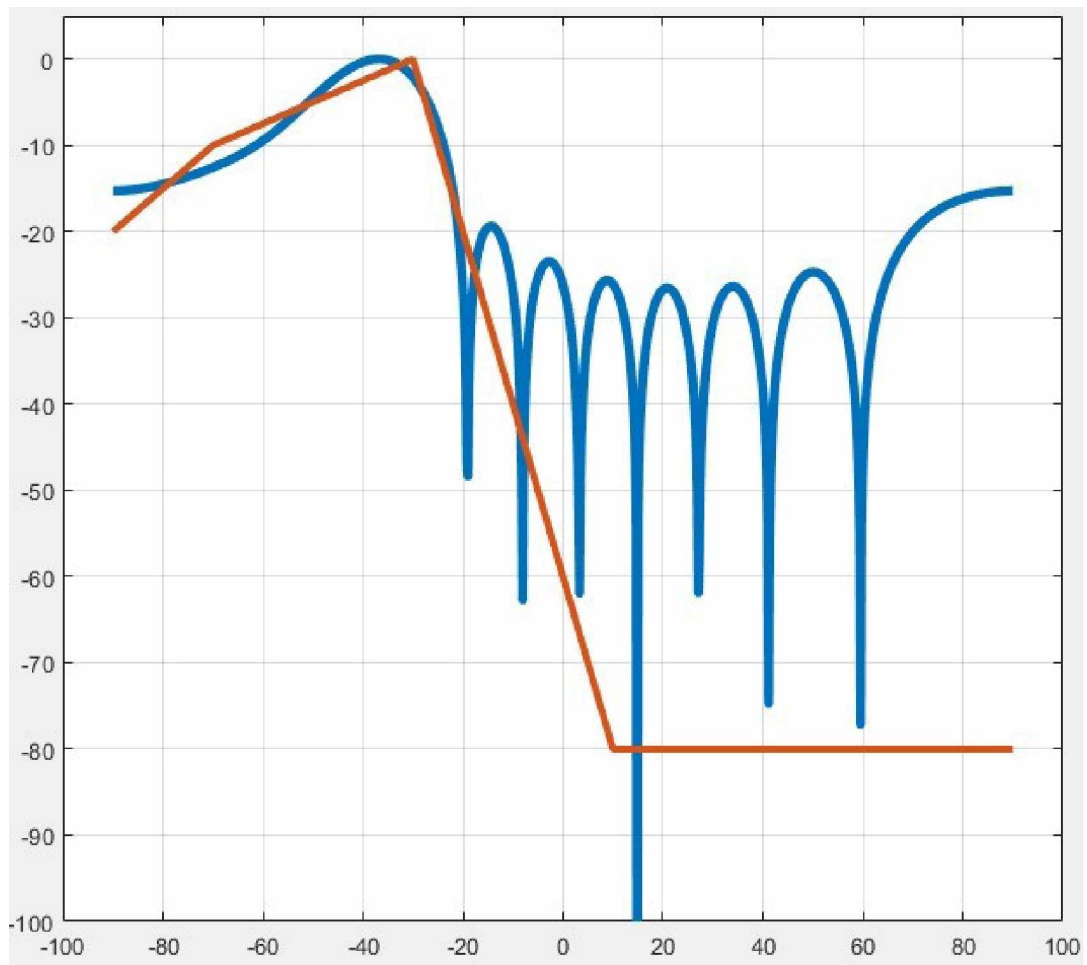
d – vzdálenost mezi jednotlivými zářiči,

$k = 2\pi/\lambda$.

koeficienty pro jednotlivé vyzařovací prvky se pak spočítají dle rovnice 5.16.

$$i_m = \frac{1}{N} \sum_{n=-M}^M b_m^{-j2\pi \left(\frac{md}{\lambda} \right) w_n} \quad (5.16)$$

Kde: $w_n = n/L\lambda$, L je délka antény

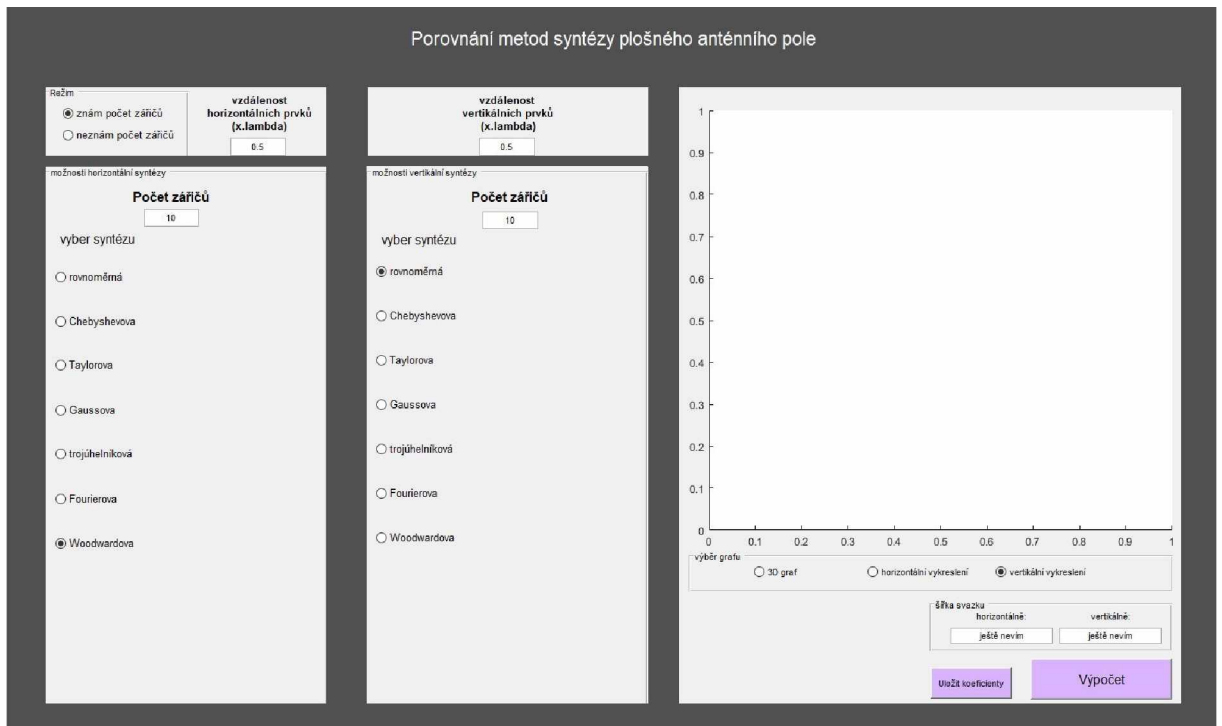


Obr. 10 – Woodwardova syntéza

Je vidět, že Woodwardova syntéza stejně jak je tomu u Fourierovy syntézy, se snaží vystihnout požadovaný průběh činitele anténní řady, jejich výsledky však nejsou totožné a každá z těchto syntéz vystihne požadovaný průběh odlišně.

6 APLIKACE PRO SYNTÉZU ANTÉNNÍCH ŘAD

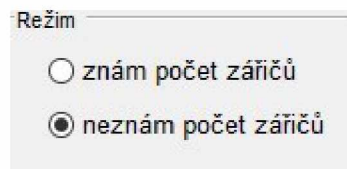
Pro možnost porovnání syntéz plošného anténního pole byla vytvořena aplikace v prostředí Matlab GUI (obr. 11), ve které je možno aplikovat vybrané syntézy na anténní pole požadované velikosti, či podle šířky hlavního svazku a dalších požadovaných parametrů zjistit, jak velké anténní pole bude potřeba.



Obr. 11 – náhled aplikace

6.1 Hlavní režimy aplikace

Aplikace je rozdělena na dvě hlavní části podle toho, co od ní uživatel požaduje.



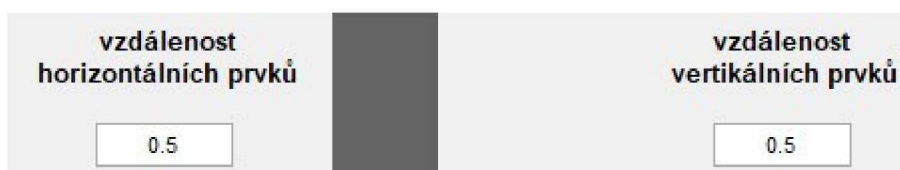
Obr. 12 – režimy aplikace

V režimu Znáám počet zářičů je potřeba zadat počet zářičů anténního pole, mezielementovou vzdálenost a vybrat typ syntézy a aplikace dle zadaných požadavků vykreslí patričný činitel anténní řady.

V režimu Neznám počet zářičů je potřeba zadat požadovanou šířku hlavního svazku, mezielementovou vzdálenost a vybrat typ syntézy, která má být použita. Aplikace na základě požadovaných parametrů najde odpovídající velikost anténního pole.

6.2 Mezielementová vzdálenost

Při každém výpočtu v aplikaci je nutné znát mezielementovou vzdálenost jednotlivých anténních prvků. Aplikace umožňuje nastavit mezielementovou vzdálenost zvlášť pro horizontální směr vyzařování a zvlášť pro vertikální směr vyzařování.



Obr. 13 – Mezielementová vzdálenost

Mezielementová vzdálenost určuje, jak daleko jsou od sebe jednotlivé elementy a je vztažena k vlnové délce.

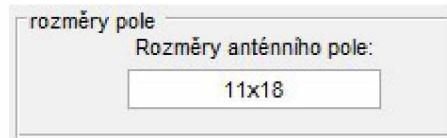
$$d = x \cdot \lambda \quad (6.1)$$

Do aplikace se zadává koeficient x , který je pak dosazen do dalších výpočtů. Výchozí hodnota je nastavena na 0,5, což odpovídá mezielementové vzdálenosti $d = \lambda/2$.

6.3 Výpočet počtu zářičů

Při zvolení možnosti Neznám počet zářičů aplikace vypočte rozměry anténního pole na základě zadaných hodnot. Hledání probíhá cyklickým navyšováním počtu anténních elementů, dokud není splněn požadavek odpovídající šířky hlavního laloku.

Po proběhnutí všech výpočtů je zobrazena minimální velikost anténního pole pro zadané požadavky.



Obr. 14 – rozměry anténního pole

6.4 Výběr syntéz

Jednou z hlavních částí aplikace je výběr syntézy anténní řady. Nabízené možnosti syntéz se liší podle toho, v jakém režimu je aplikace používána.

V případě režimu, kdy neznám počet anténních prvků je možno vybrat z těchto syntéz:

- Rovnoměrné rozdělení
- Chebyshevova syntéza
- Taylorova syntéza
- Gaussova syntéza
- Trojúhelníkové rozdělení

V režimu, kdy je počet anténních prvků znám, jsou na výběr kromě již zmiňovaných syntéz také další dvě syntézy.

- Fourierova Syntéza
- Woodwardova syntéza

Po výběru požadované syntézy je u syntéz, které to vyžadují nutno zadat ještě doplňující požadavky.

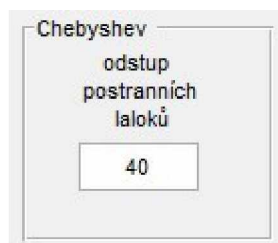
6.4.1 Rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení ke svému výpočtu nepotřebuje žádné další parametry.

U rovnoměrného rozdělení mají všechny anténní prvky stejnou amplitudu. V aplikaci se tedy po vybrání rovnoměrného rozdělení všem anténním prvkům přiřadí velikost amplitudy rovna jedné.

6.4.2 Chebyshevova syntéza

K výpočtu Chebyshevovy syntézy je zapotřebí znát kromě základních parametrů anténní řady ještě požadovaný odstup postranních laloků. Po vybrání možnosti Chebyshevovy syntézy se tedy aplikace ještě zeptá na odstup postranních laloků (viz. Obr. 15).

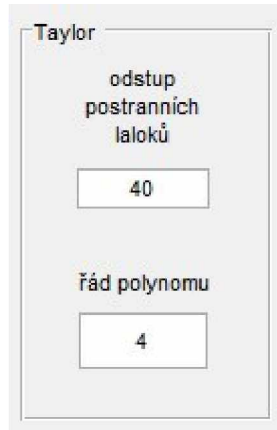


Chebyshev
odstup
postranních
laloků
40

Obr. 15 – zadání Chebyshevovy syntézy

6.4.3 Taylorova syntéza

Pro výpočet Taylorovy syntézy je třeba navíc znát odstup postranních laloků, stejně jako u Chebyshevovy syntézy, a k tomu ještě řád Taylorova polynomu (viz. Obr. 16), pro který se budou provádět potřebné výpočty.



The image shows a software interface window titled "Taylor". It contains two input fields. The first field is labeled "odstup postranních laloků" (side lobe spacing) and has the value "40" entered. The second field is labeled "řád polynomu" (polynomial order) and has the value "4" entered.

Obr. 16 – zadání Taylorovy syntézy

6.4.4 Gaussova syntéza

Gaussova syntéza nepotřebuje žádné další parametry, aby se mohl uskutečnit výpočet.

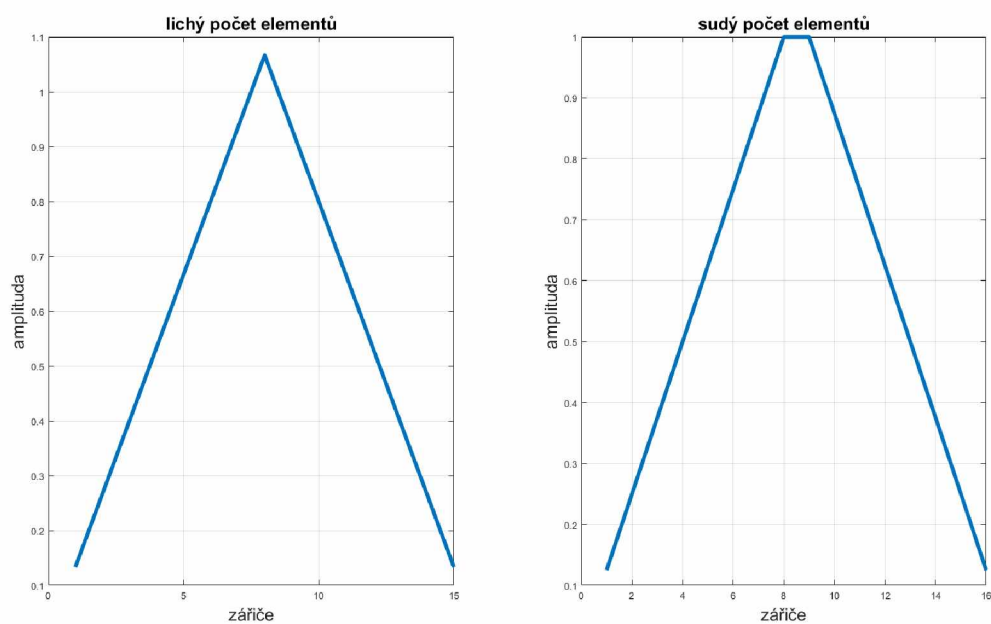
Po zvolení možnosti Gaussovy syntézy aplikace provede výpočet činitele anténní řady a výpočet anténních koeficientů viz. Kapitola 5.3.

6.4.5 Trojúhelníkové rozložení

Pro výpočet trojúhelníkového rozložení již není potřeba zadávat žádné další požadavky.

Pro lichý počet anténních prvků tvoří jednotlivé amplitudy typický trojúhelník, podle něhož je syntéza pojmenována. Pro sudý počet prvků mají dva středové prvky stejnou amplitudu viz. Obrázek 17.

Při výpočtu trojúhelníkového rozložení by za normálních okolností na krajních anténních prvcích byly nulové hodnoty amplitud, tudíž by tam tyto zářiče ani nemuseli být. V aplikaci je na krajních prvcích anténní řady zvolena minimální amplituda o hodnotě 0,1.



Obr. 17 – amplitudy trojúhelníkového rozdělení

6.4.6 Fourierova syntéza

Fourierova syntéza je kvůli svým složitějším výpočtům použita pouze v režimu, kdy znám počet zářičů.

U Fourierovy syntézy je potřeba zadat požadovaný tvar činitele anténní řady. Po výběru Fourierovy syntézy se tedy zobrazí nabídky pro zadání požadovaného tvaru.

vyber syntézu

rovnoměrná

Chebyshevova

Taylorova

Gaussova

trojúhelníková

Fourierova

Woodwardova

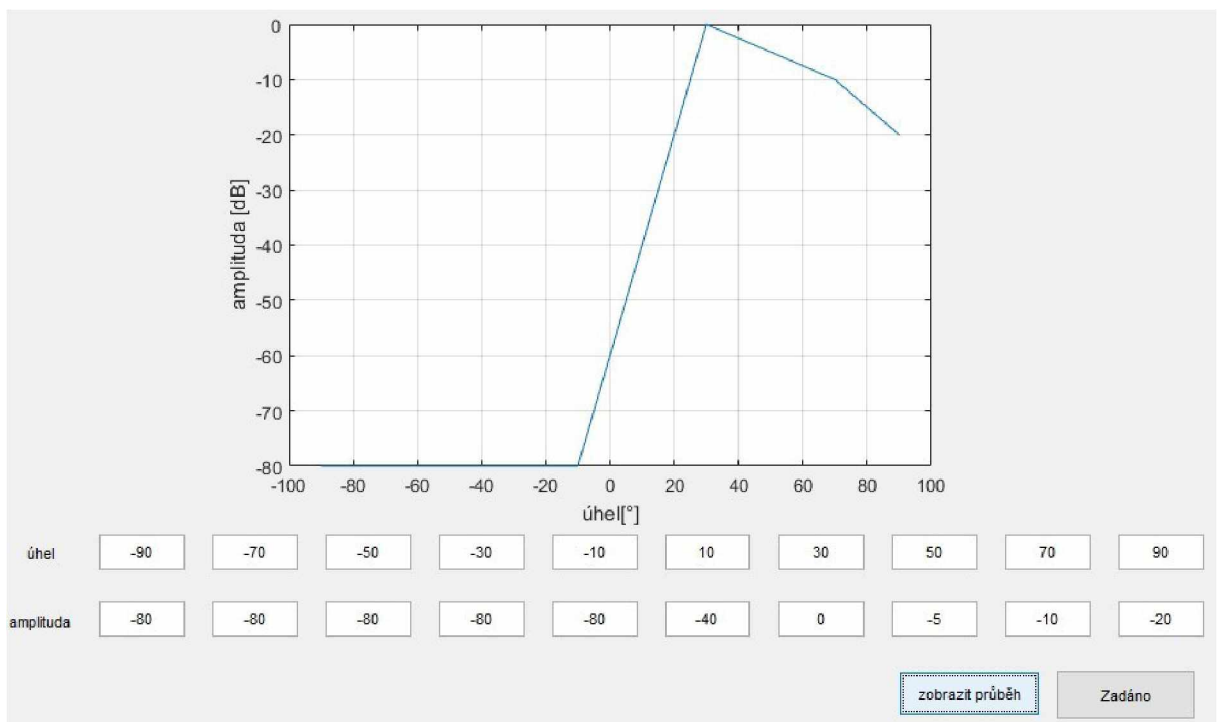
zadat parametry

Obr. 18 – zadání Fourierovy syntézy

Po výběru možnosti zadat parametry se otevře nové dialogové okno k zadání požadovaného tvaru činitele řady (viz. Obr. 19). Uživatel zde může zvolit úhel, do kterého anténní pole vyzařuje, a pro daný úhel pak požadovanou amplitudu s jakou by v něm anténní řada měla vyzařovat.

Počet oken pro nastavení požadovaného průběhu je pevně stanoven na 10 polí, kterými by měl být uživatel schopen popsat požadovaný tvar.

Po zadání požadovaného tvaru má uživatel možnost tvar vykreslit a případně ještě upravit. Po nastavení požadovaného tvaru se dialogové okno stiskem tlačítka Zadáno zavře a požadovaný tvar se uloží.



Obr. 19 – zadání požadovaného tvaru

6.4.7 Woodwardova syntéza

U Woodwardovy syntézy probíhá zadávání dalších požadavků stejně jako tomu je u syntézy Fourierovy.

6.5 Zobrazení výsledků

Na pravé straně aplikace se nachází veškeré výsledky, které se provedou po výpočtu. Největší prostor zaujímá vykreslení grafů. Uživatel má možnost vybrat si ze tří možností podle toho, co si přeje vykreslit.

výběr grafu

3D graf horizontální vykreslení vertikální vykreslení

Obr. 20 – výběr grafu

Kromě grafů dává aplikaci i informaci o šířce svazku vykresleného činitele řady. Šířku svazku aplikace změří v horizontální i vertikální rovině.

šířka svazku

horizontálně:	vertikálně:
9.7297	7.3874

Obr. 21 – šířka svazku

Pokud je aplikace v režimu, kdy má zjistit, jak velké anténní pole bude potřeba ke splnění zadaných požadavků, zobrazí se ještě okno, kde jsou tyto rozměry uvedeny.

rozměry pole

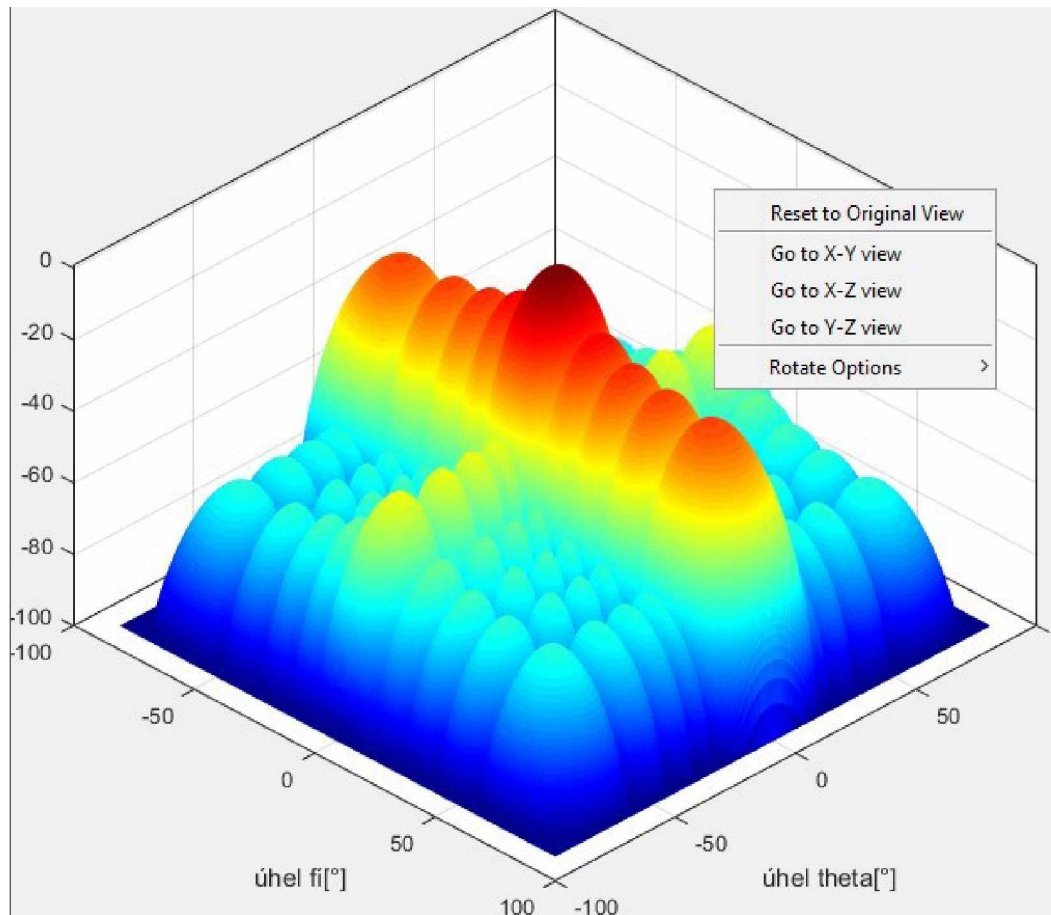
Rozměry anténního pole:
(horizontálně x vertikálně)

11x19

Obr. 22 – rozměry pole

6.5.1 3D graf

Jednou z možností pro zobrazení výsledků je 3D graf (viz Obr. 21). Graf vykreslí horizontální i vertikální složku v kartézských souřadnicích v rozmezí od -90° do 90° .



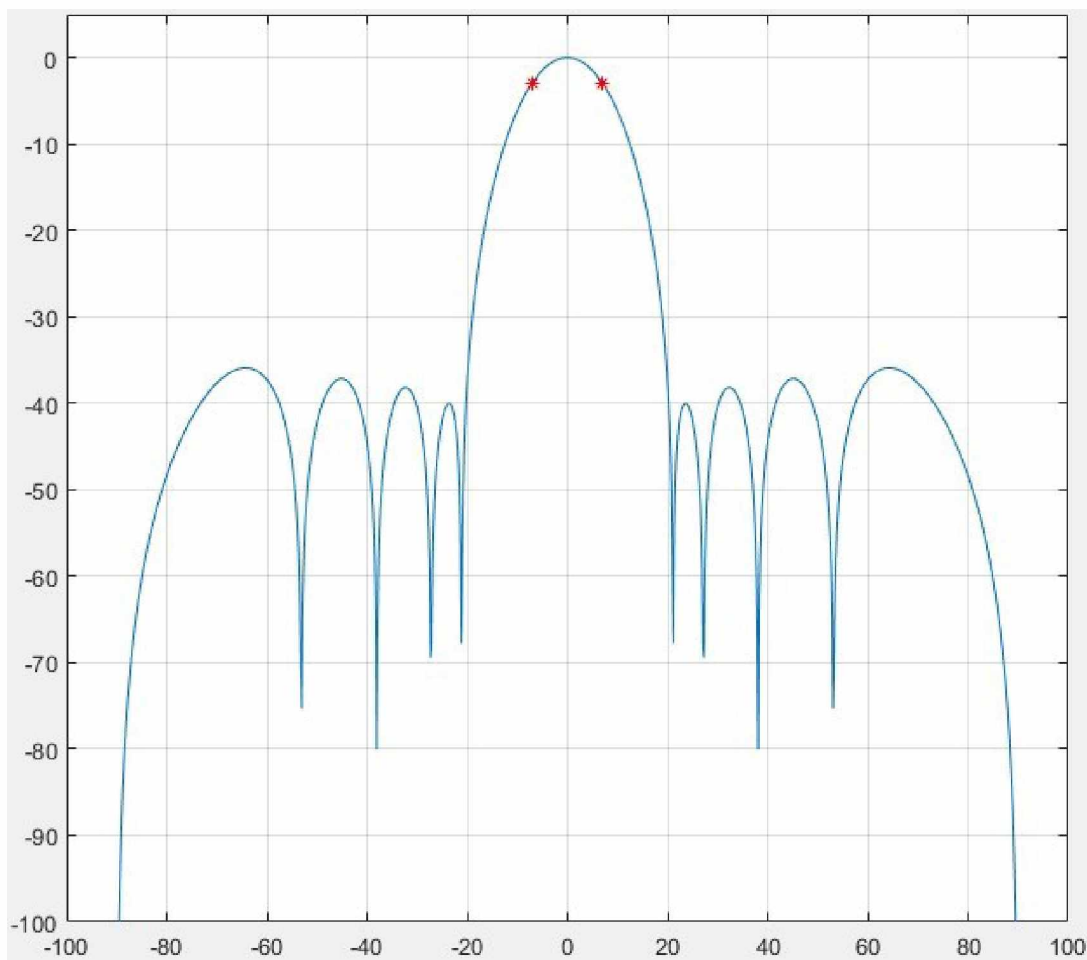
Obr. 23 – 3D graf

S grafem je možno rotovat a natáčet vykreslená data do všech směrů, tak aby uživatel mohl získat kompletní představu o vykreslených datech.

6.5.2 Dvourozměrné grafy

Další možností, jak si uživatel může prohlédnout vykreslená data je horizontální a vertikální vykreslení. Vykreslený graf je řezem horizontální (vertikální) osou.

V těchto grafech je také pomocí červených bodů vyznačena šířka hlavního svazku, tedy pokles o 3 dB.



Obr. 24 – dvourozměrné grafy

6.6 Uložení výsledků

Aplikace umožňuje uložit hodnoty amplitud na jednotlivých anténních prvcích. Uložení se provede po stisknutí příslušného tlačítka (Obr. 25). Hodnoty amplitud anténních prvků se uloží do matice v souboru ve formátu .xls.

šířka svazku

horizontálně:	vertikálně:
<input style="width: 80%;" type="text" value="12.973"/>	<input style="width: 80%;" type="text" value="7.2072"/>

Uložit koeficienty

Výpočet

Obr. 25 – uložení hodnot

7 POROVNÁNÍ SYNTÉZ

V této kapitole budou zhodnoceny všechny vybrané syntézy, budou popsány jejich důležité a klíčové vlastnosti.

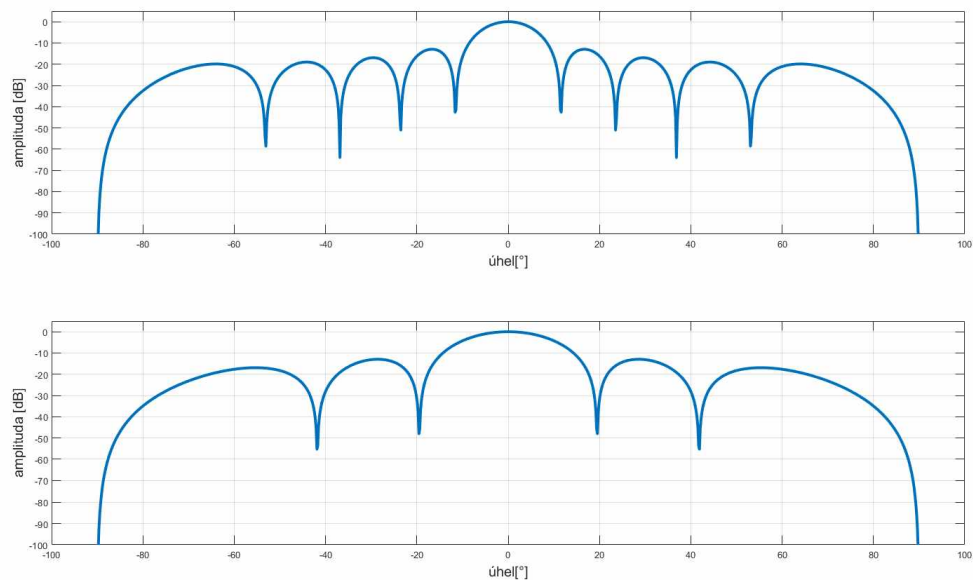
Všechny výsledky počítány pro mezelementovou vzdálenost $0,5\lambda$, není-li řečeno jinak.

7.1 Změna mezelementové vzdálenosti

Mezelementová vzdálenost je jeden ze základních údajů anténní řady a projeví se u každé syntézy anténního pole.

Mezelementová vzdálenost ovlivňuje především šířku hlavního laloku a počet postranních laloků. Na odstup postranních laloků má tato vzdálenost již menší vliv.

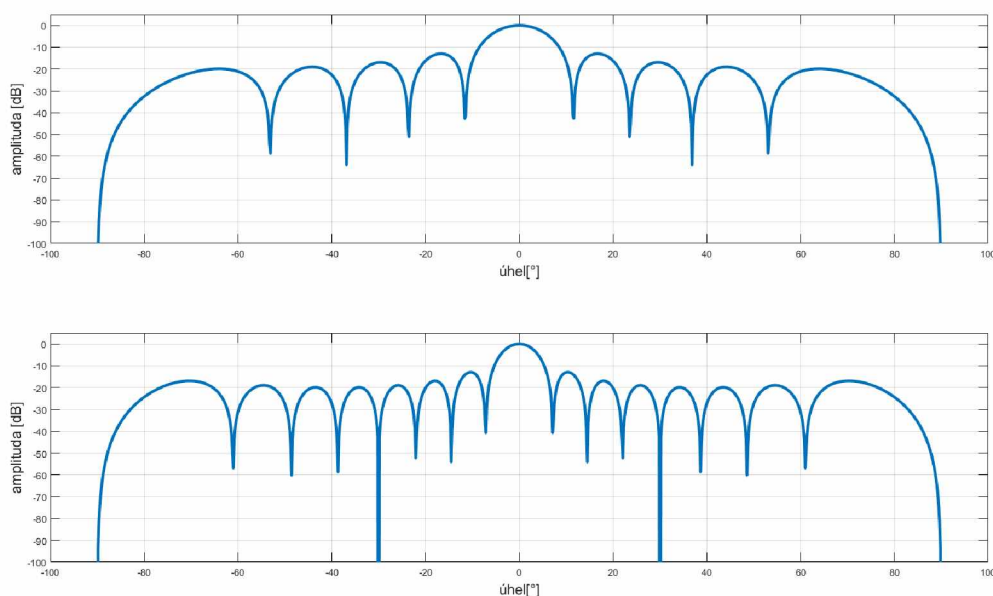
Mezelementová vzdálenost se udává jako vzdálenost mezi elementy vztažená k vlnové délce. Tato vzdálenost bývá u běžných anténních polí menší než 1.



Obr. 26 – mezelementová vzdálenost $0,5\lambda$ a $0,3\lambda$

Na obrázku 26 je vyobrazen činitel řady pro anténní řadu o deseti prvcích s rovnoměrným rozložením. Na horním obrázku je však mezielementová vzdálenost $0,5\lambda$ a na spodním obrázku se mezielementová vzdálenost rovná $0,3\lambda$.

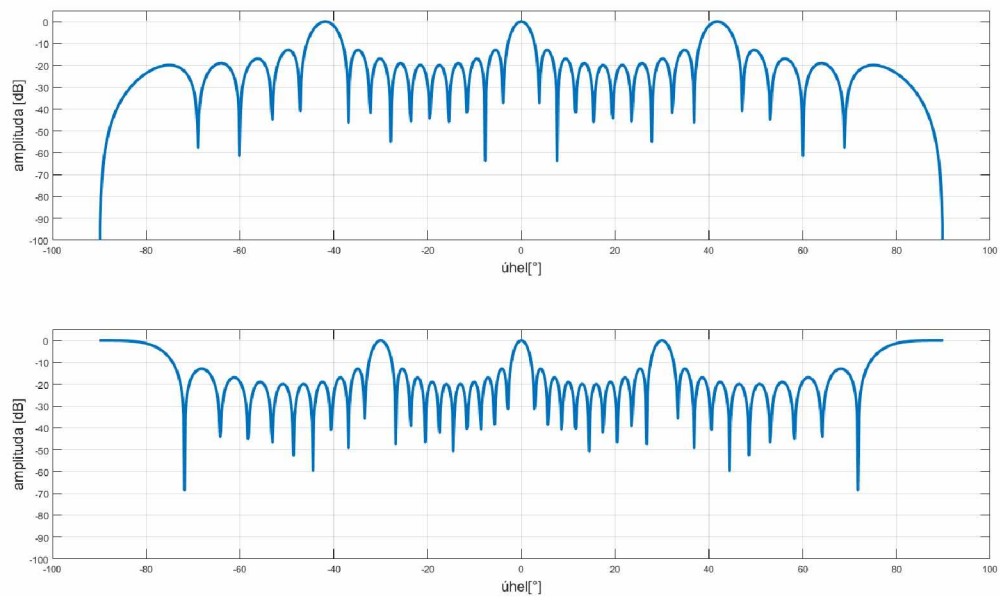
Je vidět změna počtu laloků. Při vzdálenosti $0,5\lambda$ je vidět 9 laloků, kdežto při změně vzdálenosti na $0,3\lambda$ je již vidět pouze 5 laloků. Rovněž se změnila také šířka hlavního svazku. Při vzdálenosti $0,5\lambda$ je šířka svazku menší, konkrétně $10,45^\circ$. Po změně mezielementové vzdálenosti se šířka svazku zvětšila na $17,3^\circ$.



Obr. 27 – mezielementová vzdálenost $0,5\lambda$ a $0,8\lambda$

Na obrázku 27 je vyobrazen činitel řady pro anténní řadu o deseti prvcích s rovnoměrným rozložením. Na horním obrázku zůstala mezielementová vzdálenost $0,5\lambda$ a na spodním obrázku se mezielementová vzdálenost rovná $0,8\lambda$.

Horní obrázek je stejný jako na obrázku 26. Na dolním obrázku je vidět, jak zvětšení mezielementové vzdálenosti na $0,8\lambda$ zvýšilo počet laloků, konkrétně na 15. S vyšším počtem laloků také došlo ke zmenšení šířky hlavního laloku na $6,85^\circ$.



Obr. 28 – difrakční laloky

Na obrázku 28 je vyobrazen činitel řady pro anténní řadu o deseti prvcích s rovnoměrným rozložením. Na horním obrázku je mezielementová vzdálenost $1,5\lambda$ a na spodním obrázku se mezielementová vzdálenost rovná 2λ .

Pokud je mezielementová vzdálenost větší než 1, začnou se objevovat difrakční laloky. Tyto laloky mají v krajním případě stejnou amplitudu jako hlavní lalok. Anténa tak vyzařuje velký výkon do více směrů.

7.2 Rovnoměrné rozložení

Rovnoměrné rozložení má všechny koeficienty anténních prvků stejné. Pro jeho vytvoření tedy nejsou potřeba žádné další úpravy anténní řady. Toto rozložení je výchozí rozložení a dobře poslouží k porovnání vlastností dalších syntéz, které již nemají všechny koeficienty anténní řady stejné.

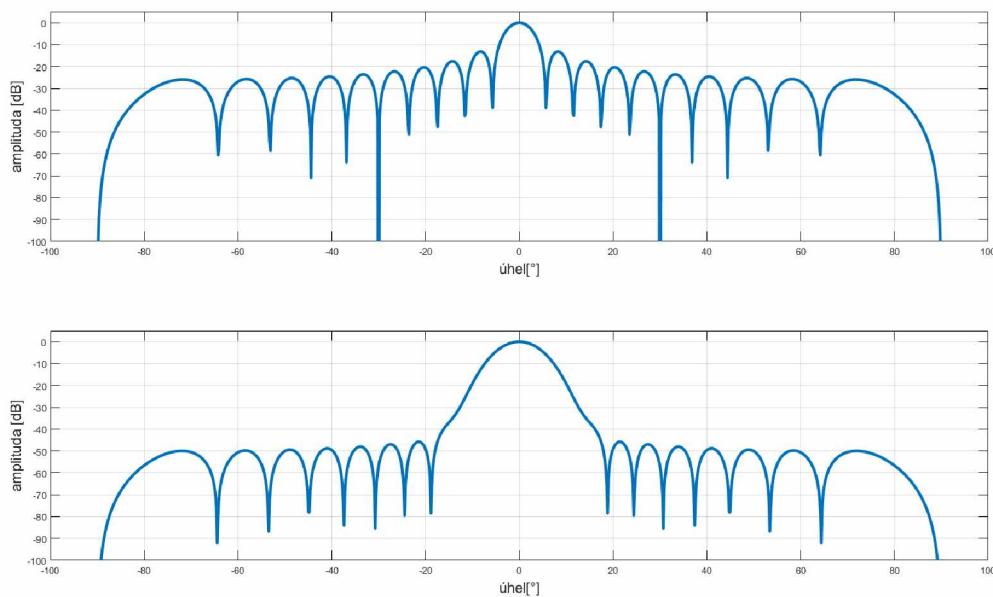
Vybrané základní parametry rovnoměrného rozložení jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: rovnoměrné rozložení

Počet prvků	5	10	15	20	30	40
Šířka svazku [°]	21,26	10,45	7,21	5,41	3,60	2,88
Odstup prvního laloku [dB]	-12,04	-12,97	-13,13	-13,19	-13,22	-13,24
Odstup posledního laloku [dB]	-13,98	-19,89	-23,57	-25,99	-29,52	-32,32

7.3 Gaussova syntéza

Velkou předností Gaussovy syntézy je výrazné zvětšení hlavního laloku. Hlavní lalok se nejen roztáhne, ale taky změní tvar. Tvar hlavního laloku připomíná křivku Gaussova (Normálního) rozdělení.



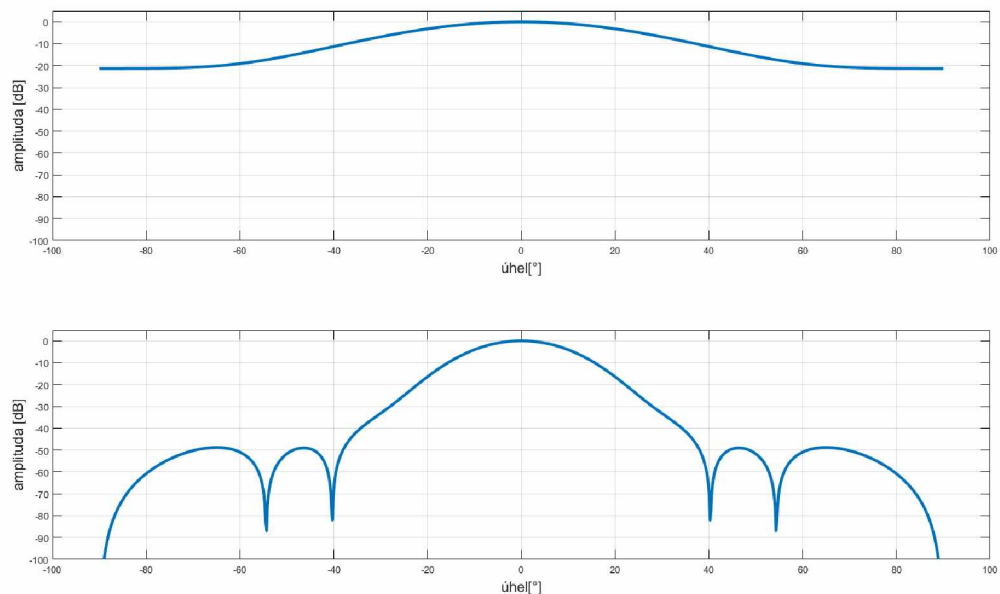
Obr. 29 – srovnání Gaussovy syntézy

Na obrázku 29 je vidět zvýraznění hlavního laloku Gaussovou syntézou v porovnání s rovnoměrným rozdělením. Nejen, že došlo k zvýraznění hlavního laloku, ale došlo rovněž k potlačení laloků postranních.

Tabulka 2: Gaussova syntéza

Počet prvků	5	10	15	20	30	40
Šířka svazku [°]	39,28	17,66	11,53	8,65	5,77	4,32
Odstup prvního laloku [dB]	-	-49,02	-46,75	-45,84	-44,96	-44,53
Odstup posledního laloku [dB]	-	-48,83	-48,90	-50,01	-52,38	-54,37

U počtu pěti anténních prvků nemohlo dojít k odečtení postranních laloků, protože kvůli vlastnostem syntézy se postranní laloky vůbec nevytvořily. Za povšimnutí také stojí výrazná redukce postranních laloků pro počet deseti anténních prvků.



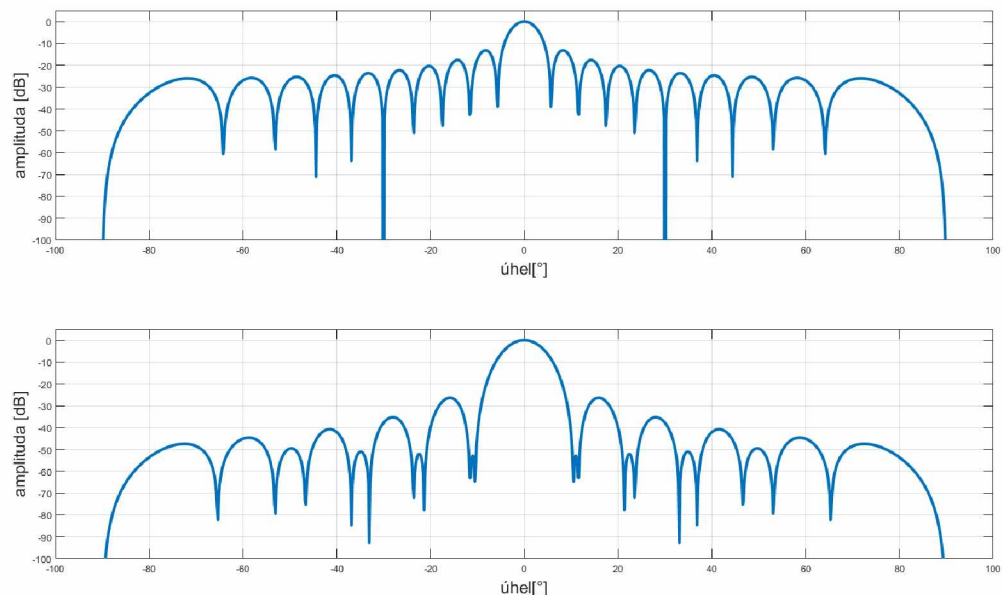
Obr. 30 – Gaussova syntéza pro malý počet prvků

7.4 Trojúhelníkové rozdělení

Vzhledem k odlišným výpočtům anténních koeficientů pro sudý a lichý počet anténních prvků se výsledky obou výpočtů liší.

7.4.1 Trojúhelníkové rozdělení pro sudý počet prvků

Pro sudý počet anténních prvků dojde u trojúhelníkového rozložení k výraznému potlačení každého druhého postranního laloku.



Obr. 31 – trojúhelníkové rozdělení pro sudý počet prvků

Na obrázku 31 vykreslen činitel řady pro dvaceti prvkovou řadu za použití rovnoměrného a trojúhelníkového rozložení. Je vidět, jak trojúhelníkové rozdělení potlačilo liché laloky, a naopak zvýraznilo laloky sudé, včetně hlavního laloku. Došlo také k většímu poklesu postranních laloků.

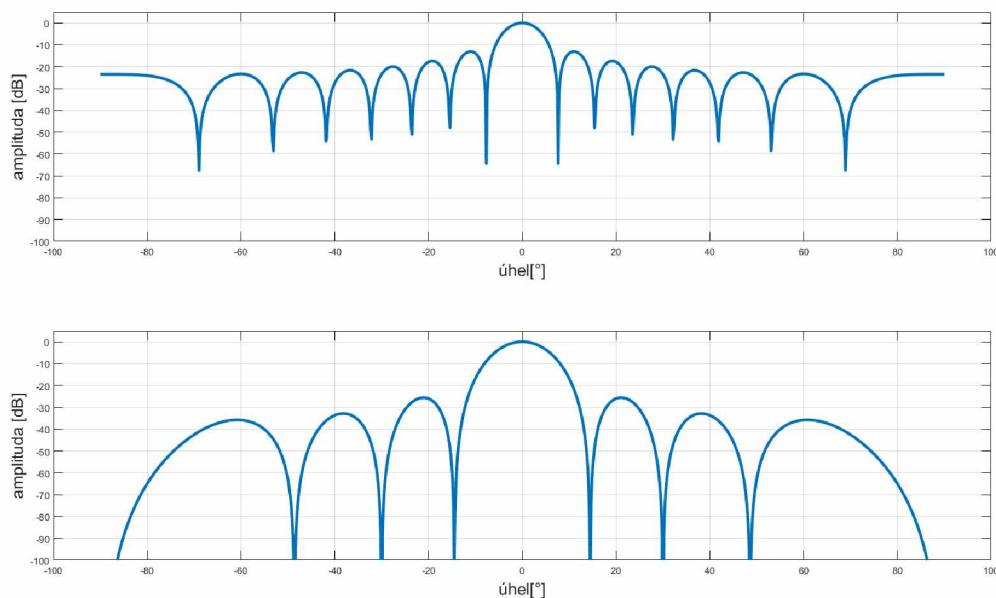
Nejvíce se potlačí postranní laloky nejbliže k hlavnímu laloku. V tabulce 3 je vidět, že pokles prvního postranního laloku při počtu čtyřiceti anténních prvků již není tak velký jako u předchozích případů, protože došlo k úplnému překrytí prvních postranních laloků.

Tabulka 3: trojúhelníkové rozložení pro sudý počet prvků

Počet prvků	6	10	16	20	30	40
Šířka svazku [°]	21,98	13,69	9	7,21	5,07	3,97
Odstup prvního laloku [dB]	-31,81	-40,86	-48,89	-52,88	-60,18	-28,48
Odstup posledního laloku [dB]	-25,24	-34,17	-43,92	-47,46	-53,16	-58,80

7.4.2 Trojúhelníkové rozdělení pro lichý počet prvků

Při lichém počtu anténních prvků dojde k dokonalému potlačení každého druhého postranního laloku. Vznikne tedy méně širších postranních laloků, jejichž amplituda je potlačena více, než je tomu u rovnoměrného rozdělení.



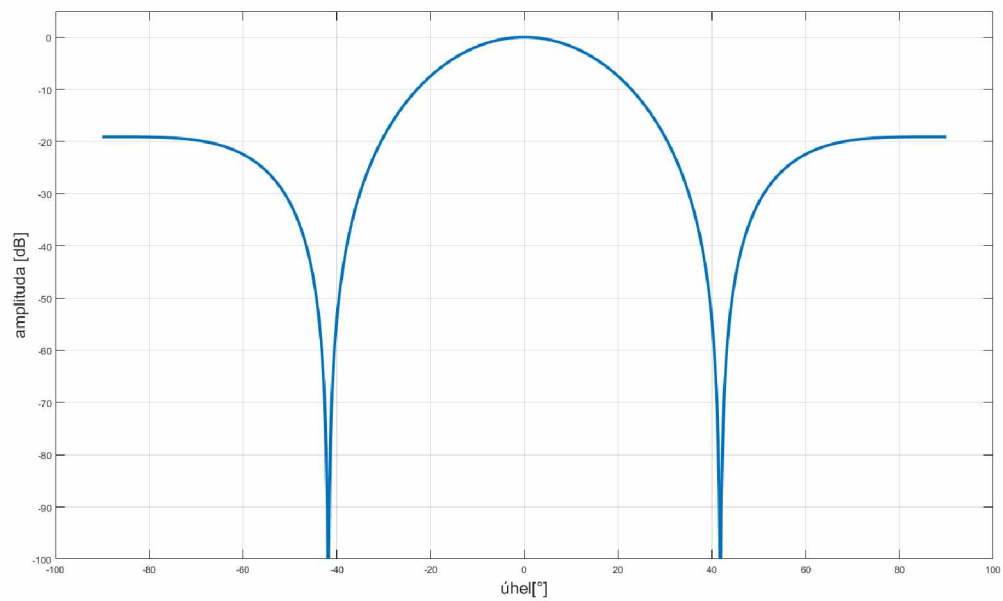
Obr. 32 – trojúhelníkové rozdělení pro lichý počet prvků

Na obrázku 32 vykreslen činitel řady pro patnácti prvkovou řadu za použití rovnoměrného a trojúhelníkového rozložení.

Tabulka 4: trojúhelníkové rozložení pro lichý počet prvků

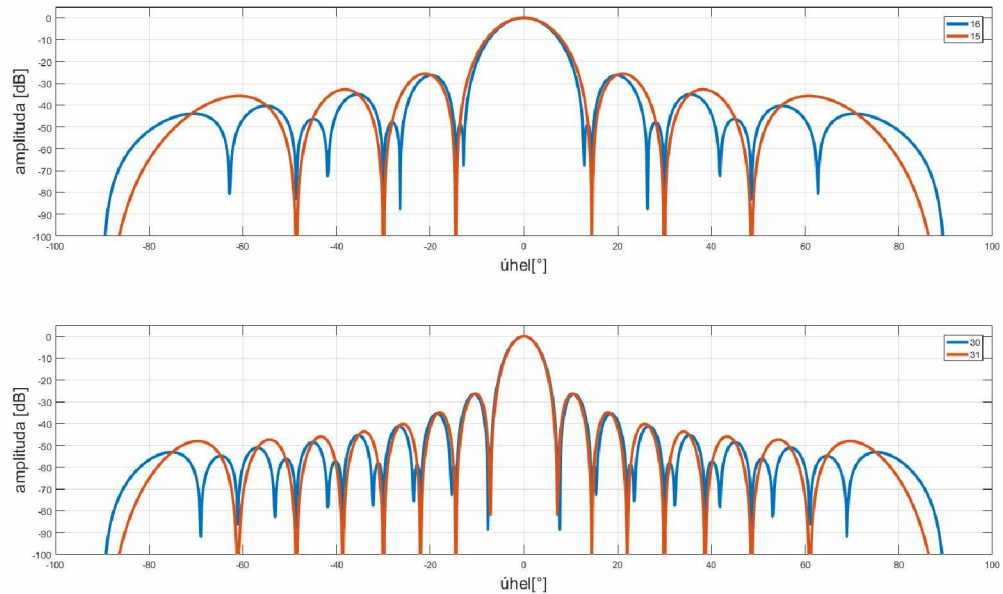
Počet prvků	5	11	15	21	31	41
Šířka svazku [°]	26,31	12,61	9,73	6,85	5,05	3,96
Odstup prvního laloku [dB]	-19,8	-24,85	-25,60	-26,04	-26,29	-26,38
Odstup posledního laloku [dB]	-	-30,51	-35,78	-41,65	-48,08	-52,88

Při počtu pěti anténních prvků nastává problém s odečtením hodnot. Díky vlastnosti úplného potlačení postranních laloků se nevytvoří dostatečný počet postranních laloků.



Obr. 33 – činitel řady trojúhelníkového rozdělení pro pět prvků

7.4.3 Porovnání trojúhelníkových rozložení



Obr. 34 – porovnání činitele řady pro sudý a lichý počet prvků

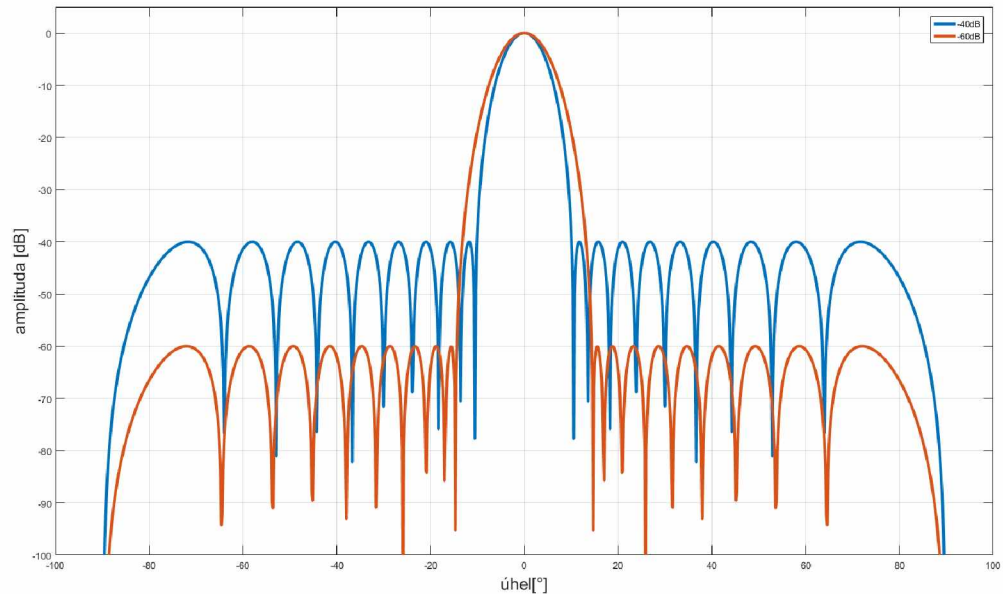
Na obrázku 34 jsou vykresleny dvě dvojice činitele řady. Nahoře pro 15 a 16 anténních prvků a dole pro 30 a 31 anténních prvků.

Je vidět, že laloky pro lichý počet prvků (červeně) vždy pokrývají dva laloky výpočtu pro sudý počet prvků (modře). Lze tedy říct, že jedna dvojice zvýrazněného a potlačeného laloku při výpočtu pro sudý počet anténních prvků je při výpočtu pro lichý počet prvků nahrazena jedním postranním lalokem.

7.5 Dolph-Chebysheva syntéza

Dolph-Chebysheva syntéza má velice dobré vlastnosti co se týče potlačení postranních laloků a na rozdíl od předchozích syntéz nemá takový vliv na zvětšení šířky svazku.

Pro výpočet koeficientů anténních prvků je nutno znát požadovaný odstup postranních laloků.



Obr. 35 – Chebysheva syntéza s odstupem laloků -40dB a -60dB

Na obrázku 35 je Chebysheva syntéza pro anténní řadu o dvaceti prvcích a požadavkem na odstup postranních laloků -40dB a -60dB.

Chebysheva syntéza vyrovná všechny postranní laloky přesně na požadovanou úroveň, nedochází zde k postupnému poklesu postranních laloků, jak je tomu u ostatních syntéz. Čím více jsou postranní laloky potlačeny, tím větší je šířka hlavního svazku.

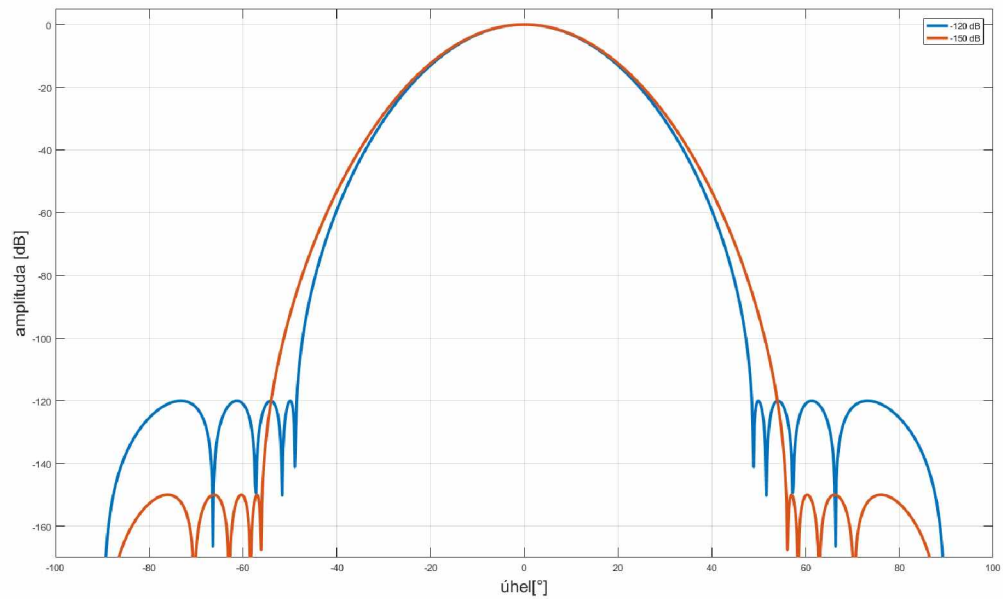
Tabulka 5: Dolph-Chebysheva syntéza pro -40 dB

Požadavek/Počet prvků	5	10	15	20	30	40
Šířka svazku [°]	28,47	14,77	10,09	7,57	5,05	3,96
Odstup prvního laloku [dB]	-40	-40	-40	-40	-40	-40
Odstup posledního laloku [dB]	-40	-40	-40	-40	-40	-40

Tabulka 6: Dolph-Chebysheva syntéza pro -80 dB

Požadavek/Počet prvků	5	10	15	20	30	40
Šířka svazku [°]	30,27	18,38	12,97	10,09	6,85	5,05
Odstup prvního laloku [dB]	-80	-80	-80	-80	-80	-80
Odstup posledního laloku [dB]	-80	-80	-80	-80	-80	-80

Výpočet Chebyshevovy syntézy vždy striktně dodrží požadavek na odstup postranních laloků, je-li možné takový požadavek fyzikálně provést. Při požadavcích na velké odstupy postranních laloků se výrazně zvyšuje velikost hlavního laloku. Je potřeba volit rozumné požadavky na odstup postranních laloků nebo zvýšit počet prvků anténní řady.



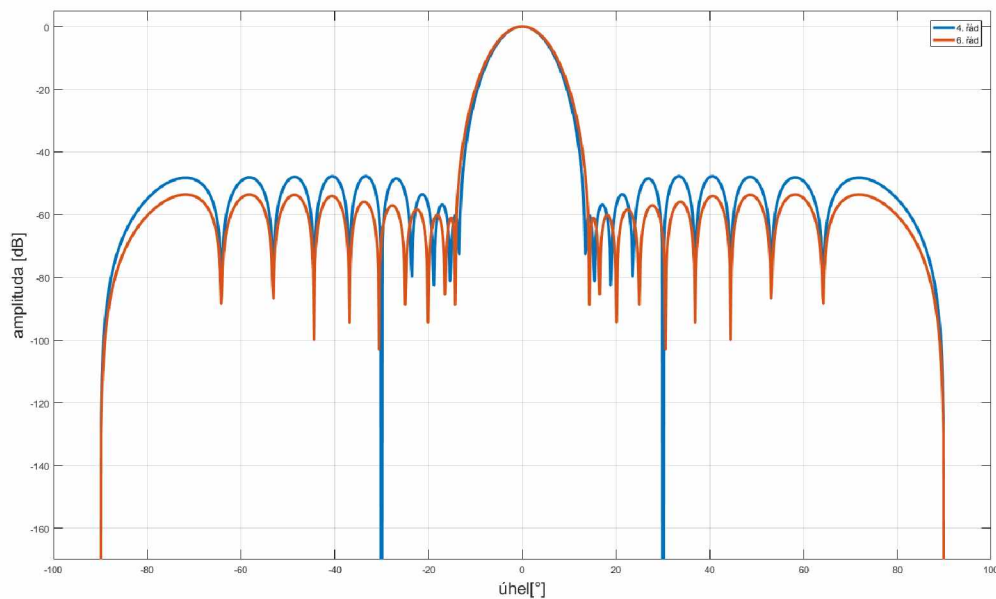
Obr. 36 – velké požadavky na Chebyshevovu syntézu

Na obrázku 36 je demonstrováno, jak se zvětší hlavní lalok při požadavcích na velký odstup postranních laloků při použití anténní řady o deseti prvcích.

7.6 Taylorova syntéza

Taylorova syntéza je podobně jako Dolph-Chebyshevova syntéza velmi dobrá pro potlačení postranních laloků. V tomto případě však laloky nejsou v jedné rovině.

Pro výpočet je nutno znát požadovaný odstup postranních laloků a řád Taylorova polynomu. Platí, že čím vyšší řád, tím lépe vystihne výsledný činitel řady požadovaný odstup postranních laloků. Při běžném použití dostatečně dobře postihne požadovaný průběh třetí až šestý řád polynomu. Při menších řádech nejsou postranní laloky dobře potlačeny a vyšší řády již nemají tak velký účinek za změnu tvaru činitele řady.



Obr. 37 – Taylorova syntéza s použitím čtvrtého a šestého řádu

Na obrázku 37 je Taylorova syntéza pro anténní řadu o dvaceti prvcích. Je vidět, jak vyšší řád Taylorova polynomu dokáže lépe potlačit postranní laloky. U Taylorovy syntézy dosahují požadovaného odstupu vždy laloky nejbližší hlavnímu laloku. Další laloky jsou potlačeny méně, záleží na stupni polynomu a počtu anténních prvků.

Tabulka 7: Taylorova syntéza čtvrtého řádu pro -60 dB

Požadavek/Počet prvků	5	10	15	20	30	40
Šířka svazku [°]	32,43	16,21	10,81	8,29	5,77	4,32
Odstup prvního laloku [dB]	-44,3	-66,16	-61,87	-60,23	-59,01	-58,68
Odstup posledního laloku [dB]	-	-47	-46,72	-48,27	-51,18	-53,48

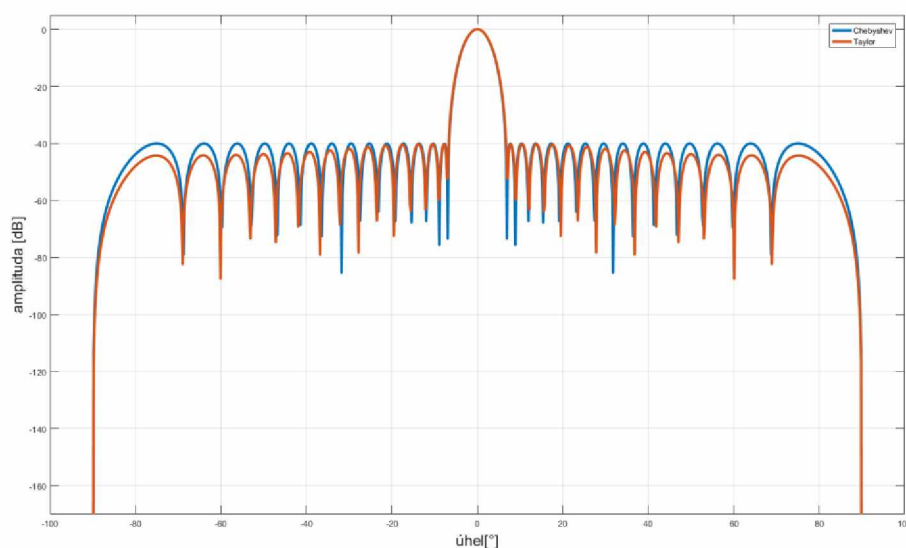
Tabulka 8: Taylorova syntéza šestého řádu pro -60 dB

Požadavek/Počet prvků	5	10	15	20	30	40
Šířka svazku [°]	33,87	16,94	11,53	8,64	5,77	4,37
Odstup prvního laloku [dB]	-51,43	-62,09	-61,83	-61,02	-60,32	-60,07
Odstup posledního laloku [dB]	-	-60,41	-46,72	-52,98	-56,04	-58,19

Pro počet pěti anténních prvků se nevytvoří dostatečný počet laloků pro odečtení. Na hodnotách postranních laloků je vidět, že s přibývajícím počtem se odstup krajních laloků a laloků sousedících s hlavním lalokem vyrovnává a jejich odstup se ustaluje.

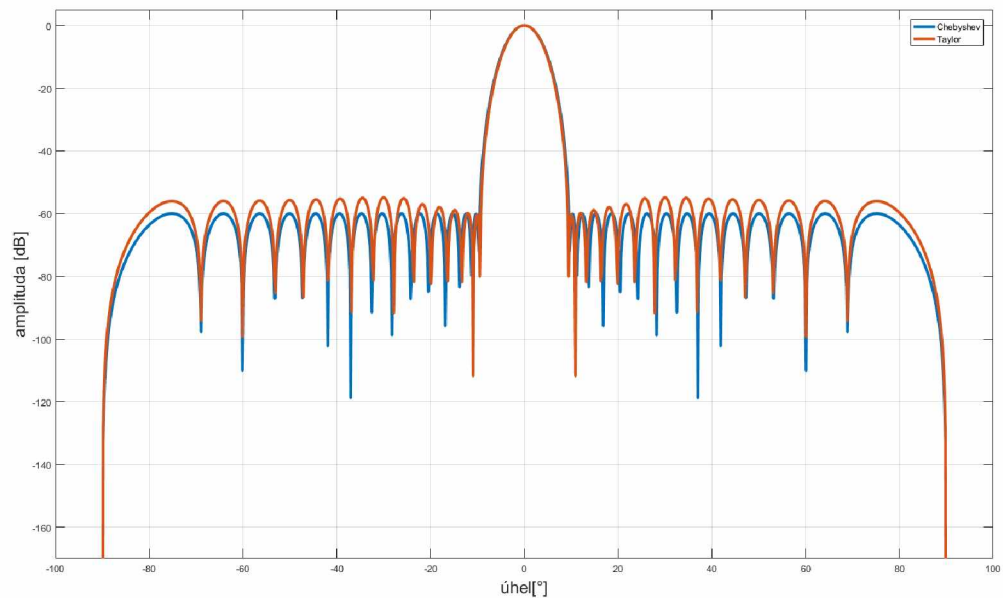
Při porovnání hodnot pro oba řády je vidět, že čtvrtý řád umožňuje mít menší šířku hlavního laloku. Největší rozdíl je v potlačení krajních laloků, které polynom šestého řádu potlačil lépe.

7.7 Porovnání Taylorovy a Chebyshevovy syntézy



Obr. 38 – porovnání Chebyshevovy a Taylorovy syntézy pro odstup -40 dB

Na obrázku 38 je činitel řady pro anténní řadu o třiceti prvcích s požadovaným odstupem postranních laloků -40dB. Je patrné, že výsledný tvar činitele řady je velmi podobný. Taylorova syntéza šestého řádu dokáže potlačit krajní laloky, kdežto Chebyshevova syntéza drží všechny postranní laloky v rovině.



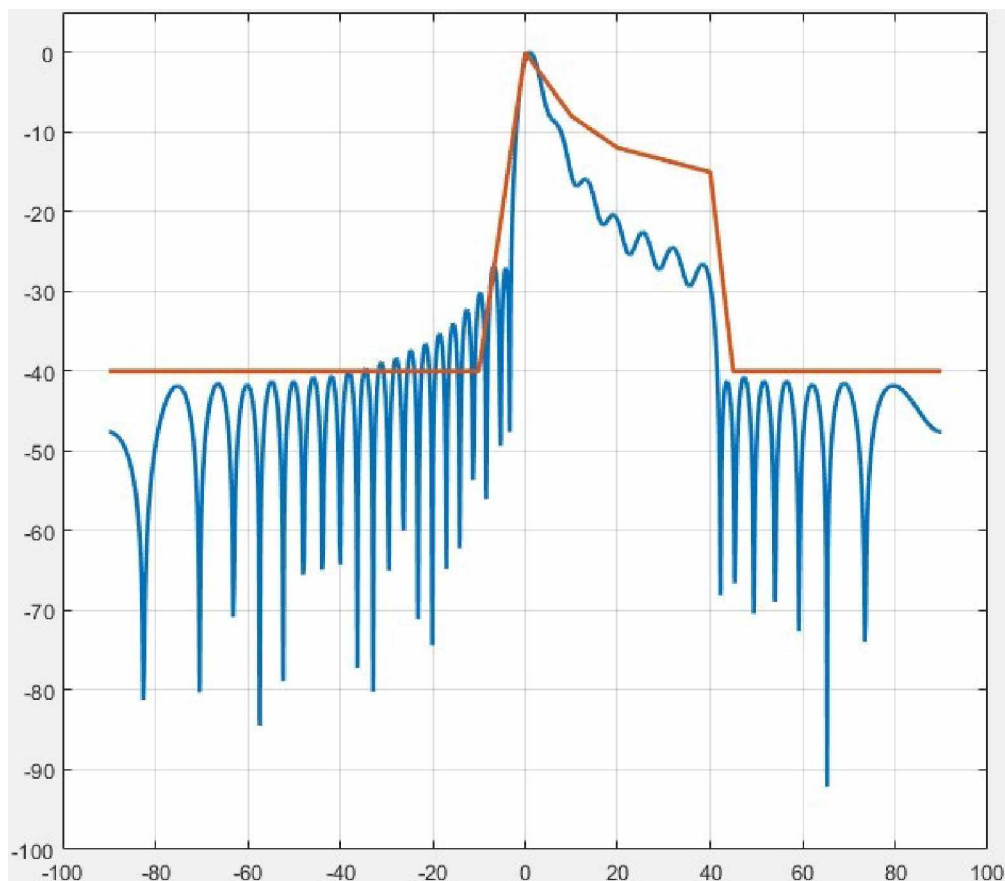
Obr. 39 – porovnání Chebyshevovy a Taylorovy syntézy pro odstup -60 dB

Na obrázku 39 se změnil pouze požadavek na odstup postranních laloků na -60dB. Je vidět, že Taylorova syntéza šestého řádu již nedokáže stlačit postranní laloky pod -60 dB.

7.8 Fourierova syntéza

Fourierova syntéza je díky možnosti navržení požadovaného tvaru velice komplikovaná a nedá se všeobecně zhodnotit a porovnat s předchozími amplitudovými syntézami. Nejdůležitější požadavek na Fourierovu syntézu je, aby dobře vystihla požadovaný tvar činitele řady.

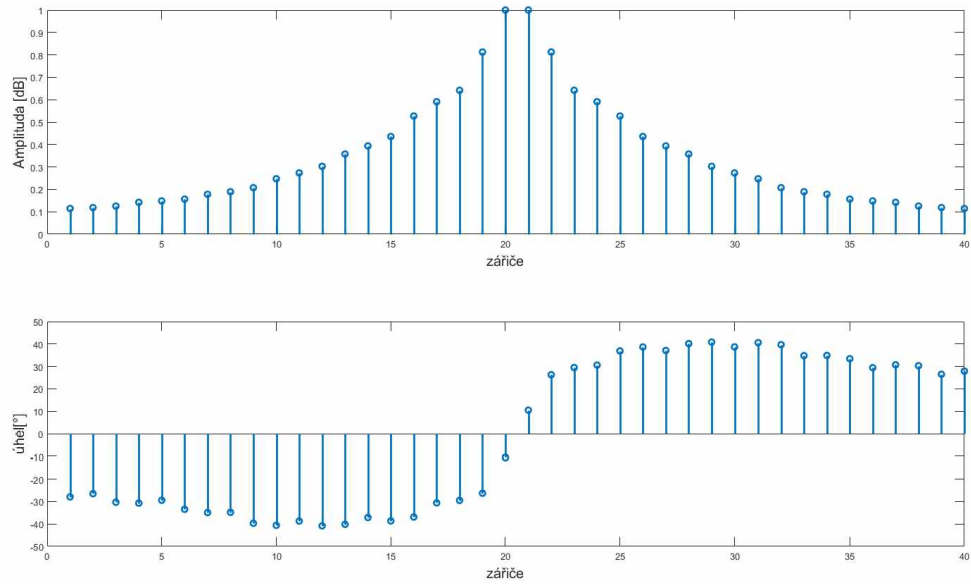
Jedním z častých využití Fourierovy syntézy je v radarové technice, kde jsou specifické požadavky na tvar činitele řady. Zde se využívá tvarování činitele řady do tvaru kosekanty.



Obr. 40 – Fourierova syntéza pro tvar kosenkanty

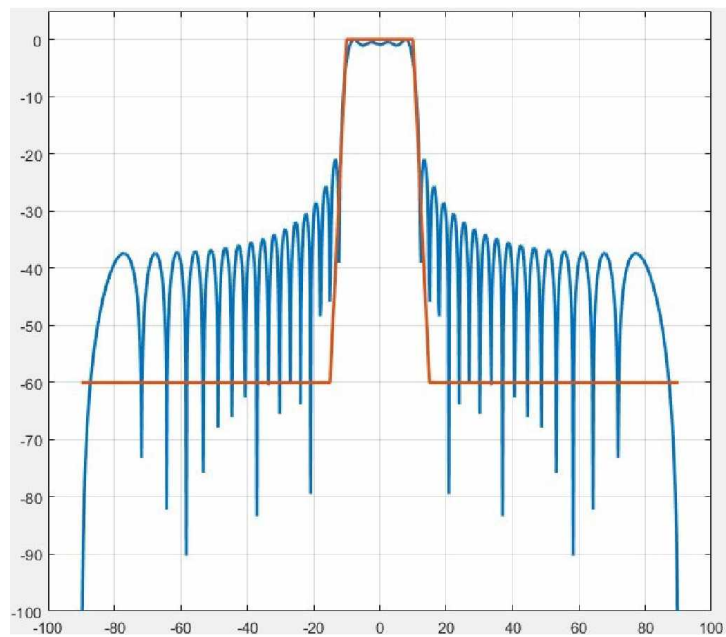
Na obrázku 40 je vidět, jak Fourierova syntéza pro anténní řadu o čtyřiceti prvcích postihla požadovaný průběh. Fourierova syntéza nevystihuje požadované tvary exaktně a někdy je potřeba požadovaný tvar trochu upravit, aby konečný výsledek odpovídal původní představě o požadovaném průběhu.

Výstupem Fourierovy syntézy jsou získané komplexní koeficienty, které se implementují na anténní řadu. Ukázka rozložení amplitud a fází pro průběh z předchozího obrázku je na obrázku 41.



Obr. 41 – koeficienty Fourierovy syntézy

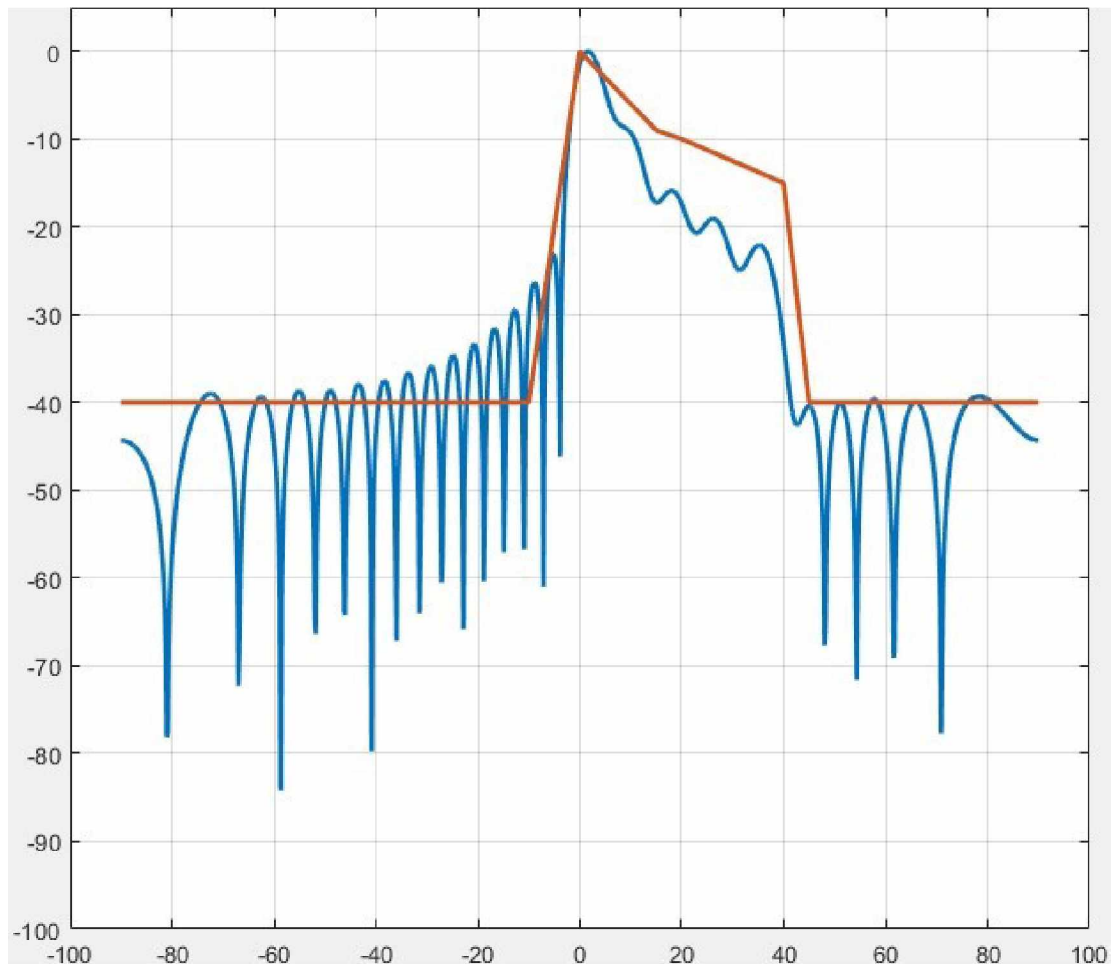
Fourierova syntéza se samozřejmě dá využít stejně jako amplitudové syntézy a upravit požadovaný do podoby obdélníkového okna, které jsou typické pro amplitudové syntézy. Výhodou Fourierovy syntézy je vystihnutí tvaru hlavního laloku, naopak pro potlačení postranních laloků jsou lepší například Taylorova nebo Chebysheva syntéza.



Obr. 42 – Fourierova syntéza pro tvar obdélníkového okna

7.9 Woodwardova syntéza

Woodwardova syntéza, stejně jako syntéza Fourierova je kombinovaná syntéza a umožňuje úpravu tvaru činitele anténní řady do požadované podoby. Rovněž se využívá v radarové technice pro úpravu činitele řady.

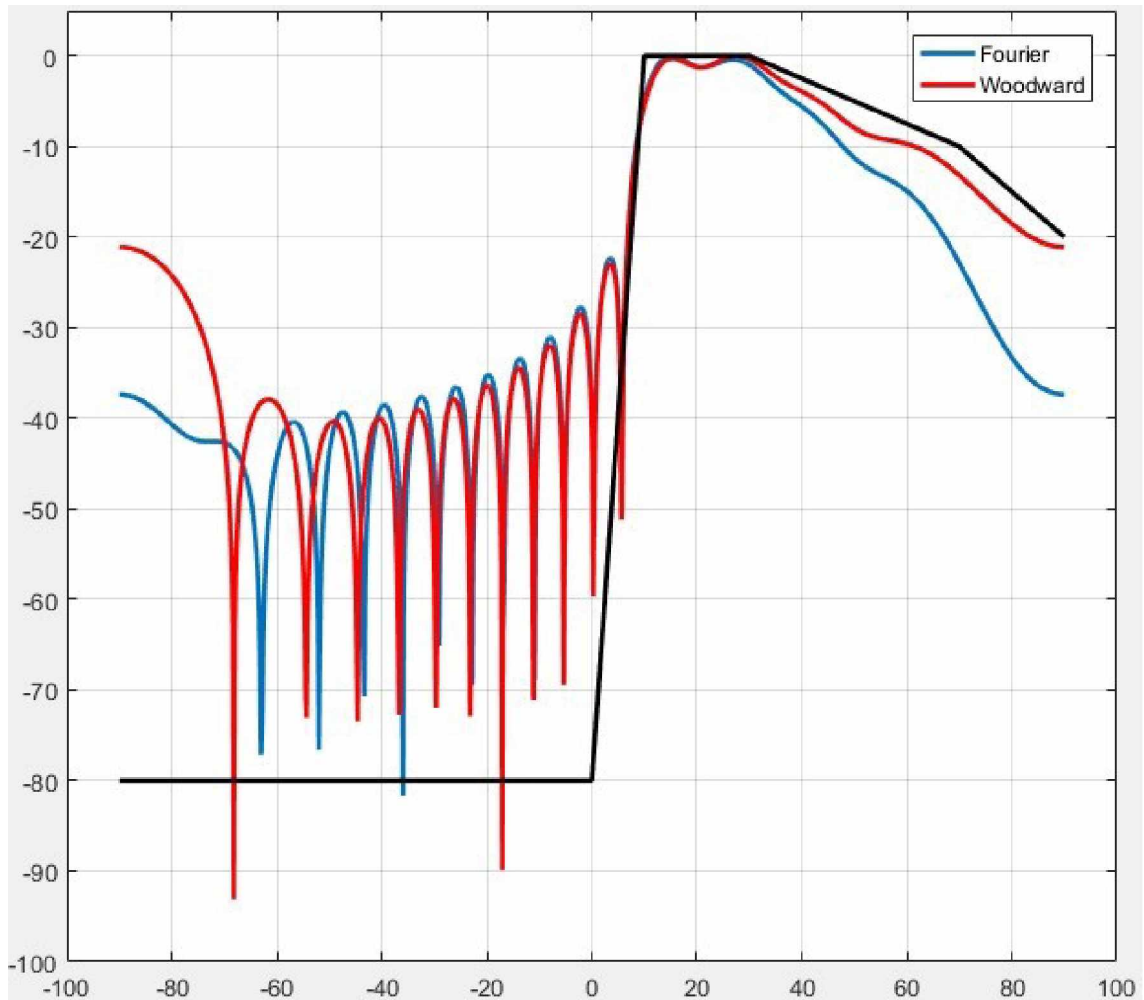


Obr. 43 – Woodwardova syntéza pro tvar kosenkanty

Na obrázku 43 je vidět, jak Woodwardova syntéza pro anténní řadu o třiceti prvcích zachytila modelovaný průběh.

7.10 Porovnání Woodwardovy a Fourierovy syntézy

Obě syntézy dosahují téměř totožných výsledků při tvarování kosekantových či obdélníkových průběhů. Větší rozdíly jsou patrné při zmenšení počtu anténních prvků.



Obr. 44 – porovnání Woodwardovy a Fourierovy syntézy

Z obrázku 44 je vykreslena Fourierova a Woodwardova syntéza pro anténní řadu o dvaceti prvcích. Je patrné, že Fourierova syntéza dokáže lépe potlačit laloky, které mají být utlumené. Přednost Woodwardovy syntézy je lepší vystihnutí tvaru v části, která nemá být tak silně potlačena.

ZÁVĚR

Náplní diplomové práce bylo porovnání syntéz anténního pole a zhodnocení jejich příspěvku k vylepšení vyzařovací charakteristiky anténního pole.

V úvodu práce byly vysvětleny principy vyzařování antén, jakožto základních prvků anténního pole. Dále byly popsány základní parametry antén. Bylo popsáno, jak jednotlivé anténní zářiče vytvoří anténní řadu a anténní řada vyzařuje. Dále byly popsány vybrané syntézy anténních řad, jejich výpočet a vlastnosti.

V rámci diplomové práce byla vytvořena aplikace v prostředí Matlab GUI, ve které lze všechny vybrané syntézy aplikovat na anténní pole zvolených rozměrů. Aplikace rovněž umožňuje zjištění potřebné velikosti anténního pole dle zvolených požadavků na jeho vlastností.

V poslední kapitole jsou popsány vlastnosti jednotlivých syntéz anténní řady. Při práci s jednotlivými syntézami byly vyvozeny následující závěry.

- Rovnoměrné rozložení – toto je základní rozložení bez žádných úprav koeficientů jednotlivých anténních prvků. Dává základní představu o tom, jak anténa vyzařuje a je vhodné pro porovnání, jak jiné syntézy změnili tvar činitele řady.
- Trojúhelníkové rozložení – při použití tohoto rozložení dojde k roztažení šířky hlavního svazku. Rozdělení způsobí rychlejší pokles postranních laloků. Při sudém počtu anténních prvků dojde k výraznému potlačení některých postranních laloků. Při lichém počtu anténních prvků dojde k redukci postranních laloků na polovinu.
- Gaussovo rozložení – výrazně zvětší hlavní lalok. Dojde také ke změně tvaru hlavního laloku, po aplikaci tohoto rozložení má hlavní lalok tvar připomínající Normální rozdělení. Rovněž dojde ke zvýšení odstupů postranních laloků.
- Dolph-Chebyshevovo rozložení – je velmi dobré pro potlačení postranních laloků. Dojde k potlačení postranních laloků do jedné roviny. Odstup postranních laloků lze zvolit a postranní laloky budou zarovnaný na požadovaný odstup.
- Taylorovo rozložení – Při použití tohoto rozložení dojde k potlačení postranních laloků na požadovanou úroveň. Postranní laloky nejsou potlačeny přesně na požadovanou úroveň, jak je tomu u Dolph-Chebyshevova rozložení, ale laloky se požadované úrovni velmi přiblíží. Důležitý je řád Taylorova polynomu, pro který je výpočet anténních

koeficientů proveden. Platí, že čím vyšší řád polynomu, tím lépe jsou postranní laloky potlačeny.

- Fourierova a Woodwardova syntéza – Tyto syntézy umožňují nastavit jak amplitudu, tak fázi na jednotlivých anténních prvcích. To umožňuje vychylovat hlavní svazek anténního pole. Obě syntézy se snaží co nejlépe vystihnout zadaný tvar činitele řady a podávají téměř shodné výsledky.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KUPČÁK, Dominik. *Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu: díl II.* Pardubice, 1986.
- [2] SCHEJBAL, Tomáš. *Aktivní fázované anténní systémy pro přibližovací radary.* Pardubice, 2016. Disertační práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Pavel Bezoušek.
- [3] F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform," in *dostupné z IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51-83, Jan. 1978.
- [4] NOVÁČEK, CSC. Doc. Ing. Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: Přednášky* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: http://micki.hofy-land.cz/vut/bvmt/Elektromagneticke_vlny_anteny_a_vedeni_S.pdf
- [5] RAIDA, Zbyněk. *Antény a vedení: Vyzářování elektromagnetických vln* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lectures/B_ANT_08.pdf
- [6] MAHACHOKLERTWATTANA, Dr. Pongsak. *Antenna Synthesis: Chapter 7* [online]. In: . 31.7.2018 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://pongsak.ee.engr.tu.ac.th/le428/>
- [7] ORFANIDIS, Sophocles J. *Electromagnetic Waves and Antennas: Ch.23: Array Design Methods* [online]. 2016 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>
- [8] BEZOUŠEK, prof. Ing. Pavel, CSc. *Technika rádiových komunikačních systémů: Charakteristiky antén* [online]. 2019 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <portal.upce.cz/>
- [9] VOKURKA, Jaroslav, *Antény.* [s.l.] : Vydavatelství ČVUT, 1980.

SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

Skripty nutné pro chod aplikace

porovnaníSyntez

Hlavní aplikace vyvinutá pro porovnání syntéz.

Fourier

Funkce pro výpočet Fourierovy syntézy.

FourierKoef

Slouží pro zadání průběhu Fourierovy a Woodwardovy syntézy v horizontální rovině.

FourierKoefV

Slouží pro zadání průběhu Fourierovy a Woodwardovy syntézy ve vertikální rovině.

sírkaLalokuHor

Funkce pro výpočet šířky laloku v horizontálním směru.

sírkaLalokuVert

Funkce pro výpočet šířky laloku ve vertikálním směru.

Woodward

Funkce pro výpočet Woodwardovy syntézy.