2. DIPOOLANTENNI SIMULEERIMINE

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2026

Antennide ja raadiolevi IEE2580 laboratoorne töö

Dipoolantenni simuleerimine

Töö eesmärgid:

Töö eesmärgiks on omandada esmased kogemused antennide simuleerimiseks ja simuleerimistulemuste võrdlemine eelmises praktikumis teostatud mõõtmiste tulemustega.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

- MATLAB *Antenna Toolbox* tarkvaraga personaalarvuti.
- Dipoolantenn (915 MHz).
- Joonlaud ja nihik.

Töö teoreetilised alused:

Antenn on seade mis muudab suunavates süsteemides, nagu näiteks koaksiaalkaablis, kulgeva elektrivoolu elektromagnetlaineteks ja vastupidi.

Pööratavuse printsiibi (*Reciprocity principle*) kohaselt ei sõltu antenni parameetrid sellest, kas antenni kasutatakse saatmiseks või vastuvõtuks.

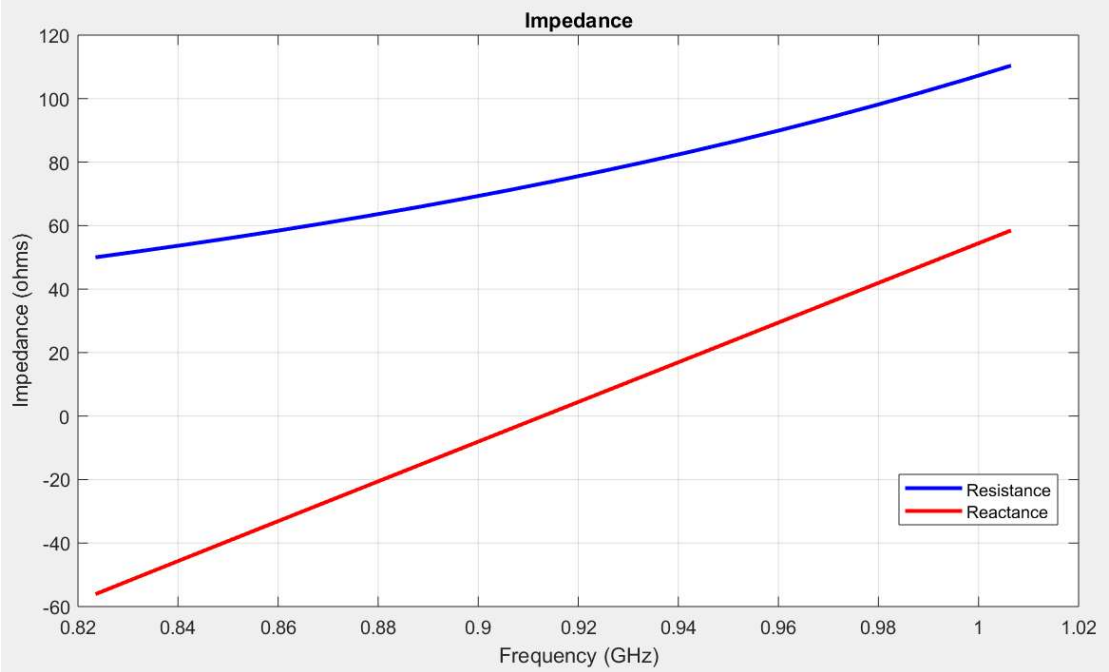
Nagu teistelgi elektroonikakomponentidel, on ka antenni impedants $Z_a = R_a + jX_a$ sagedusest sõltuv. Joonis 1 kujutab 915 MHz dipoolantenni simuleeritud impedantsi. Jooniselt on näha, et antenni töö- ehk kesk-sagedusel f_c on impedantsi imaginaarosa ehk reaktiivtakistus X_a null. Töösagedusest f_c madalamatel sagedustel on reaktiivtakistus X_a negatiivne, mis näitab antenni mahtuvuslikku iseloomu. Töösagedusest kõrgematel sagedustel on reaktiivtakistus positiivne ning antenni iseloom on vastavalt induktiivne.

Impedantsi reaalosa töösagedusel on ligikaudu 73 Ω mis on poollaine dipoolantenni korral igati ootuspärane. Antenni takistus, ehk selle impedantsi reaalosa R_a koosneb kahest komponendist.

Kõiki antennis tekkivaid kadusid iseloomustab **kaotakistus** R_l. Energia muundamist elektrivoolu omast elektromagnetlainete omaks, ning vastupidi, iseloomustab antenni **kiirgustakistus** R_r. Antenni kogutakistus on nende kahe komponendi summa $R_a = R_l + R_r$. Antenni **kasutegur** on võrdne kiirgustakistuse suhtega kogutakistusse

$$e_A = \frac{R_r}{R_a} = \frac{R_r}{R_r + R_l}. \quad (1)$$

Antenni sobitust saab väljendada selle peegeldusteguri Γ (s_{11}) kaudu, logaritmilistes ühikutes antuna peegelduskaona (*reflection loss*) *RL*. Peegeldusteguri mooduli $|\Gamma|$ sagedussõltuvust on kujutatud joonisel 2. On huvitav täheldada, et parim sobitus (vähim peegeldusteguri moodul) saavutatakse sagedusel 900,9 MHz kuid resonants ($X_a = 0$) hoopis sagedusel 912,8 MHz.



Joonis 1. Dipoolantenni simuleeritud impedants

Antenni **ribalaius** *B* on defineeritud kui erinevus kõrgeima $f_{ü}$ ja madalama töösageduse f_a vahel

$$B = f_{ü} - f_a. \tag{2}$$

Ribalaiust määravad piirid on tavaliselt määratud ülekande kahanemisega 3 dB võrra või seisulaineteguri VSWR tõusmisega suhteni Joonis 2 kujutab kuidas leida antenni ribalaiust -3 dB nivool. Joonisel toodud konkreetses näites on näha, et antenni ribalaius *B* on ligikaudu 60 MHz. Kitsaribaliste antennide, nagu ka käesolevas töös vaadeldava dipoolantenni puhul, võib ribalaiust väljendada ka protsentides töösagedusest:

$$B_{\%} = 100\frac{B}{f_c} = 200\frac{f_{ü} - f_a}{f_{ü} + f_a}\,. \tag{3}$$

Alternatiivina ribalaiusele võib antenni töösageduste vahemiku ulatust väljendada hoopis selle **hüveteguri** *Q* kaudu

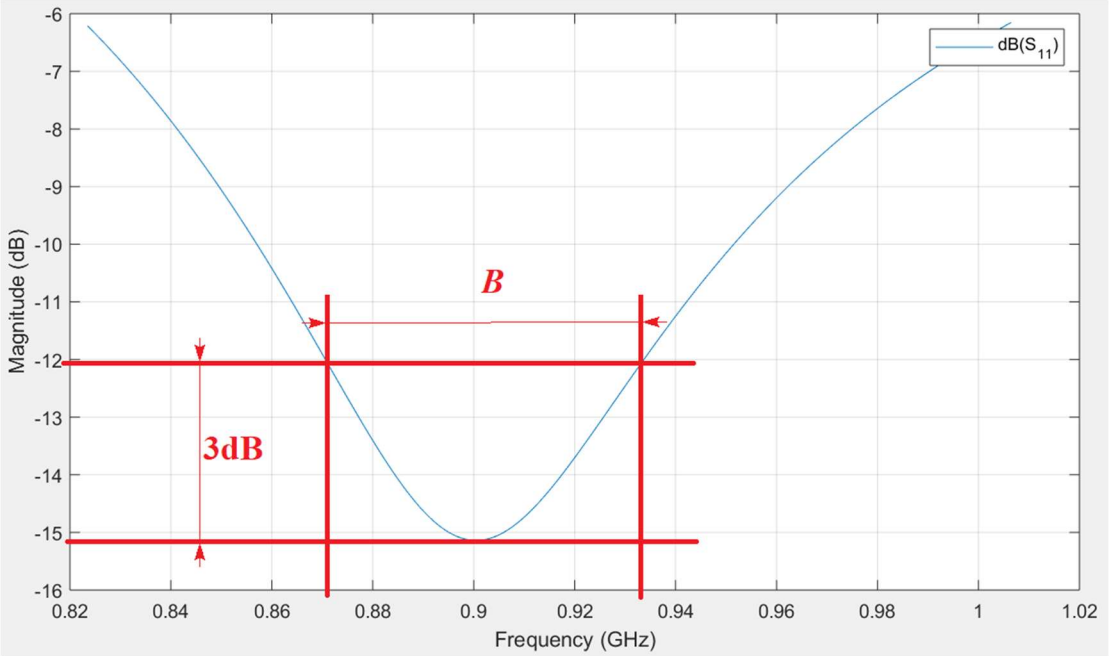
$$Q = \frac{f_c}{B} = \frac{f_{ü} + f_a}{2(f_{ü} - f_a)}\,. \tag{4}$$

Näiteks võetud simuleeritud antenni korral teame, et selle töösagedus f_c on 915 MHz ja ribalaius *B* vastavalt 60 MHz. Seega protsentuaalne ribalaius $B_{\%}$ on 6,6 % ja hüvetegur *Q* on 15,3.

Dipoolantenn võib põhimõtteliselt olla mistahes pikkusega kuid praktikas levinuim pikkus on ligikaudu pool ülekantava signaali lainepikkusest – sellest ka nimetus poolainedipool. Sellisel juhul on antenni pikkus leitav järgmise avaldisega

$$l = k\frac{c}{2f_c} = k\frac{\lambda}{2}\,, \tag{5}$$

kus c on valguse kiirus vaakumis ($3 \cdot 10^8$ m/s) ja konstant k sõltub füüsilise antenni läbimõõdust. Lõputult peenikese juhtme korral on k = 1, praktilistel antennidel jääb enamasti vahemiku 0,94 – 0,96. Kummagi dipoolantenni haru pikkus on võrdne poolega antenni kogupikkusest. Praktikas peab, kaabli või pistiku ühendamiseks, jääma kahe poole vahele ka väike pilu.



Joonis 2. Dipoolantenni simuleeritud peegelduskao sagedussõltuvus

Dipoolantenni teooria eeldab, et tegemist on lõputult peene ümmarguse juhtmega. Käesolevas töös uuritav antenn on aga realiseeritud trükkplaadil ning selle pooled on õhukesed (35 µm) ja lamedad. Aine põhiõpikust on toodud, et sellisele ehitusele vastava ekvivalentse silindri raadius on neljandik lameda antenni laiusest (Tabel 9.3 lk 514 [5]). Teisisõnu on ekvivalentse ümara juhtme diameeter võrdne poolega riba laiusest trükkplaadil.

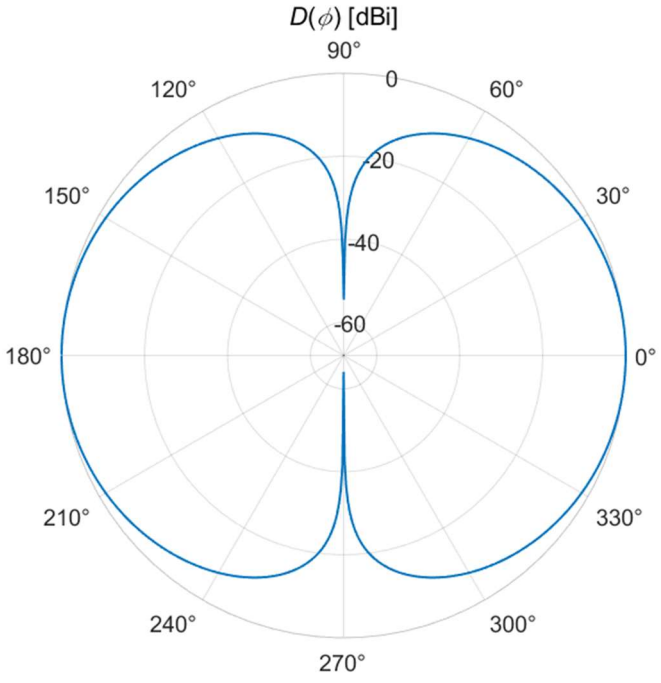
Teooria eeldab ka seda, et dipoolantenn asub homogeenses dielektrikus, enamasti õhus. Meie makett on aga realiseeritud trükkplaadil seega avaldab selle materjal (FR4) mõju antenni parameetritele. Dielektrilise katte mõjust antenni parameetritele räägitakse põgusalt põhiõpiku [5] leheküljel 513 alapunktis 9.4.6 *Dielectric Coating*. Mõju hindamiseks on vaja teada dielektriku (trükkplaadi) paksust ja selle materjali elektrilisi omadusi.

Trükkplaadi materjali dielektriline läbitavus ε vähendab märkimisväärselt antenni resonantssagedust mistõttu peab selline antenn olema 15—30 % lühem poolest lainepikkusest õhus. Teisisõnu tuleb avaldises (5) konstandi k väärtuseks võtta 0,70…0,85. Trükkplaadi materjali mõjul suureneb antenni ribalaius ja vähenevad nii selle kasutegur kui impedants.

Antenni **suunadiagramm** näitab kuidas antenni kiirgus (kaugväljas) ruumiliselt jaotub. Kuna suunadiagrammi kuju kaugväljas ei sõltu kaugusest antenni ja mõõtepunkti vahel, siis väljendatakse seda sõltuvust asimuudi- ja tõusunurga suhtes. Kõige levinumaks mõõduks on antenni **suunategur** (*directivity*) $D(\theta, \varphi)$.

Antenni suunategur on võrdne konkreetse antenni kiirgustugevuse $U(\theta, \varphi)$ suhtega isotroopse kiirguri omasse. Suunategurit väljendatakse tavaliselt logaritmilistes ühikutes [dBi]. **Kiirguse intensiivsus** $U(\theta, \varphi)$ on ise defineeritud kui konkreetses suunas kiiratud võimsus ruuminurga kohta [4].

Üldistatult näitab suunategur seda kuidas sõltub kiiratava signaali tugevus sõltub suunast. Pööratavuse printsiibist lähtudes näitab ta alternatiivselt seda kuidas sõltub vastuvõetud signaali tugevus selle saabumise suunast. Kuna suunadiagramm on kahe muutuja funktsioon siis seda saab visuaalselt kujutada kolmemõõtmelise joonisena. Kuna kahemõõtmelised joonised on üldjuhul kergemini loetavad ja mõistetavad, siis esitatakse antenni suunadiagrammi tihtipeale kahemõõtlmeliste lõigete kujul Allolev Joonis 3 kujutabki horisontaalse polarisatsiooniga dipoolantenni suunadiagrammi lõiget tasandiga $\theta = \pi/2$.



Joonis 3. Dipoolantenni suunadiagrammi lõige

Töö käik:



Käivita arvutis MATLAB tarkvara. Ava uus, tühi Matlab'i skript vajutades ekraani vasakus ülemises servas nuppu *New Script*. Salvesta uus skript endale meelepärase nimega mõnda sobivasse kausta.

Käesolevas töös tahame simuleerida eelmises praktikumis füüsiliselt mõõdetud antenni. Selleks on meil vaja eelmisel korral ülese märgitud antenni töösagedust f_c, pikkust l ja laiust w. Vajadusel võib need antenni maketilt uuesti üle mõõta.

1. Täiendaval on meil vaja teada ka kasutatava trükkplaadi mõõtmeid: laiust x, kõrgust y ja paksust h. Nende mõõtmiseks on laboris olemas joonlaud ja nihik. Esita nii antenni enda kui trükkplaadi mõõtmed aruandes.

Kõik antenni parameetrid on soovitav lisada oma skripti algusesse, selliselt on nad kergesti leitavad ja vajadusel on nende väärtuste muutmine kiire ja lihtne. Lisaks trükkplaadi- ja sellel paikneva antenni mõõtmetele on simulatsiooni jaoks vaja määrata ka mõlema materjali omadused. Juhtivad osad trükkplaadil on valmistatud vasest ja plaadi enda materjaliks on FR4. Joonis 4 kujutab skripti lõiku mis esmalt määrab juhtivate osade materjaliks vase ja seejärel dielektriku omaks FR4. Vasekihi pakus on vaikimisi juba 35 µm (1 oz) kuid dielektriku paksus tuleb käsitsi seada võrdseks mõõdetud trükkplaadi paksusega h.

```
juht = metal("Copper");         % Antenni juhtiva osa materjal
dielektrik = dielectric("FR4"); % Antenni trükkplaadi materjal
dielektrik.Thickness = h;
```

Joonis 4. Antenni materjalide määramine simulatsiooni jaoks

Lihtsa dipoolantenni mudeli (objekti) loomine MATLAB keskkonnas on väga lihtne. Joonis 5 kujutabki vastava objekti loomist ja visualiseerimist. Funktsiooni parameetriteks on antenni pikkus l, laius w ja antenni juhtiva osa materjal. Vaikimisi on antenni orienteeritud vertikaalselt, z – telje sihis. Kuna tahame antennile lisada ka FR4 materjali siis keerame antenni 90° (*Tilt*) ümber y- telje (*TiltAxis*) paralleelseks xy-tasandiga. Funktsiooniga *show*(*d*) saame mudeli füüsilist ehitust visualiseerida.

```
d = dipole("Length", l, "Width", w, "Conductor", juht, "Tilt", 90, ...
    "TiltAxis", [0 1 0]); % 90 kraadi ümber y-telje

figure(1)
    show(d)
    title("Dipoolantenn")
    legend("Vask", "Toitepunkt")
```

Joonis 5. Dipoolantenni objekti loomine ja kuvamine

Kuna me soovime simuleerida trükkplaadi materjali (FR4) mõju antennile siis peame selle ka oma simulatsioonile lisama. Selleks loome uue objekti nimega antenn, mida ergutab (*Exiter*) meie dipoolantenn *d* ja mis koosneb lisaks FR4 dielektrikust plaadist ja selle vastas küljel asuvast vasekihist. Järgmised kaks rida määravad trükkplaadi laiused ja kõrguse ning viimane rida eemaldab selle teiselt küljelt, meie jaoks ebavajaliku, vasekihi.

```
antenn = reflector("Exciter", d, "Spacing", h, "Substrate", dielektrik,
"Conductor", juht);
% Trükkplaadi mõõtmete määramine:
antenn.GroundPlaneLength = x;
antenn.GroundPlaneWidth = y;
% Maakihilt vase eemaldamine:
antenn.GroundPlaneLength = 0;

figure (2)
    show(antenn)
    title("Dipoolantenn FR4 trükkplaadil")
    legend("Vask", "Toitepunkt", "FR4")
```

Joonis 6. Trükkplaadi materjali lisamine simulatsioonile ja lõpptulemuse geomeetria kuvamine

2. Kasuta *show*() funktsiooni (vt Joonis 6) koostatud antenn mudeli kuvamiseks. Esita koostatud geomeetria joonis aruandes.

Eelmises praktikumis teostasime antenni parameetrite mõõtmist sagedusvahemikus 730 – 1100 MHz, seega teostame ka simulatsioonid täpselt samas vahemikus. Mõõtmisteks kasutatud R&S FSH4 siduanalüsaator salvestab mõõtmised 631 mõõtepunktis. Sama arvu punkte võib kasutada ka simulatsioonide korral. Kui on näha, et simulatsioonid võtavad liialt kaua aega siis võib punktide arvu ka vähendada. Soovitud arvu mõõtepunktide tekitamist etteantud sagedusvahemikus illustreerib Joonis 7 toodud programmikood.

```
fmin = 0.73E9; % Sagedusvahemiku alumine piir [Hz]
fmax = 1.11E9; % Sagedusvahemiku ülemine piir [Hz]
N = 631;       % Mõõtepunktide arv
sagedused = linspace(fmin, fmax, N); % Mõõtepunktide sagedused
```

Joonis 7. Mõõtepunktide massiivi tekitamine Matlabis

3. Simuleeri antenni peegelduskao sagedussõltuvus *RL*(*f*) samas sagedusvahemikus kui eelmises praktikumis tehtud mõõtmised (vt Joonis 8). Esita saadud sageduskarakteristik aruandes ja võrdle seda eelmises praktikumis teostatud mõõtmiste tulemusega. Võrdluseks esitada aruandes mõlemad graafikud, soovitavalt koos samas teljestikus. Kuidas mõõteandmeid MATLAB keskkonda lugeda ja neid simulatsioonitulemustega samas teljestikus kuvada on kirjeldatud LISAS A. Leia millisel sagedusel f_1 on simuleeritud sobitus kõige parem? Kui suur on peegelduskao väärtus $RL(f_1)$ sellel sagedusel? Esita mõlemad väärtused oma aruandes ja võrdle neid mõõtmisel saadud tulemustega.

```
S = sparameters(antenn, sagedused);
figure(3)
    rfplot(S)
    title("Antenni peegelduskadu")
    xlabel("\itf\rm (GHz)")
    ylabel("\itRL\rm (dB)")
    xlim([fmin fmax]/1E9)
```

Joonis 8. Antenni peegeldusteguri simuleerimine ja kuvamine

4. Parim sobitus mõõdetakse sagedusel kus antenni impedants Z_a on lähim siduanalüsaatori karakteristlikule impedantsile $Z_0 = 50\ \Omega$.

   Simuleeri antenni aktiiv- ja reaktiivtakistuse R_a ning X_a väärtused üle kogu vaadeldava sagedusvahemiku (vt Joonis 9). Esita mõlemad graafikud aruandes. Võrdle simulatsioonitulemusi eelmises praktikumis tehtud mõõtmiste omadega.

   Leia antenni impedants $Z_a = R_a + jX_a$ parimale sobitusele vastava sageduse f_1 juures ja esita see aruandes.

```
figure(4)
    impedance(antenn, sagedused);
    title("Antenni impedants")
    xlabel("\itf\rm (GHz)")
    ylabel("\itZ\rm(\itf\rm) \Omega")
    xlim([fmin fmax]/1E9)
    legend("aktiivtakistus", "reaktiivtakistus")
```

Joonis 9. Antenni impedantsi simuleerimine ja kuvamine

5. Resonantssagedusel f_0 on antenni impedantsi imaginaarosa null – antenn käitub takistina. Poolaine dipoolantenni korral on see väärtus ligikaudu $Z_a(f_0) \approx 73\ \Omega$. Tegelik takistus võib sellest erineda tingituna antenni laiusest ja trükkplaadi dielektriku mõjust. Leia sagedus mille juures on antenni impedantsi imaginaarosa kas null või sellele võimalikult lähedane. Märgi ülese selliselt saadud resonantssageduse f_0 hinnang kui ka impedantsi reaalosa väärtus sellel sagedusel. Esita mõlemad tulemused aruandes.

6. Järgmisena hindame antenni ribalaiust. Leia simulatsioonitulemustest antenni töösageduste vahemiku ülemine ja alumine sagedus ($f_{ü}$ ja f_a). Mõlemad sagedused on määratud punktidega sobituse graafikul kus peegelduskadu on sobituse graafikul minimaalsest 3 dB võrra suurem (vt Joonis 2). Simulatsioonitulemuste põhjal ribalaiuse leidmiseks võib kasutada ka spetsiaalset *bandwidth*() funktsiooni mille kasutamist illustreerib Joonis 10. Parameetri nivoo väärtus peab siis olema 3dB võrra suurem kui sobituse miinimumi oma.

```
figure(5)
    bandwidth(antenn, sagedused, "Threshold", nivoo)
    title("Antenni peegelduskadu")
    xlabel("\itf\rm (GHz)")
    ylabel("\itRL\rm (dB)")
    legend("RL","-3dB nivoo","Location","west")
```

Joonis 10. Antenni ribalaiuse leidmine simulatsioonitulemuste põhjal

Kasuta mõõtetulemusi leidmaks nii simuleeritava antenni absoluutne B kui suhteline (protsentuaalne) $B_{\%}$ ribalaius. Arvuta ka antenni hüveteguri Q väärtus. Esita aruandes nii mõõdetud sagedusriba piiride väärtused kui ka kõik kolm arvutatud suurust.

Järgmisena simuleerimine antenni suunategurit. Kuna eelmises praktikumis mõõtsime horisontaalse dipooli suunategurit asimuudi järgi siis alustame ka praegu sellest. Simuleeritud antenni resonantssagedus ei pruugi kokku langeda mõõdetu omaga. Seepärast simuleerime suunadiagrammi mitte sagedusel 915 MHz vaid neljandas punktis välja selgitatud parima sobituse sagedusel f_1.

```
tousunurk = -180:1:180;
figure(6)
    patternElevation(antenn, f1)
    beamwidth(antenn, f1, 0, tousunurk)

figure(7)
    pattern(antenn, f1)
```

Joonis 11. Antenni suunadiagrammi simuleerimine

7. Esmalt simuleerime funktsiooni *patternElevation*() kasutades antenni suunadiagrammi kahemõõtmelise lõike mida saame võrrelda eelmises praktikumis mõõdetuga (Vt. Joonis 11). Jooniselt saame lugeda ka simuleeritud antenni võimenduse *G*. Esita selle väärtus aruandes ja võrdle dipoolantenni teoreetilise väärtusega. Funktsiooniga *beamwidth*() saame mõõta ka simuleeritud antenni suunadiagrammi pealehe laiuse. Esita see väärtus aruandes ka võrdle teoorias antud väärtusega. Esita nii simuleeritud- kui mõõtmiste teel saadud suunadiagrammi lõiked aruandes.

8. Viimasena simuleerime antenni kolmemõõtmelise suunadigrammi. See on midagi mille mõõtmine on aega- ja kalleid katseseadmeid nõudev. Simuleerimiseks ja saadud tulemuste kuvamiseks kasutada funktsiooni *pattern*(). Esita tulemus aruandes joonisena.

<u>Aruandes esitada:</u>

Alljärgnev kontrollnimekiri aitab esmalt veenduda, et kõik vajalikud mõõtmised on tehtud ja nende tulemused aruandes kasutamiseks salvestatud. Samuti aitab nimekiri veenduda, et praktikumi aruandele on lisatud nõutavad arvutused, järeldused ja analüüsi tulemused.

- Antenni ja trükkplaadi mõõdud.
- Koostatud simulatsiooni geomeetria joonis.
- Selgita kuidas ja miks mõjutavad antenni läheduses olevad objektid selle omadusi.
- Simuleeritud- ja eelmises praktikumis mõõdetud peegelduskao sagedussõltuvuste $RL(f)$ graafikud. Mõlema graafiku miinimumide väärtused $RL(f_1)$ ja asukohad f_1 graafikutel.
- Simuleeritud- ja eelmises praktikumis mõõdetud antenni impedantsi sagedussõltuvuste graafikud: $Z_a(f)$.

- Antenni impedants $Z_a(f_1)$ parima sobituse sagedusel f_1. Nii simuleeritud- kui ka mõõtmistel saadud väärtused.
- Antenni resonantssagedus f_0 and selle impedants antud sagedusel $Z_a(f_0)$.
- Antenni töösageduse alumine f_a ja ülemine piir $f_{ü.}$ Nende väärtuste põhjal arvutatud B, $B_{\%}$ and Q väärtused. Kuidas langevad tulemused kokku eeldatavatega, kas tegemist on kitsa- või laiaribalise antenniga?
- Antenni suunadiagrammi lõige parima sobitusega sageduse juures. Võrdle saadud tulemust eelmises praktikumis mõõdetud tulemustega. Simuleeritud antenni võimenduse ja suunadiagrammi laiuse väärtused ning nende võrdlus teoreetilistega.
- Simuleeritud antenni kolmemõõtmeline suunadiagramm joonisena.
- Võrdle omavahel mõõte- ja simulatsioonitulemusi, kuidas langevad need omakoda kokku teooriaga? Anna hinnang erinevuste suurusele. Milles võivad suurimad erinevused põhjustatud olla?

Täiendavaid materjale:

[1] Antenna Basics. https://www.antenna-theory.com/basics/main.php, 04.10.2026
[2] C. A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design. Second ed.
[3] Matlab Help Centre. dipole - Create regular or AI-based strip dipole antenna - MATLAB, 17.10.2026

LISA A - Mõõtetulemuste lugemine CSV failist MATLAB keskkonda.

Siduanalüsaatori FSH-4 mõõtetulemused salvestatakse .csv formaadis faili. Järgnevalt toodud skriptilõiguga saab need lugeda MATLAB keskkonda ja salvestada edasiseks kasutamiseks tabelisse T.

```
% Mõõtetulemuste lugemine
failinimi = 'C:\Users\Praktikumid\Antenna.csv';

lines = readlines(failinimi);
headerRow = find(contains(lines, "Frequency [Hz]"), 1);

T = readtable(failinimi, ...
    'Delimiter', ';', ...
    'DecimalSeparator', ',', ...
    'NumHeaderLines', headerRow - 1, ...
    'ReadVariableNames', true, ...
    'VariableNamingRule', 'preserve');

moodetudSagedused = T.("Frequency [Hz]");
moodetudRL = T.("Magnitude [dB]");
```

Joonis A.1 R&S FSH-4 siduanalüsaatori mõõtefaili sisu lugemine MATLAB keskkonda ja mõõtetulemuste kuvamine

Järgnev koodilõik illustreerib seda kuidas simulatsiooni- ja mõõtetulemusi samal graafikul koos kujutada.

```
% Peegelduskao sagdussõltuvus:
 S = sparameters(antenn, sagedused);
 figure(3)
    rfplot(S)
    hold on
        plot(moodetudSagedused/1E9, moodetudRL)
    hold off
    title("Antenni peegelduskadu")
    xlabel("\itf\rm (GHz)")
    ylabel("\itRL\rm (dB)")
    xlim([fmin fmax]/1E9)
    legend('simuleeritud','mõõdetud')
```

Joonis A.1 Simulatsiooni- ja mõõtetulemuste samas teljestikus kujutamise näide