3. ANTENNIVÕRE SIMULEERIMINE

THOMAS JOHANN SEEBECKI ELEKTROONIKAINSTITUUT

TALLINN
2026

Antennide ja raadiolevi IEE2580 laboratoorne töö

Antennivõre simuleerimine

Töö eesmärgid:

Töö eesmärgiks on tutvuda antennivõre ehituse ja omadustega. Kuna seda on praktikas üsna keeruline ja aeganõudev teha siis on abiks võetud numbrilised simulatsioonid.

Kasutatavad seadmed ja vahendid:

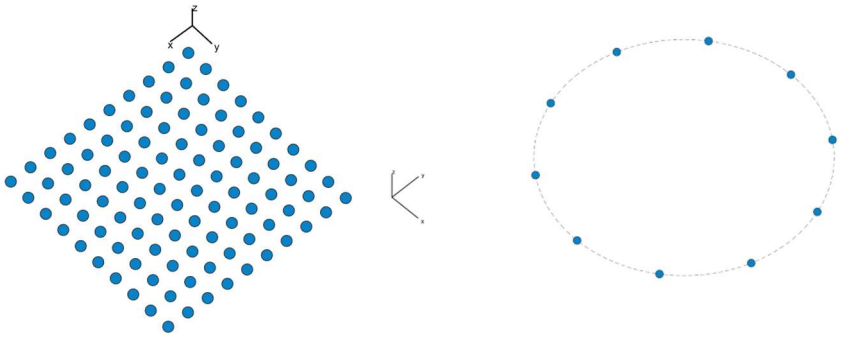
- MATLAB tarkvaraga personaalarvuti. Vajalikud on järgmised lisapaketid:
  - *Antenna Toolbox*
  - *Phased Array System Toolbox*

Töö teoreetilised alused:

Antennivõre on süsteem, mis koosneb mitmest üksikust antennielemendist, mis toimivad ühtselt ühe integreeritud seadmena raadiolainete edastamiseks või vastuvõtmiseks. Samu printsiipe on võimalik rakendada ka teiste sensorite või allikate korral akustikas, hüdrograafias ja mujal, seega kasutatakse ka üldisemat terminit **sensorvõre**.

Elementide vastastikune asend võres võib olla meelevaldne kuid kõige enam kasutatakse ühtlaseid **lineaarseid-, tasapinnalisi** või **ümmargusi võresid** (Joonis 1). Esimeses paiknevad elemendid ühtlaste vahedega sirges reas, teised nelinurkse võrgustiku ristumispunktides ning viimases ühtlastel vahekaugustel pikki ringjoont. Käesolevas praktikumis simuleerime ühtlast lineaarset võret.

Antennivõre omadused sõltuvad selle elementide arvust *N*, elementide omavahelistest kaugustest *d*, võre topoloogiast (lineaarne, tasapinnaline jne.) ning võre elementidena kasutatavate antennide omadustest.



Joonis 1. Tasapinnalise ja ümmarguse võre elementide paigutused

Juhul kui ühtlane ja lineaarne antennvõre koosneb isotroopsetest kiirguritest mis paiknevad pikki koordinaatsüsteemi z-telge iseloomustab tema suunaomadusi kaugväljas **võretegur** (*array factor*)

$$AF(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd\cos\theta + \beta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd\cos\theta + \beta)\right]}, \quad (1)$$

kus θ on tõusunurk, β faasinihe järjestikuste võreelementide ergutusvoolude vahel ja lainearv

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}, \quad (2)$$

kus f on kiiratava/vastuvõetava signaali sagedus ja c on laine levikiirus (valguse kiirus vaakumis).

Kõik reaalsed antennivõred (Joonis 3) koosnevad füüsiliselt realiseeritavatest antennides milledel on oma suunaomadused. Kui võre elemendi tekitatud elektrivälja tugevus on $\mathbf{E}_e(\theta, \varphi)$, siis antennivõre elektrivälja tugevus on lihtsalt elemendi tekitatud välja ja võreteguri korrutis:

$$\mathbf{E}(\theta, \varphi) = \mathbf{E}_e(\theta, \varphi) \cdot AF(\theta, \varphi). \quad (3)$$

Horisontaalkiirguse antennivõre korral (*broadside array*) korral on isotroopsetest kiirguritest koosnva võre suunateguri ligikaudne avaldis [1]

$$D_0 \approx 2N\frac{d}{\lambda}. \quad (4)$$

Reaalsetest antennidest koosneva võre suunategur on siis viimase avaldise ja elemendi suunateguri korrutis. Logaritmilisel skaalal väljendatuna (dBi) nende kahe suuruse summa. Tegelik seos on keerukam, tingituna võre elementide omavahelisest vastastikusest mõjust (sidestusest).

Ligikaudne suunadiagrammi pealehe laius, -3dB nivool on [1]

$$HPBW = 2\left[\frac{\pi}{2} - \operatorname{acos}\left(\frac{1{,}391\lambda}{\pi N d}\right)\right]. \quad (5)$$

Joonis 2 kujutab kaheteistkümne elemendiga ühtlase lineaarse võre suunategurit. Kriipsjoonega on kujutatud – 3dB nivoo ja sellel vastavad tõusunurga väärtused. Antud näiteks on pealehe laius umbes 8,7°.

Kui kõik võre elemendid on identsed ja neid ergastatakse võrdsete amplituudidega vooludega siis on sellise võre külglehtede nivoo (*sidelobe level*), ehk suurima külglehe nivoo pealehe oma suhtes ligikaudu -13 dB. Reaalsete võre elementide suunateguri mõjul võib see nivoo olla väiksem, seda just juhul kui elementide suunategurid on kitsad. Joonis 2 illustreerib külglehtede nivoo mõistet kus vastav suurus on kujutatud alumise horisontaalse kriipsjoonega.

Vaikimis saadav külglehtede nivoo väärtus -13 dB ei pruugi olla paljude rakenduste jaoks piisav. Võre sooritust selles vallas on võimalik parandada kui erinevaid võre elemente toita erineva amplituudiga ergutusvooludega. Matemaatiliselt saab seda

väljendada kaalude vektori **w** kaudu mille n-inda elemendi väärtus w_n on reaalarvuline konstant millega tuleb läbi korrutada n-inda võre elemendi ergutusvoolu amplituud

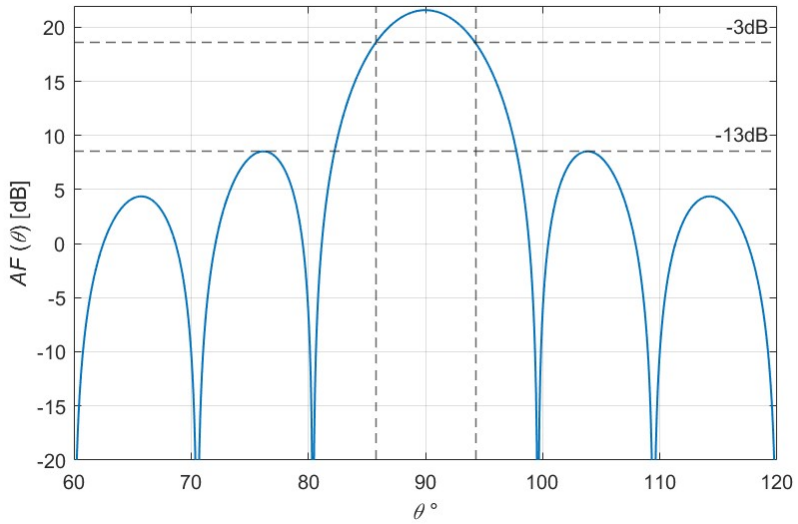
$$\mathbf{w} = [\, w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n \quad \cdots \quad w_N]. \tag{6}$$

Algset võreteguri avaldist

$$AF = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{e}^{\mathrm{j}(n-1)(kd\cos\theta+\beta)} \tag{7}$$

tuleb täiendada kujule

$$AF = \sum_{n=1}^{N} w_n \cdot \mathrm{e}^{\mathrm{j}(n-1)(kd\cos\theta+\beta)}\,. \tag{8}$$



Joonis 2. Antennivõre suunadiagrammi laius - 3 dB nivool ja külglehtede nivoo

Konkreetsete kaalude **w** valikus on palju võimalusi. Mida rohkem need külglehti maha suruda võimaldavad seda laiemaks muutuv võre pealeht ja vastupidi. Algset olukorda, kus kõikide elementide ergutusvoolud on võrdsed kirjeldab kaalude vektor **w** mille kõik elemendid on võrdsed ühega.

Kõige rohkem väheneb külglehtede nivoo binoomsete kaalude kasutamise korral (*binomial taper*). Binoomse võre kaalud leitakse valemiga

$$w_n = C_{N-1}^{n-1}, \tag{9}$$

kus

$$C_n^k = \frac{n!}{(n-k)!\,k!}. \tag{10}$$

Seejärel normeeritakse kõik kaalud jagades need läbi suurima kaalu väärtusega max(w_n). Saadud kaalud on sümmeetrilised, seega välja tuleb arvutada ainult esimene pool (1…N/2). Teine pool on samade väärtustega ainult vastupidises järjekorras, ehk võrdsed on esimene ja viimane kaal, teine ja eelviimane jne. Binoomsete kaaludega võre korral on pealehe laius aga maksimaalne võimalikust – see on hind mida tuleb tasuda külglehtede mahasurumise eest.

Üheks antennivõre kasulikuks omaduseks on võimalus selle suunadiagrammi kallutamiseks meelevaldsesse suunda ainult elektrooniliste vahenditega, ilma võret füüsiliselt liigutamata. Selleks et tüürida suunadiagrammi maksimum soovitud suunda θ_0 peab naaberelementide vaheline faasinihe olema

$$\beta = -kd\cos\theta_0\,. \tag{11}$$

Vastavad tüürvektori elemendid oleksid siis

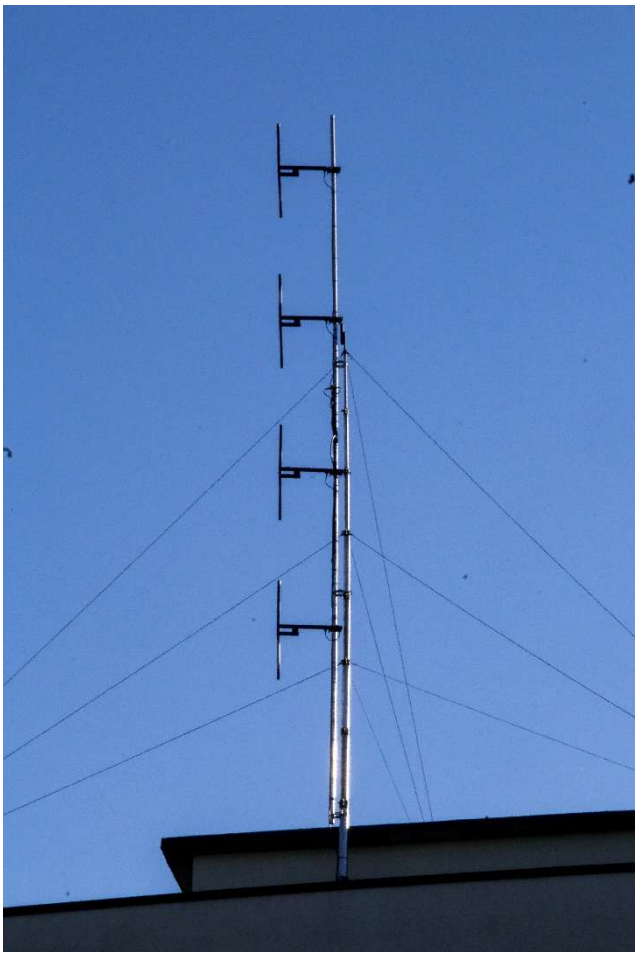
$$\mathbf{w}(\theta_0) = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi\cos\theta_0} \\ \mathrm{e}^{-2\mathrm{j}\pi\cos\theta_0} \\ \cdots \\ \mathrm{e}^{(1-N)\mathrm{j}\pi\cos\theta_0} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}. \tag{12}$$

Suunadiagrammi kallutamisega kaasneb pealehe laiuse suurenemine. Väikeste nurkade juures on see vähemärgatav kuid mõju kasvab koos kõrvalekaldega. Seega praktikas piirdutakse kõrvalekalletega mis ei ületa 45…60°.

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.

Kõik võre parameetrid on soovitav lisada oma skripti algusesse, selliselt on nad kergesti leitavad ja vajadusel on nende väärtuste muutmine kiire ja lihtne.



Joonis 3. Vertikaalse polarisatsiooniga dipoolidest nelja elemendiga antennivõre

Esmalt võtame eesmärgiks simuleerida Joonis 3 kujutatud struktuuriga antennivõret. Leiame fotolt võre elementide arvu N. Eeldame, et igaks elemendiks on poollaine-dipool mis on valmistatud 4 cm läbimõõduga alumiiniumtorudest. Elementide vahekauguse d hinnangu saame joonlaua abil samuti fotolt leida. Oletame, et võre ja selle elementide töösagedus on $f = 440$ MHz.

MATLAB keskkonnas kasutatava lameda dipoolantenni mudeli laius w on reaalse silindrilise antenni raadiusega r seotud valemiga $w = 4r$. Ära unusta võre elemendiks oleva dipoolantenni materjali valikut vastavalt lähteülesandes toodule. Samuti järgi, et võre elemendi orientatsioon oleks vertikaalne – paikneks koordinaatsüsteemi z-telje sihis.

1. Leia võre elemendiks oleva dipoolantenni vajalikud mõõtmed ja loo funktsiooni dipole() kasutades vajalike parameetritega (pikkus, laius, orientatsioon ja materjal) võre element. Esita aruandes elemendi mõõdud *d* ja *w* ning show() funktsiooniga saadud elemendi mudeli joonis.

Antennvõre enda simuleerimiseks on MATLAB keskkonnas mitmeid võimalusi. Antud juhendis toodavad näited tuginevad *Antenna Toolbox* kooseisus olevale funktsioonile linearArray() kuid võib kasutada ka *Phased Array System Toolbox* olevat phased.ULA() objekti. Samuti võib kasutada teoreetilises osas toodud avaldisi otse. See lahendus võib olla sobiv siis kui kasutada simuleerimiseks muud tarkvara mitte MATLAB'i.

2. Loo antennivõre mudel. Võre peab olema nõutud orientatsiooniga ja koosnema etteantud arvust dipoolidest mille mõõtmed, vahekaugused ja omavaheline orientatsioon peavad kõik vastama ülesande lähtetingimustele.

   Esita võre mudeli joonis aruandes. Jooniselt peab näha olema võre enda ja selle elementide orientatsioonid.

3. Simuleeri võre kolmemõõtmeline suunadiagramm (suunategur) $D(\theta, \varphi)$, ja esita see töö aruandes. Kui suur on võre suunategur D_0 võrdle saadud tulemust eeldatava teoreetilisega.

4. Järgnevalt simuleeri võre suunateguri lõige *xz*- tasandiga ($\varphi = 0$) $D(\theta, 0)$. Esita tulemus aruandes. Leia võre pealehe laiuse HPBW ja külglehtede nivoo hinnangud, esita need suurused aruandes ja võrdle neid eeldatavate teoreetiliste väärtustega.

Joonis 4 kujutab ühte võimaliku lahenduskäiku eelmise kolme punkti tulemuste leidmiseks.

```
vore = linearArray("Element", element,"NumElements", N,"ElementSpacing"...,
                   d, "Tilt", 90, "TiltAxis", [0 1 0])
figure(1)
    layout(vore)
    title('Võre geomeetria')

figure(2)
    show(vore)
    legend('alumiinium', 'toide')
    title('Lineaarne võre dipoolantennidest')

figure(3)
    pattern(vore, sagedus,'Type','directivity')

figure(4);
    patternElevation(vore, sagedus)

fprintf('Võre pealehe laius on %.2f °.\n ', ...
        beamwidth(vore, sagedus, 0, -180:180))
```

Joonis 4. Võimalik viis võre mudeli koostamiseks ja analüüsimiseks

5. Järgnevalt vähendame külglehtede nivood. Selleks on meil vaja sobivat kaalude vektorit **w** (6). Valige endale meelepärane kaalude tüüp: binoomne, Taylori, Dolph-Tšebõšovi vms ja leidke vajalikud kaalude väärtused. Mõned näited viimaste leidmiseks on toodud Joonis 5.

   Seejärel simuleeri uuesti võre suunateguri lõige *xz*- tasandiga ($\varphi = 0$) $D(\theta, 0)$ ja esita tulemus aruandes. Kui palju on nüüd külglehtede nivoo vähenenud ja kui palju on laienenud võre suunadiagrammi pealeht?

```
useTapper = true; % Kasuta koondetegurit

if useTapper
    taperType = 'binomial'; % 'Taylor', 'Blackman', 'binomial'

    switch taperType
        case 'Taylor'
            taper = taylorwin(N);
        case 'Blackman'
            taper = blackman(N + 2);
            taper(1) = [];
            taper(end) = [];
        case 'binomial'
            taper = arrayfun(@(x) nchoosek(N-1, x), 0:(N-1));
            taper = (taper/ max(taper))';
    end
else
    taper = ones(N, 1); % rectangular by default - no tapper
end

vore = linearArray("Element",element,"NumElements", N,"ElementSpacing",...
d, "Tilt", 90, "TiltAxis", [0 1 0], "AmplitudeTaper", taper);
```

Joonis 5. Erinevat tüüpi kaalude vektorite leidmise ja kasutamise näide

Järgnevalt vaatame kuidas võre suunadiagrammi elektrooniliselt tüürida ja kuidas tekitada soovitud suunda, häirete mõju vähendamiseks, suunadiagrammi null. Et efektid paremini näha oleksid loome selle jaoks **uue võre**. Valime elementide arvu N vahemikust 8…12 ja elementide vahekauguseks d pool lainepikkust või veidi vähem. Töö lihtsustamiseks jätame selle võre elementideks teoreetilised isotroopilised kiirgurid.

6. Esmalt simuleeri uue võre suunadiagrammi kahemõõtmeline lõige juhul kui kõik elemendid on sama faasinihkega ($\beta = 0$) – ehk olukorras kus elektroonilist tüürimist ei teostata. Leia ka võre suunategur D_0 ja pealehe laius HPBW. Esita joonis ja suundiagrammi parameetrid aruandes.

7. Vali uus suund θ_0 kuhu soovid oma võre suunadiagrammi kallutada. Leia selleks vajalik kaalude vektor **w** ja simuleeri suunadiagramm. Veendu, et antennivõre suunadiagrammmi pealeht on tõepoolest sellese suunda kallutatud. Kas ja kuidas on muutunud võre suunategur ja suunadiagrammi pealehe laius? Esita aruandes simuleeritud suunadiagrammi lõige joonisena.

```
antpos = (0:N-1)*d; % antennide asukohad
ang_d = -15;  % Suunadiagrammi maksimum - huvipakkuva signali suund.

% Tüürvektor soovitud signaali vastuvõtmiseks
w_d = steervec(antpos, ang_d);

% Suunategur
ang_plot = -90:0.1:90;
P_d = mag2db(abs(arrayfactor(antpos, ang_plot, w_d)));

figure(1);
    plot(ang_plot, P_d, 'LineWidth', 0.8)
    xline(ang_d,'--','LineWidth',0.8,'Label', ...
    ['\it\phi_0\rm = ',num2str(ang_d),'°'],'LabelVerticalAlignment', ...
    'middle')

    axis([-90 90 -40, 20])
    xlabel('\it\phi\rm °')
    ylabel('\itD\rm(\it\phi\rm) [dB]')
    grid on
```

Joonis 6. Võimalik viis antennivõre suunadiagrammi elektroonilise tüürimise simuleerimiseks

Viimasena simuleerime suunadiagrammi soovitud suunda nulli tekitamist. Vali lisaks soovitud signaali suunale θ_0 häiresignaali suund θ_h. Formeeri eraldi tüürvektor $\mathbf{w}_h$ antennivõre pealehe häiresignaali suunda formeerimiseks.

Selle suunadiagrammi maksimum peab olema võrdne soovitud suunda häälestatud suunadiagrammi suunateguriga häiresignaali suunas $D(\theta_h)$. Selleks leiame meie tüürvektori $\mathbf{w}$ projektsiooni $\mathbf{w}_h$ suunas

$$g = \frac{\mathbf{w} \cdot \boldsymbol{w}_h}{\boldsymbol{w}_h \cdot \boldsymbol{w}_h}. \tag{13}$$

Tüürvektor mis tagab suunadiagrammi maksimumi suunas θ_0 ja samal ajal nulli suunas θ_h on leitav kui

$$\mathbf{w} - g\mathbf{w}_h. \tag{14}$$

8. Leia avaldisi (13) ja (14) kasutades vajalik tüürvektor ja simuleeri seda rakendades antennivõre suunadiagramm. Veendu, et tõepoolest on nii maksimumi kui nullid suunad sellised nagu soovitud. Erita saadud suunadiagrammi lõige oma aruandes.

Aruandes esitada:

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.

- Võre elemendi (dipoolantenni) mõõdud d ja w ning selle mudeli joonis.
- Võre mudeli joonis.
- Võre kolmemõõtmelise suunadiagrammi $D(\theta, \varphi)$ joonis. Simulatsiooni teel leitud suunategur D_0 ja selle võrdlus teoreetilisega.
- Võre suunadiagrammi lõige $D(\theta, 0)$. Pealehe laiuse HPBW ja külglehtede nivoo hinnangud ja nende võrdlus teoreetilistega.
- Võre suunadiagrammi lõige $D(\theta, 0)$ kaalude **w** rakendamisel. Milliseid kaale kasutati, kui palju vähenes külglehtede nivoo ja kui palju laienes suunadiagrammi pealeht?
- Punktis 6.) simuleeritud uue võre suunadiagramm ja selle parameetrid.
- Kõrvale kallutatud pealehega suunadiagrammi joonis. Ülevaade suunateguri ja suunadiagrammi pealehe võimalikest muutustest.
- Formeeritud nulliga suunadiagramm joonisena.

Täiendavaid materjale:

[1] C. A. Balanis. Antenna Theory Analysis and Design. Second ed.
[2] MATLAB Help Center. dipole - Create regular or AI-based strip dipole antenna - MATLAB, 17.10.2026
[3] MATLAB Help Center. Introduction to Null Steering - MATLAB & Simulink, 03.11.2026