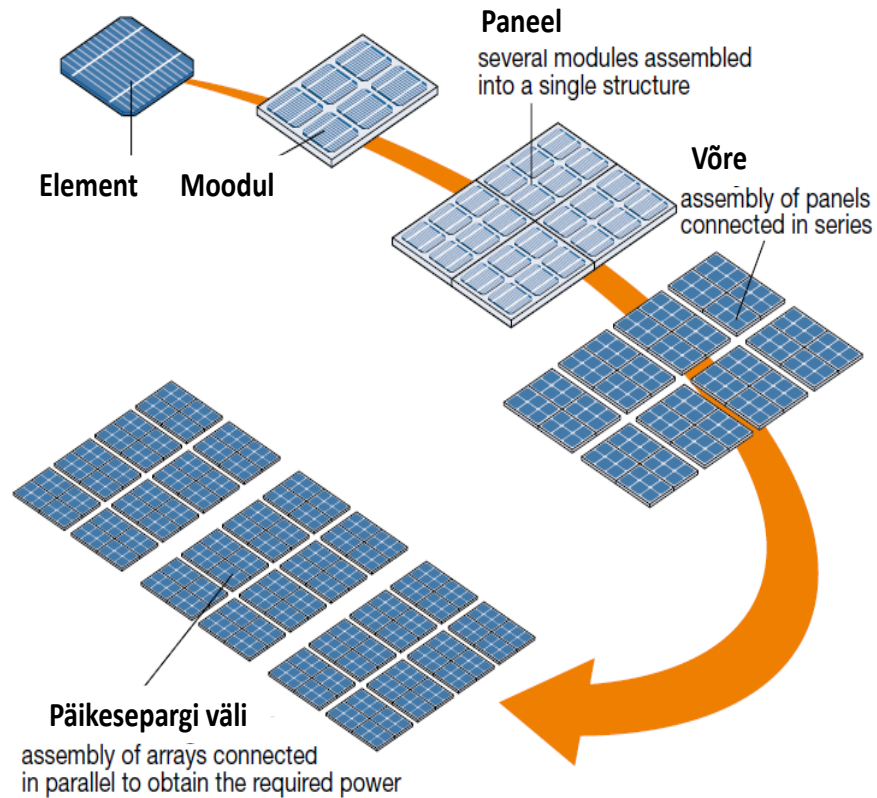


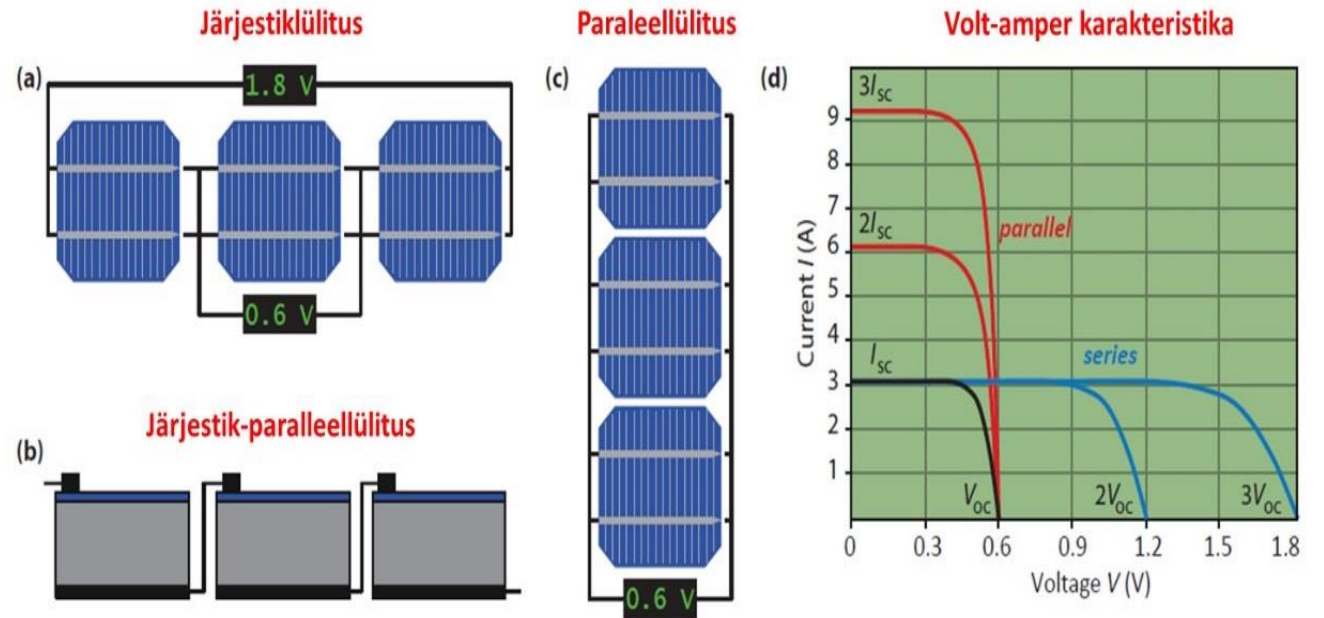
ÜLEVAADE
PÄIKESEPARGI ja TUULEPARGI
RAADIOHÄIRETEST

01-02-2025

Päikese energia elektrienergiaks muundamise koostisosad



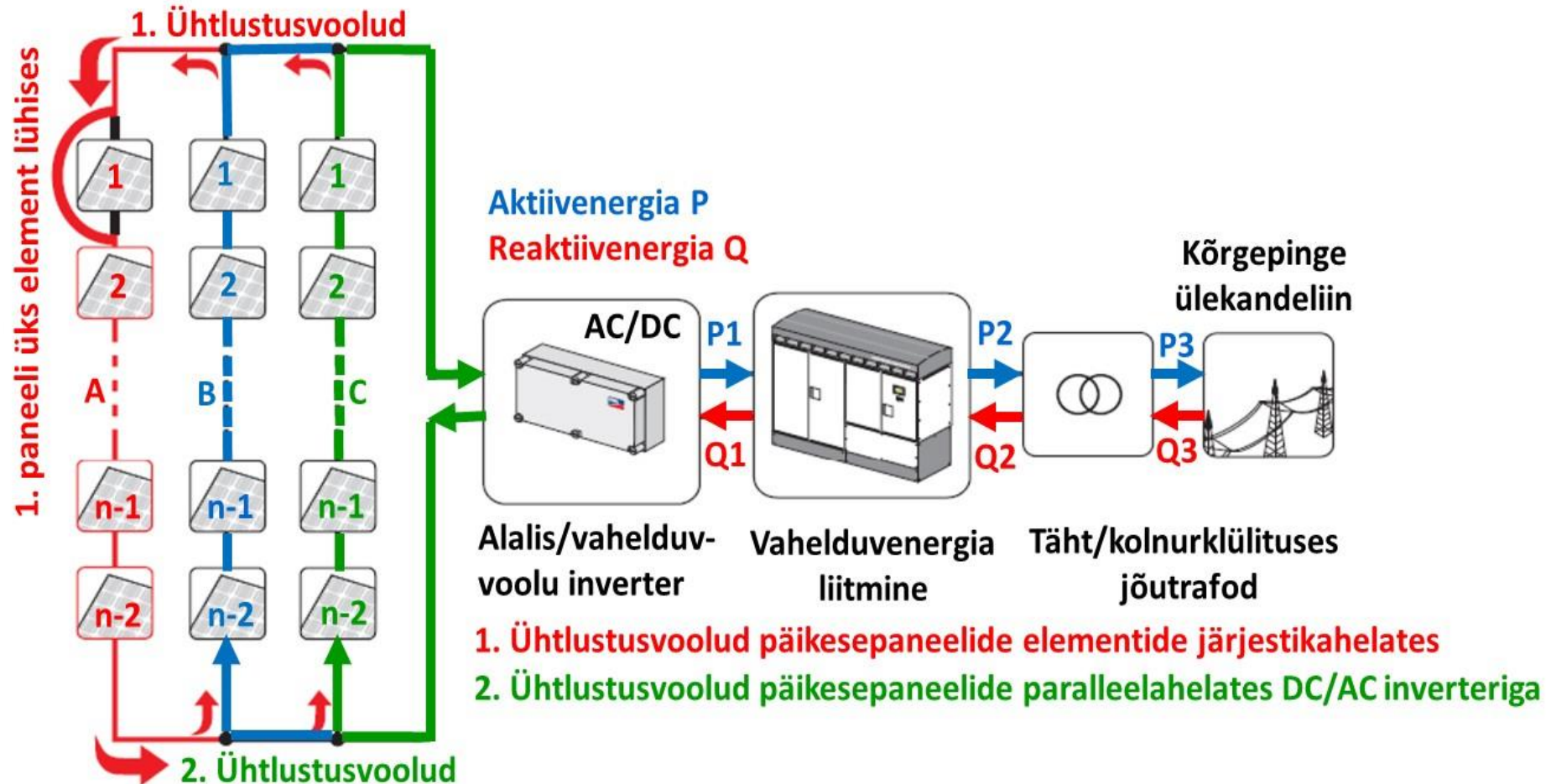
Päikeseenergia elektrienergiaks muundamise koostisosad: element, moodul, paneel, võre, väli.



Päikesepaneelide elektrilised lülituse võimalused:

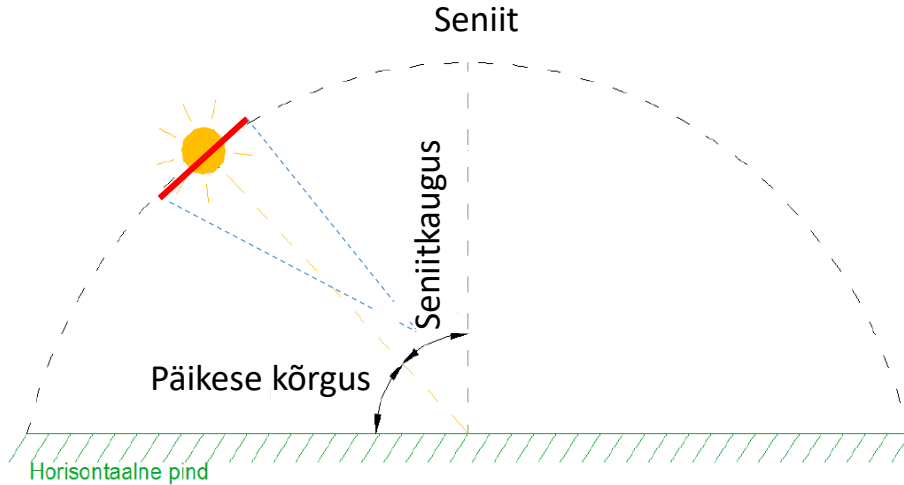
- a) Järjestiklülitus
- b) Järjestik-paralleellülitus (kombineeritud lülitus)
- c) Paralleelne ning kombineeritud lülitus

Päikese energia muundamise põhimõte

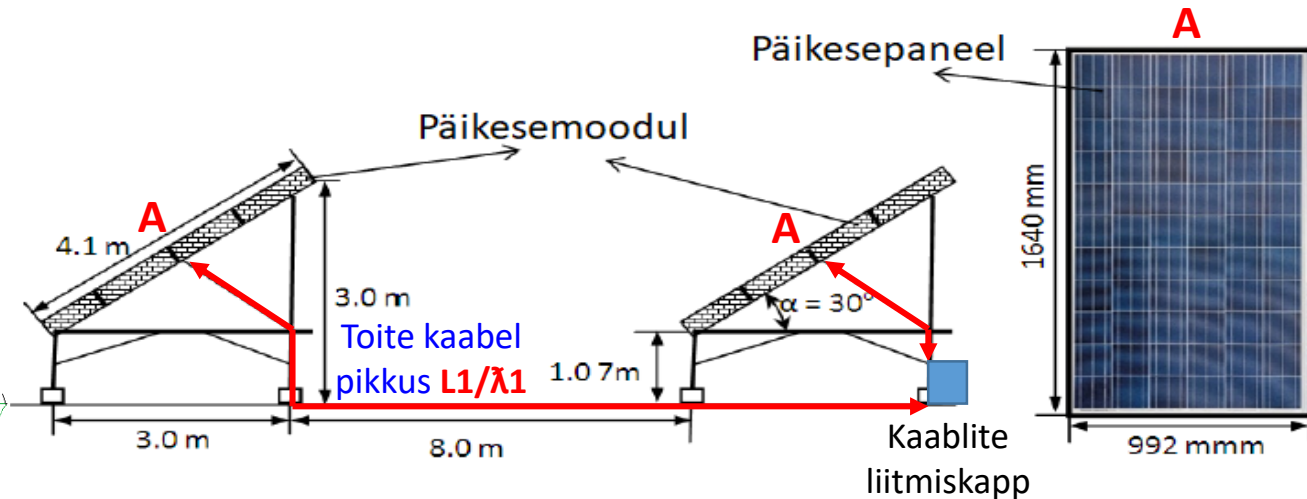


Päikesepaneeli elementide paralleellülitusel tekkivad ühtlustusvoolud, mis vähendavad paneelide töökindlust ning kasutegurit.

Päikese energia muundamine alalis- ja vahelduvvooluks

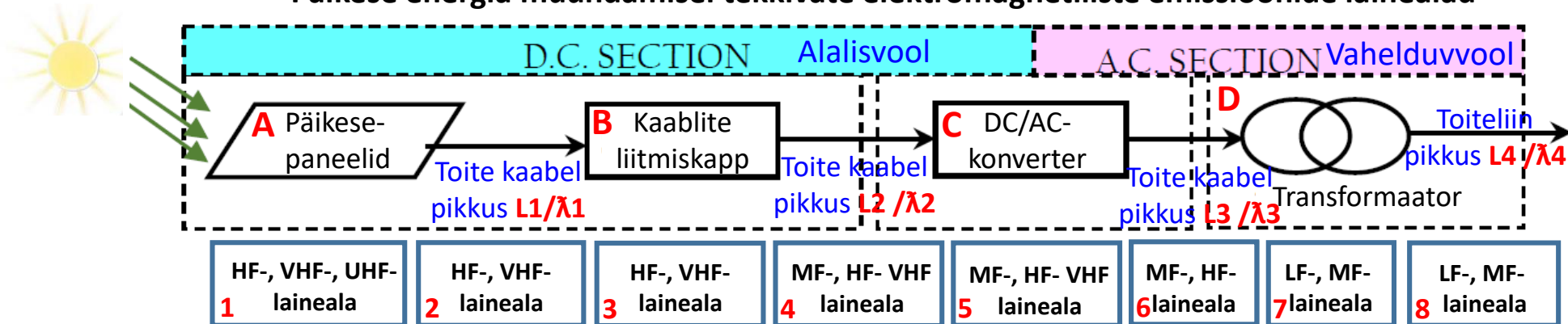


Päikese kõrgus ja seniitkaugus



Päikesepaneelide paigutus ja alalisvoolu toitekaablite paigutus

Päikese energia muundamisel tekkivate elektromagnetiliste emissioonide lainelad

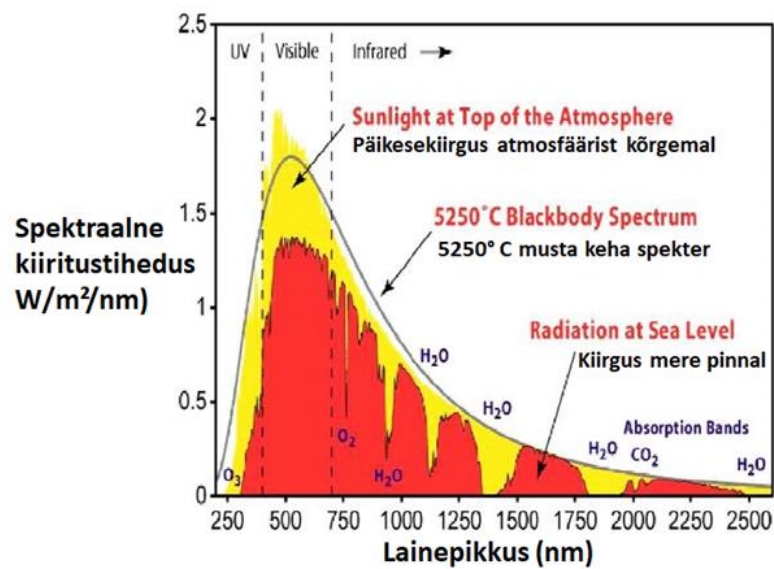
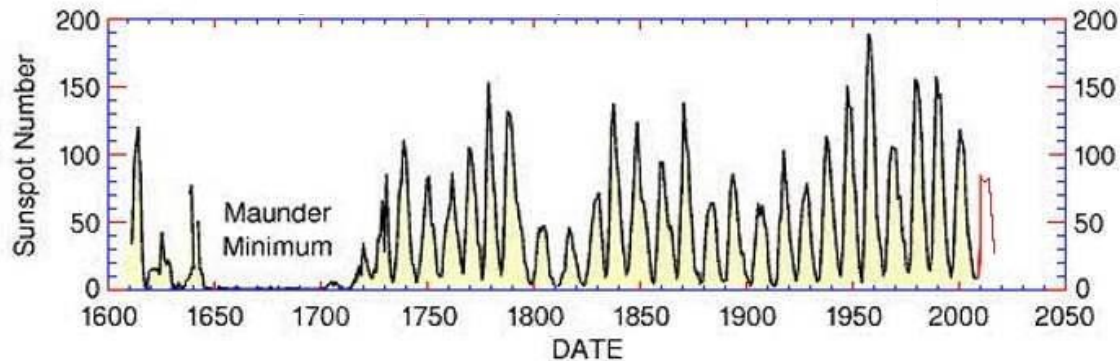


Lainevõrrand seob lainepikkuse λ (m) ja võnkesageduse f (Hz) laine levimise kiirusega $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.
 $\lambda = c/f$; kui $\lambda = 1$ m, siis $f = 300$ MHz; kui $\lambda = 10$ m, siis $f = 30$ MHz; kui $\lambda = 100$ m, siis sagedus $f = 3$ MHz.

Päikeseelement - raadiosagedusliku kiirguse allikas

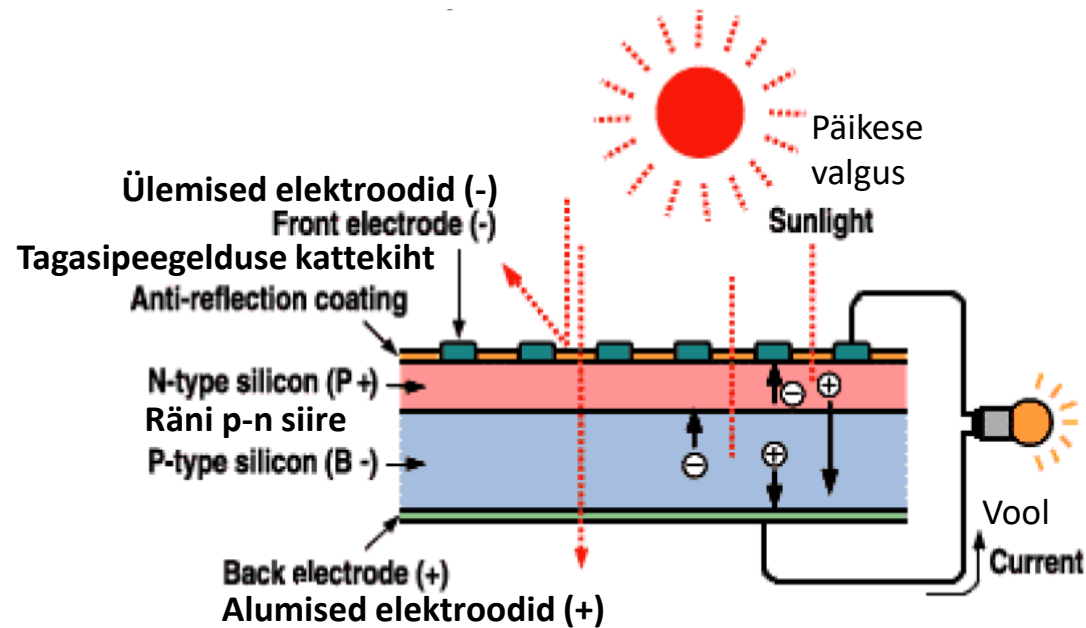
Päikese laikude aktiivsus ajavahemikus 1610 - 2019

Yearly Averaged Sunspot Numbers 1610-2019



Päikese kiirguse spektraalne tihedus ja lainepikkus

Valguse kiirgusenergia muundamise efekt

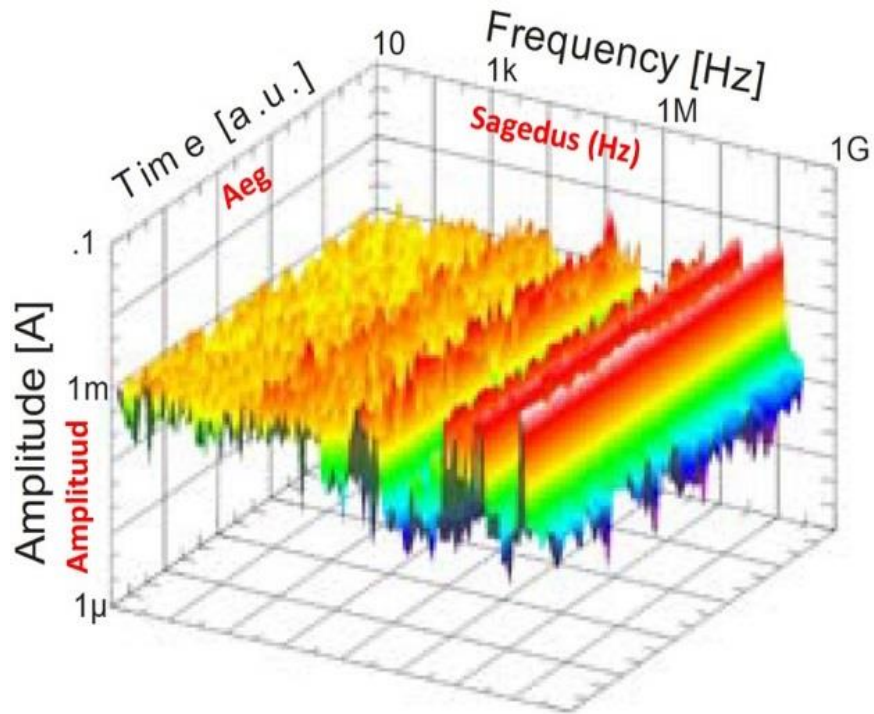


Päikese-elementi ristlõige:

- Elektroodid rännipooljuhi ühendamiseks
- Ränni n-siire elektronjuhtivusega pooljuht
- Ränni p-siire aukjuhtivusega pooljuht
- Väljund ahel ühendatud koormusega

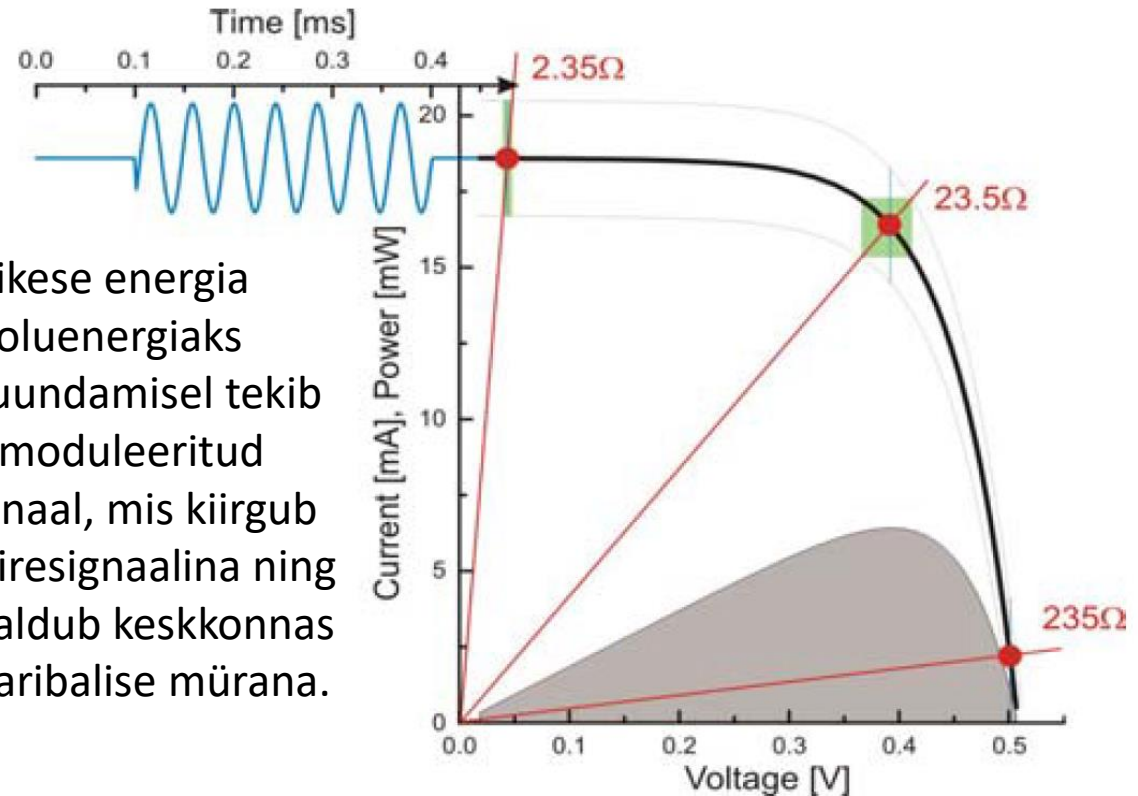
Päikeseelement häiresignaali allikas

Mooduli töötamisel emiteeritav kiirguse spekter



10 W päikesemooduli ühe maatrikselendi voolu müra-spekter ümbritsetuna elektromagnetilisest kiirgusest (Current noise spectra due to ambient electromagnetic radiation of a **10W** solar module).

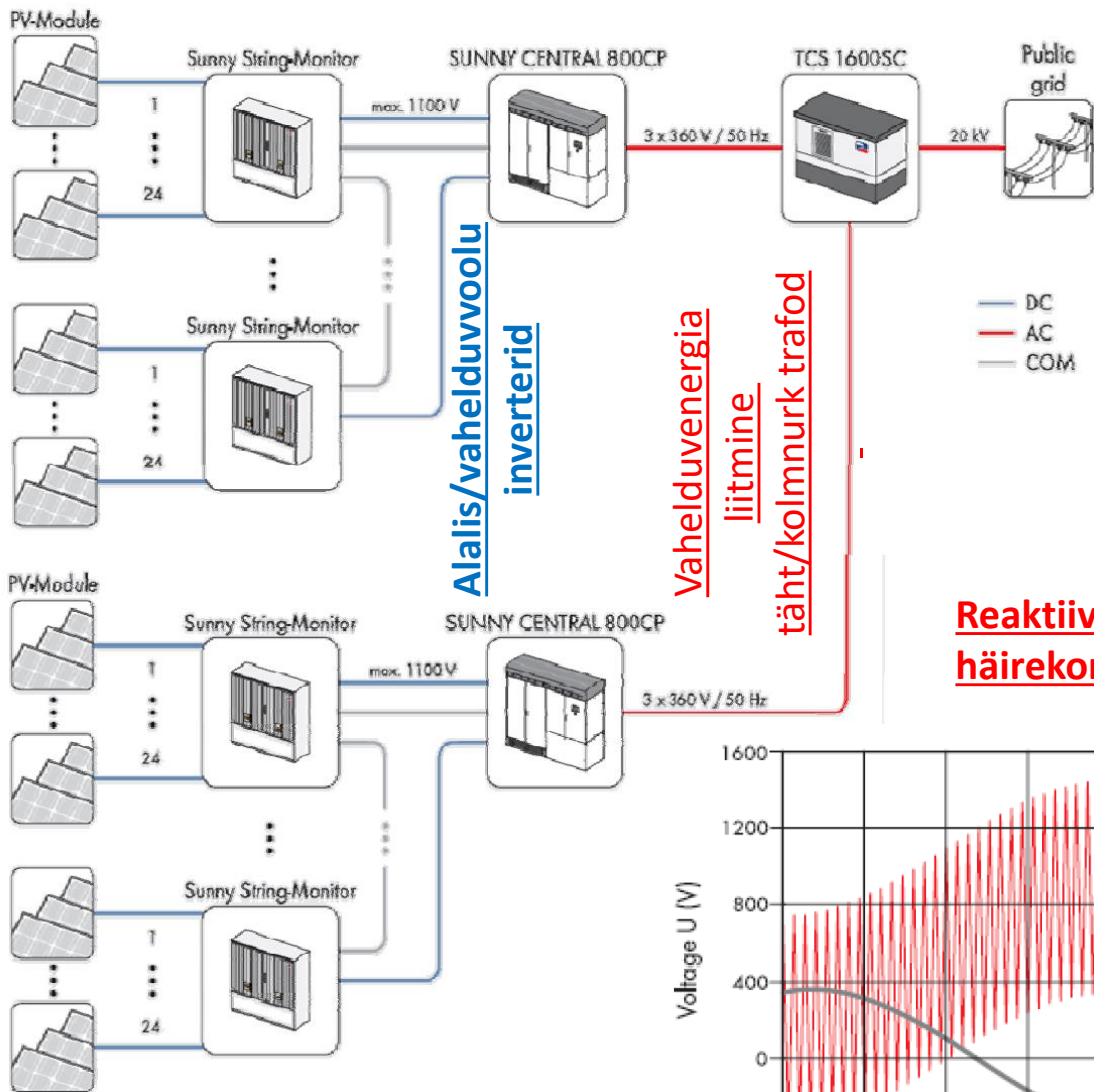
Räni p-n siirde V-A karakteristik ning eralduv elektromagnetiline kiirgus



Päikese energia vooluenergiaks muundamisel tekib demoduleeritud signaal, mis kiirgub häiresignaalina ning avaldub keskkonnas laiaribalise müra.

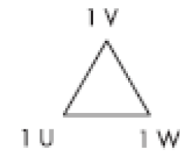
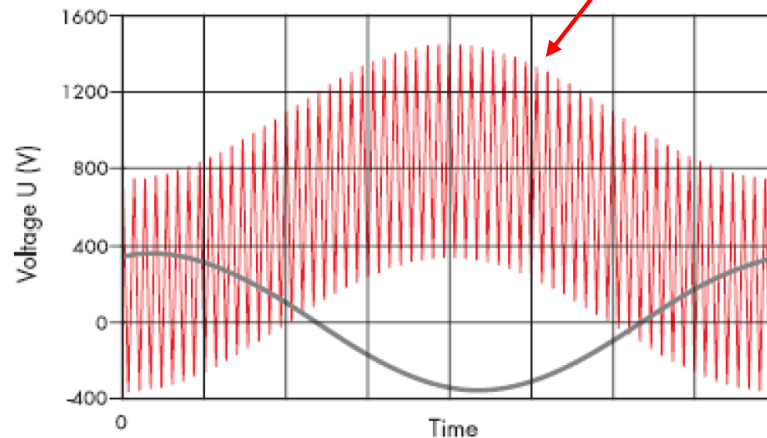
Demodulatsiooni efekt räni-tüüpi päikese elemendil.
The demodulation effect of a mc-Si solar cell.

Täht- ja kolmnurklülitused ning reaktiivenergia

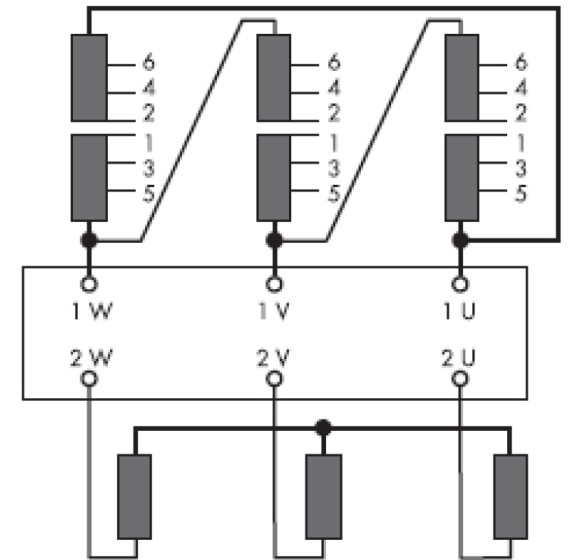


1. Neutraalpunkt (N) maandatud
2. Neutraalpunkt (N) maandamata

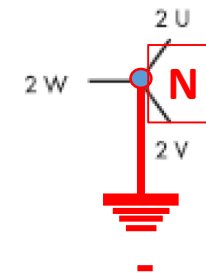
Reaktiivenergia (Q) ja häirekomponendid



Kolmnurklülitus

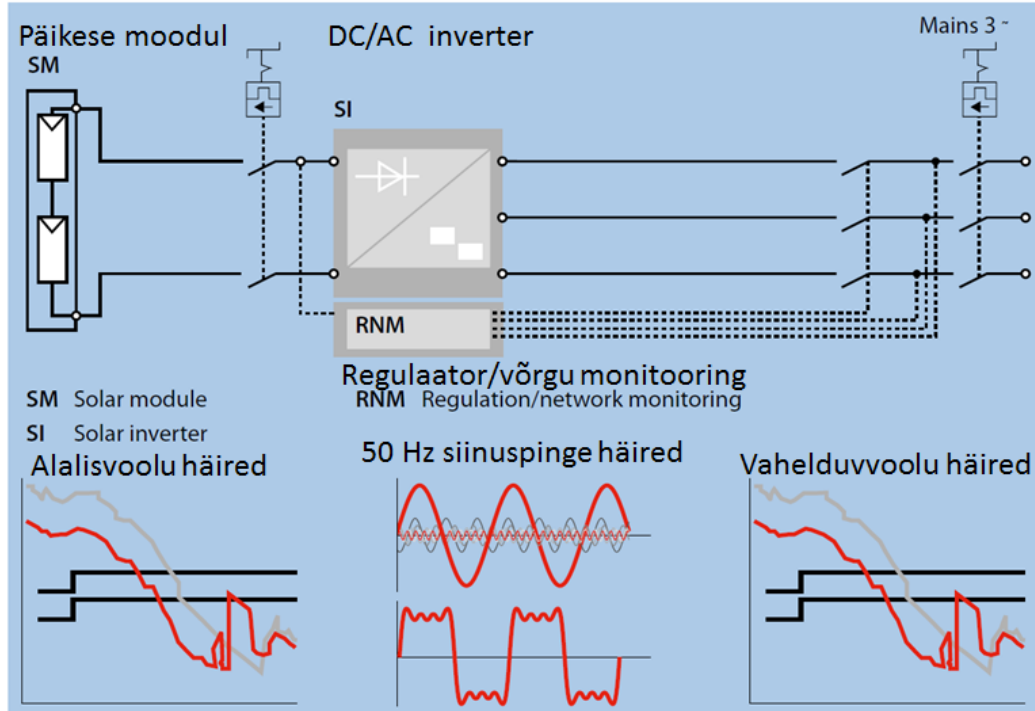


Tähtlülitus

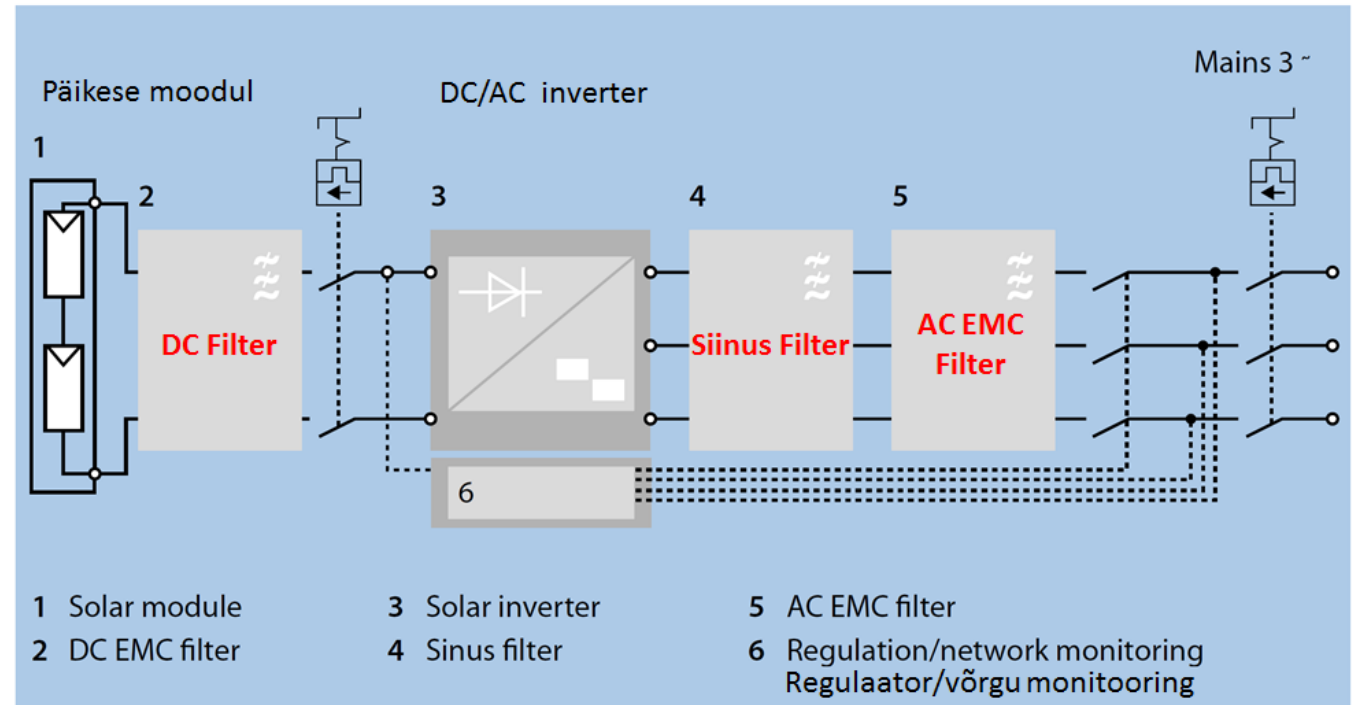


- Maandusahelas reaktiivenergia ja lülitusahelate häirekomponendid
- Täht- ja kolmnurktrafode aktiivenergia ülekanne

Päikesepargi energia muundamisel tekkivad häired



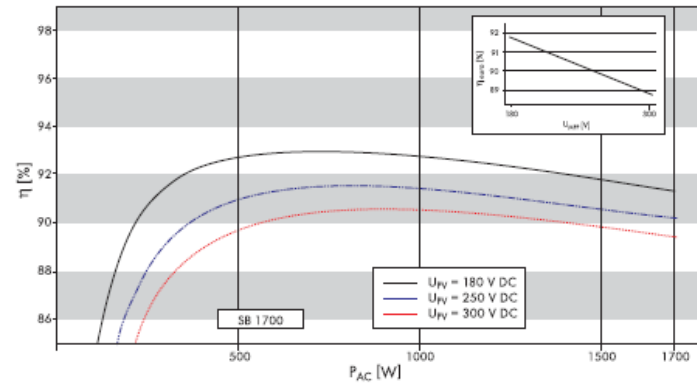
Päikesepargi energia muundamise põhimõtteskeem, milles on näidatud aktiiv- ja passiivseadmete poolt tekitatud elektromagnetilise kiirguse häireid.



Päikesepargi energia muundamise põhimõtteskeem, milles on näidatud erinevad filtrite tüübid: alalisvoolu filter, siinusfilter ja vahelduvvoolu EMC-filter.

Väikese võimsusega päikesenergia muundurite häired

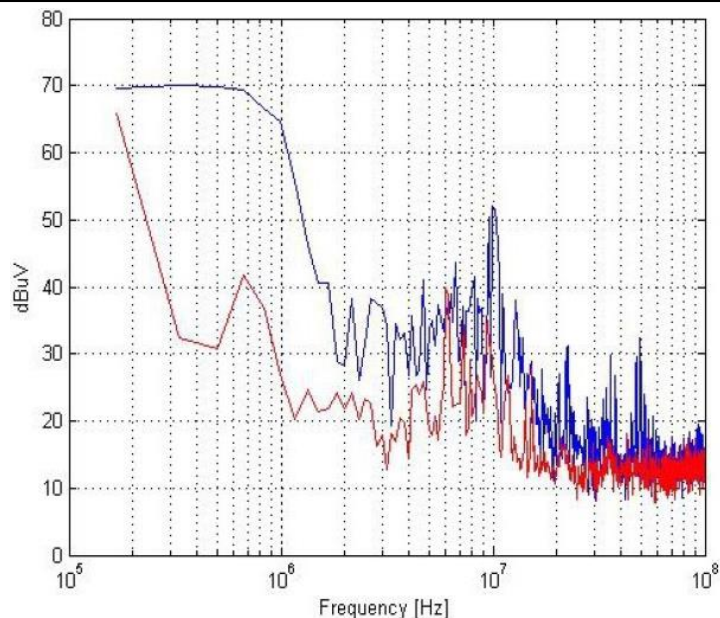
Efficiency curve Efektiivsuse kõverad



	SB 1100	SB 1700
Input (DC)		
Max. DC input power	1210 W	1850 W
Max. DC voltage	400 V	400 V
PV voltage range, MPPT	139 V - 320 V	139 V - 320 V
Max. input current	10 A	12.6 A
Number of MPP trackers	1	1
Max. number of strings (parallel)	2	2
Output (AC)		
Nominal AC output power	1000 W	1550 W
Max. AC output power	1100 W	1700 W
Max. output current	5.6 A	8.6 A
Nominal AC voltage / range	220 V - 240 V / 180 V - 260 V	220 V - 240 V / 180 V - 260 V
AC grid frequency (self-adjusting) / range	50 Hz / 60 Hz / ± 4.5 Hz	50 Hz / 60 Hz / ± 4.5 Hz
Power factor (cos ϕ)	1	1
AC connection	single-phase	single-phase
Efficiency		
Max. efficiency	93.0 %	93.5 %
Euro ETA	91.6 %	91.8 %



SMA sunnyboy (red)



Soladin (blue) SMA (red) RF spectrum

Summarized specifications Soladin 600 (refer to page 30 for extended specifications)

Maximum PV power:	700 Wp
MPP voltage:	45-125 V DC
Maximum input voltage U_{oc} @ -10°C:	155 V DC
Maximum MPP current:	8 A DC

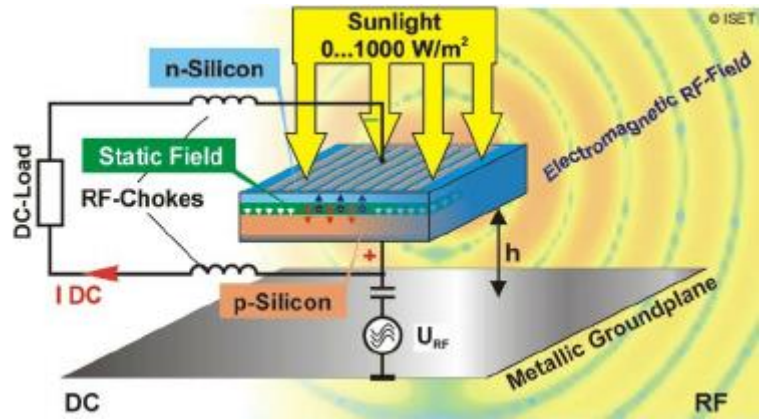
PV module	Power	One string	Two strings in parallel**
36 cells	75 Wp	4 - 6 in series	4 in series
$U_{oc} = 28V^*$	100 Wp	4 - 6 in series	--
$U_{mpp} = 18V^*$	125 Wp	4 - 5 in series	--
	150 Wp	4 (5) in series	--
54 cells	75 Wp	3 - 4 in series	3 - 4 in series
$U_{oc} = 32V^*$	100 Wp	3 - 4 in series	3 in series
$U_{mpp} = 27V^*$	125 Wp	3 - 4 in series	--
	150 Wp	3 - 4 in series	--
	175 Wp	3 - 4 in series	--
72 cells	75 Wp	2 - 3 in series	2 - 3 in series
$U_{oc} = 43V^*$	100 Wp	2 - 3 in series	2 - 3 in series
	125 Wp	2 - 3 in series	2 in series
	150 Wp	2 - 3 in series	2 in series
	175 Wp	2 - 3 in series	2 in series



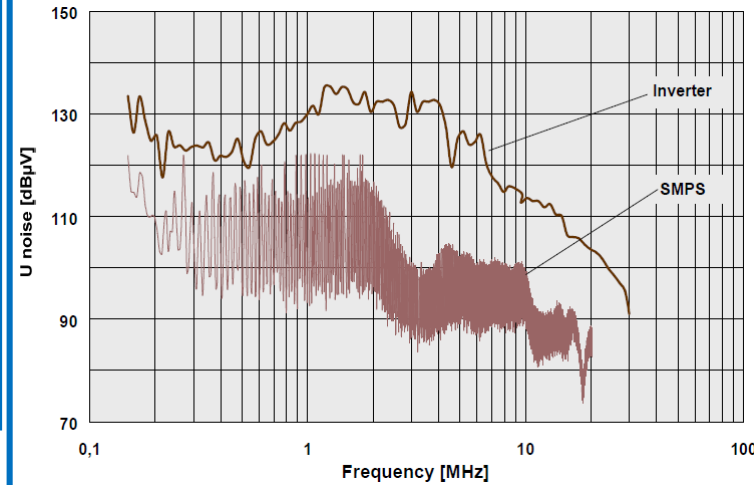
Soladin 600 (blue one)

Päikesepargi kiirgushäirete filtreerimine

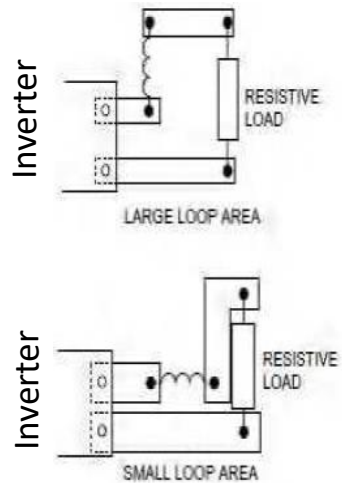
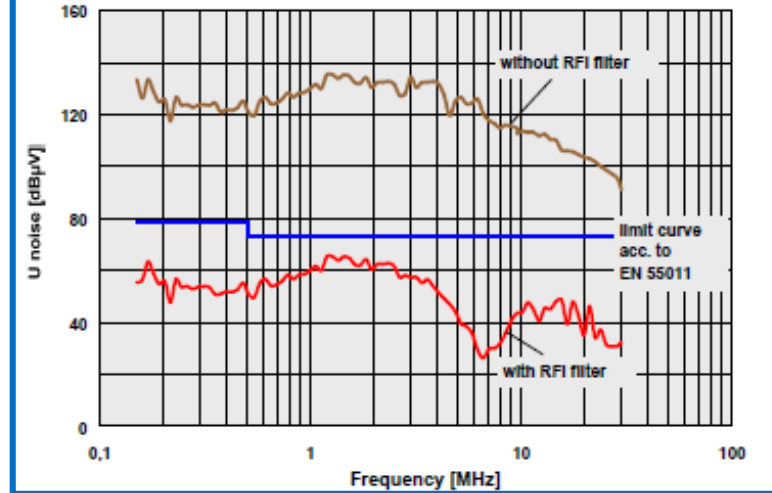
Päikesepaneel - laiaribalane müra antenn



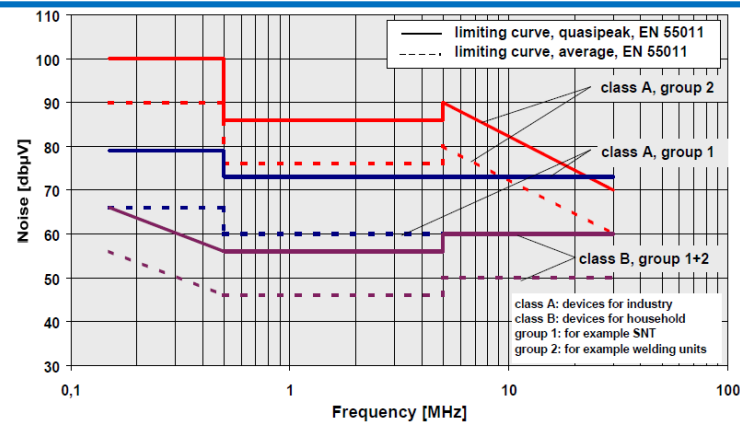
Alalis/vahelduvvoolu inverteri spekter



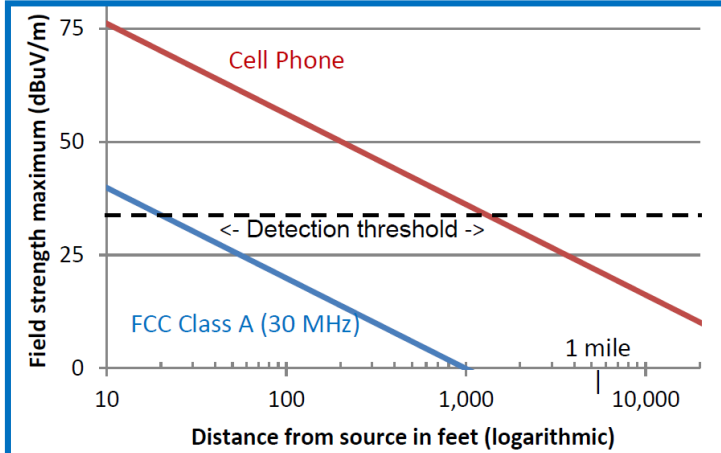
Kiirguse spekter filtriga ja filtrita



Suure ja väikese võimsusega päikesepargi ekvivalentskeem

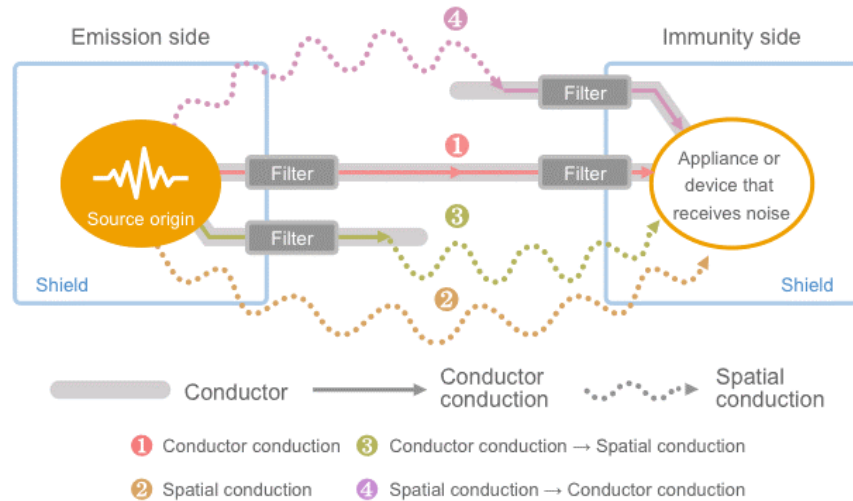


Tööstuslike seadmete kiirgusnormid



Lennuvälja lähialade kiirguspiirangud

Päikesepargi kiirgushäirete filtrid

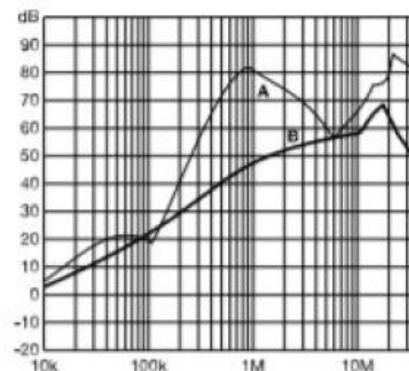
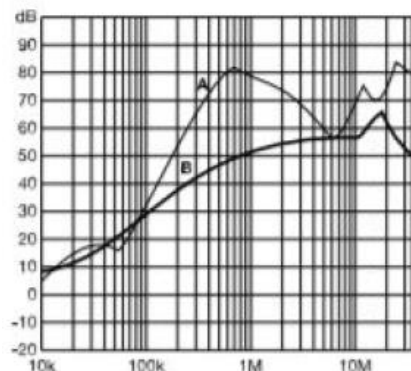


Päikesepaneeli alalisvoolu filter, $Z = 50 \Omega / 50 \Omega$

Per CISPR 17; **A = 50Ω/50Ω sym**; **B = 50Ω/50Ω asym**

12 to 20 A types

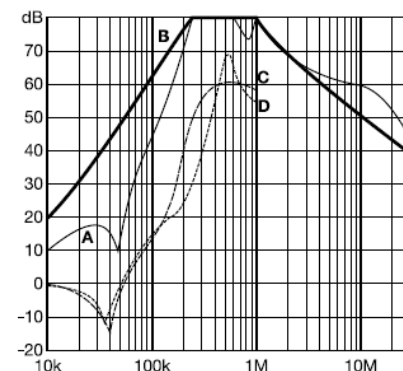
30 A types



Sümmeetrilised filtrid tagavad parema häirete mahasurumise

Päikesepaneeli DC
EMC/EMI filter

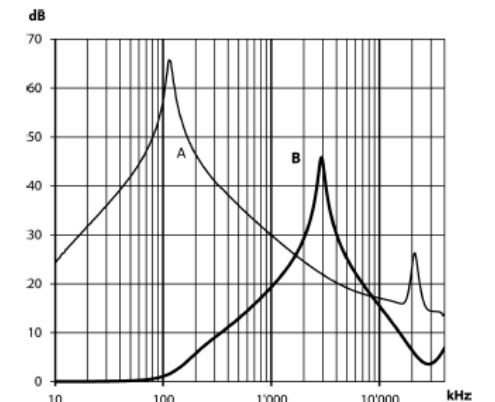
25 to 75 A types



Sümmeetrilised filtrid tagavad parema häirete mahasurumise

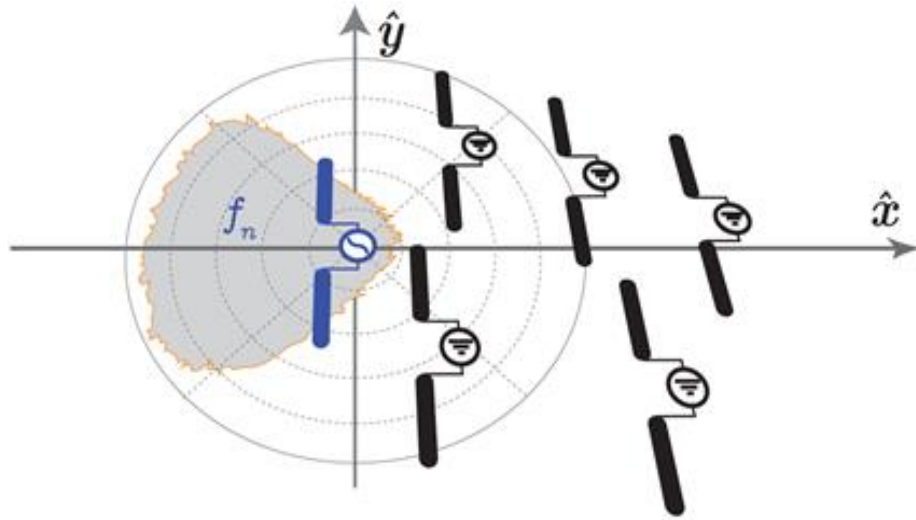
3 faasilise inverteri
väljundis EMC/EMI filter

250/400 A types



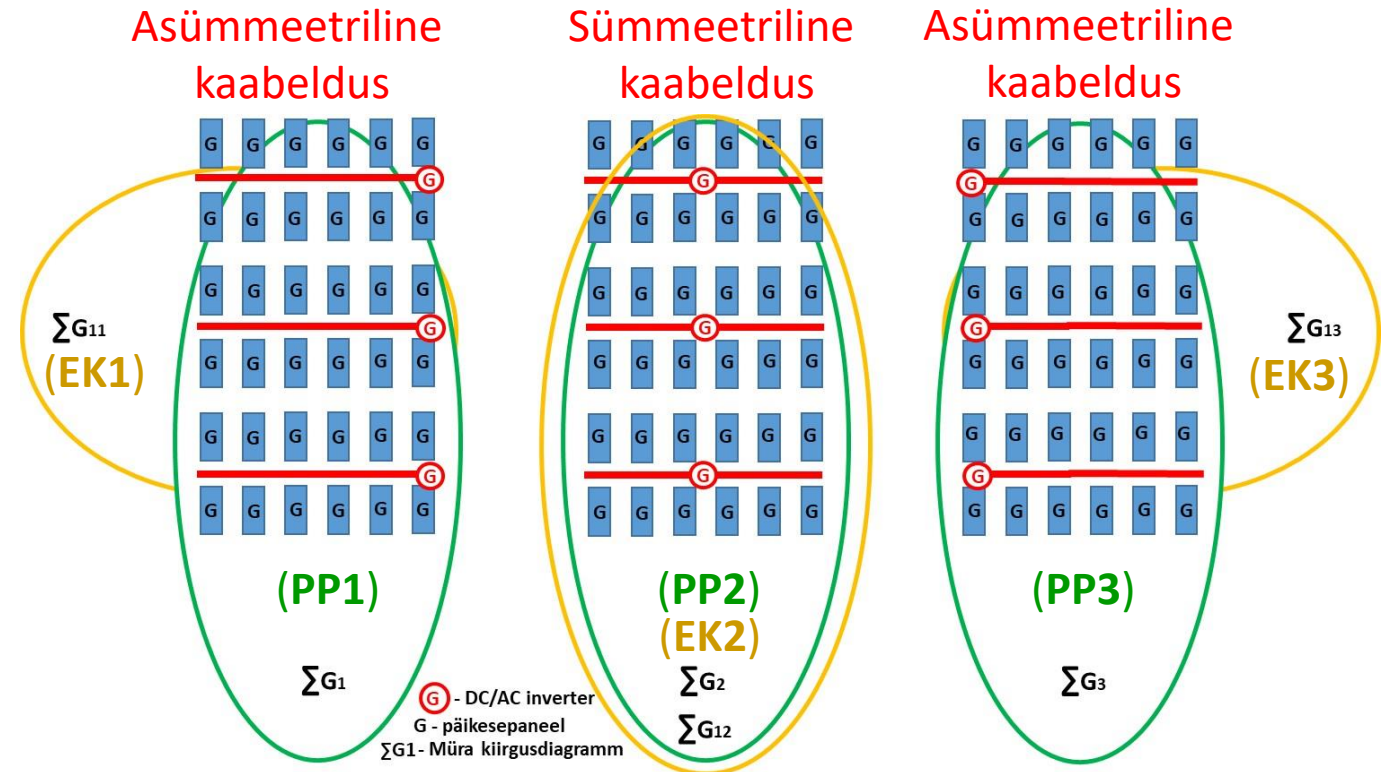
Päikesepargi hajutatud kiirgusallikate kiirgusdiagrammid

Päikesepargi töötamisel RF kiirguse summaarne häiresignaali kiirgusdiagramm ning emissioonide ulatus Sommerfeldi mudeli mõjualas



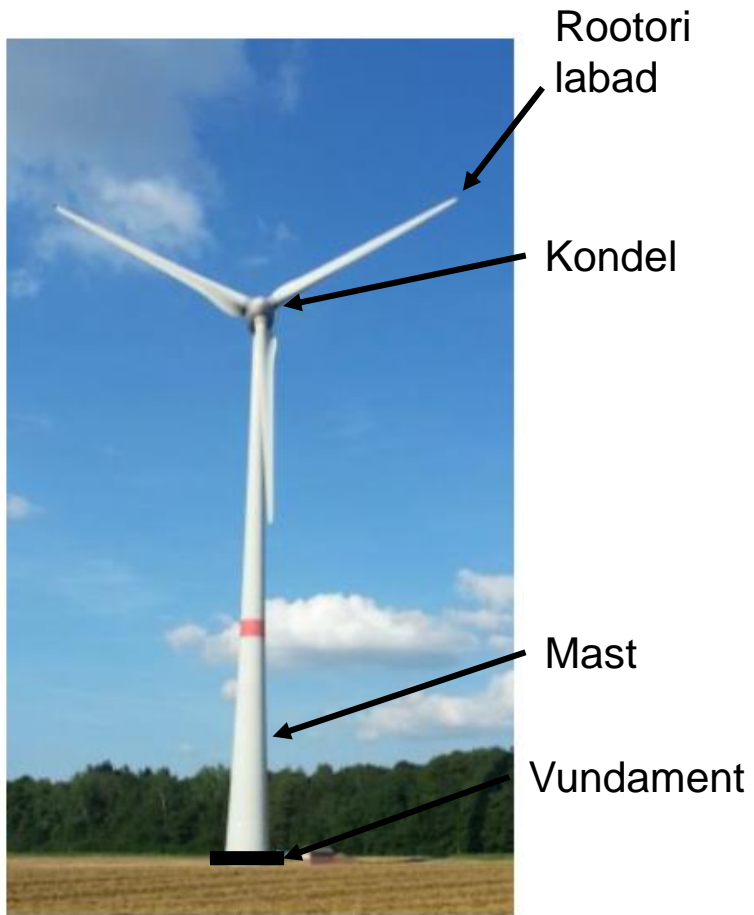
Päikesepargi hajutatud päikese moodulite elektromagnetilise häire kiirgusdiagramm

Päikesepargi RF kiirgusdiagramm koosneb päikese paneelide (PP) ja elektrikaabelduse (EK) laiaribaliste emissioonide koosmõjust



Päikesepargi paneelide kiirgusdiagramm $\Sigma G1$; $\Sigma G2$; $\Sigma G3$ ja DC/AC inverterite kaabelduse antenniefektist põhjustatud kiirgusdiagramm $\Sigma G11$; $\Sigma G12$; $\Sigma G13$

ELEKTRITUULIKU KONSTRUKTSIOON NING MUDELI KOOSTISOSAD



Elektrituuliku konstruktsiooni-
elemendid



Labad ühe rõnga ja sädepiirikuga



Labad kahe rõngaga



Maandusvöö defektne

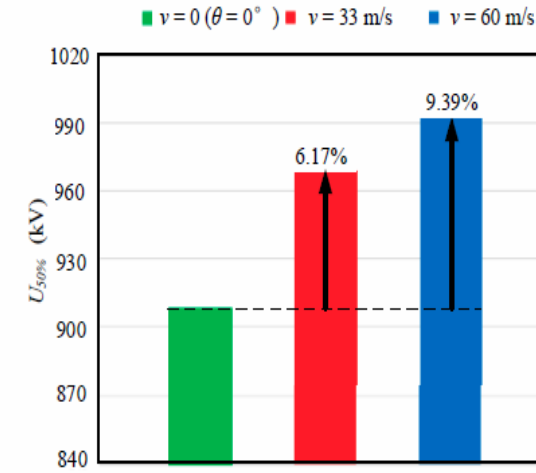
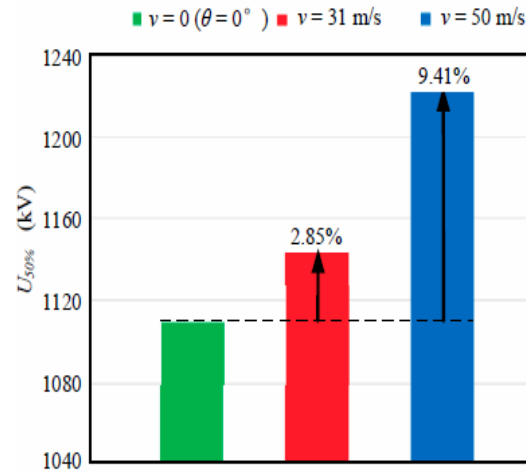
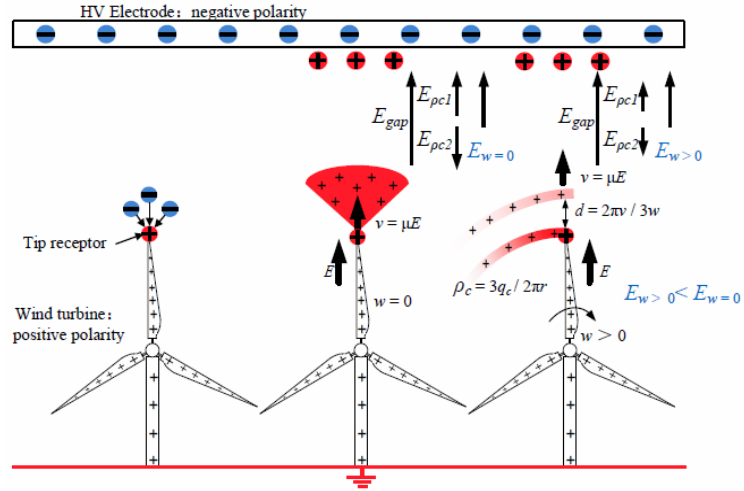


Maandusvöö ja sädepiiriku vahe > 30 cm
staatilisest laengu läbilöög > 900 kV



Rootori labad rõnga ja sädepiirikuga

TUULEPARGI STAATILINE ELEKTER NING HÄIRED SIDEVAHENDITELE

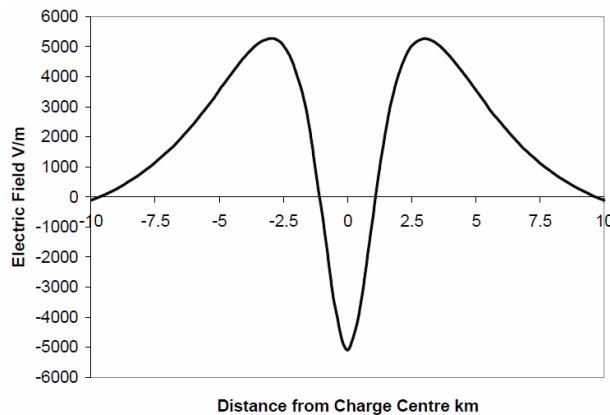


(a)

(b)

Labade liikumisega indutseeritakse positiivseid laenguid ning sõltuvalt tuuliku labade kõrgusest ja pöörlemise kiirusest eralduvad positiivsete ionidega laetud pilv.

Elektrituuliku laba valmistatakse komposiitmaterjalidest (mitte voolujuhtiv, dielektrikmaterjal), milles indutseeritakse maapinna suhtes positiivse polaarsusega kõrgepinge kuni 1240 kV, mille suurus sõltub laba tipu joonkiirusest ($v = 0 \dots 60$ m/s).

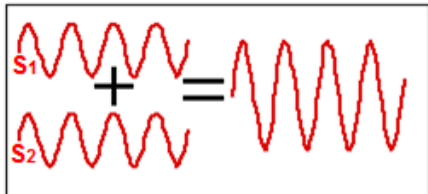
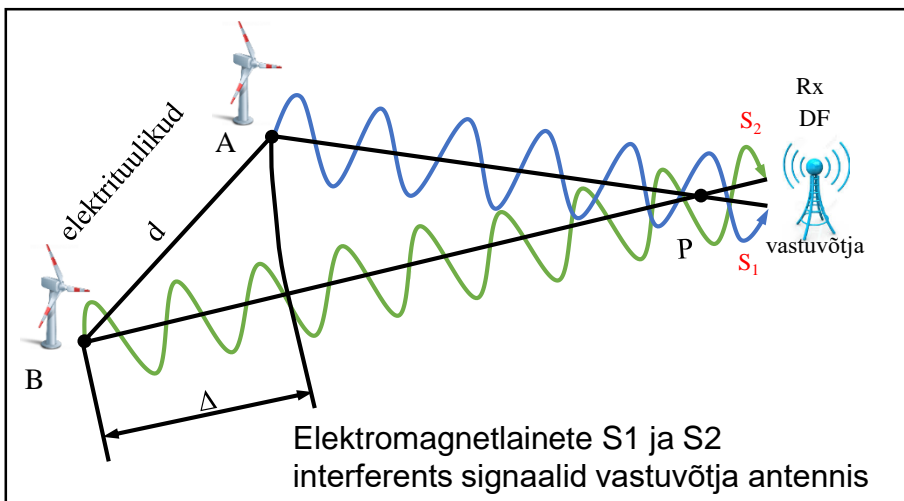


Elektrituuliku labade elektrivälja (0... +/- 6 kV/m kohta) jaotus sõltuvalt tuuliku tsentrist (0 ... 10 km).

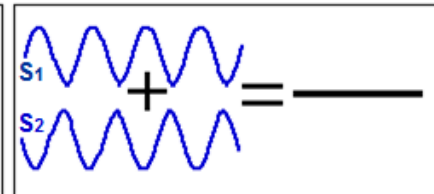


Elektrituuliku labade ioniseeritud laengutega pilve tekkimine tuuliku labadelt nähtavas gaasikeskkonnas

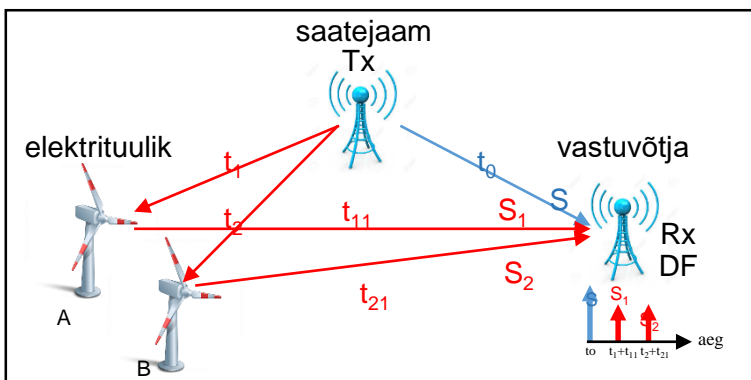
TUULEPARGI ELEMENTIDELT PEEGELDUNUD SIGNAALIDE MÕJUD



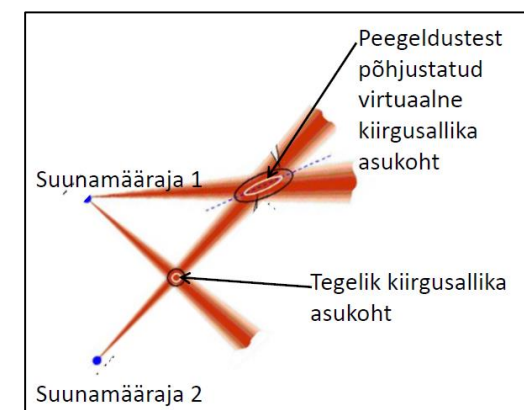
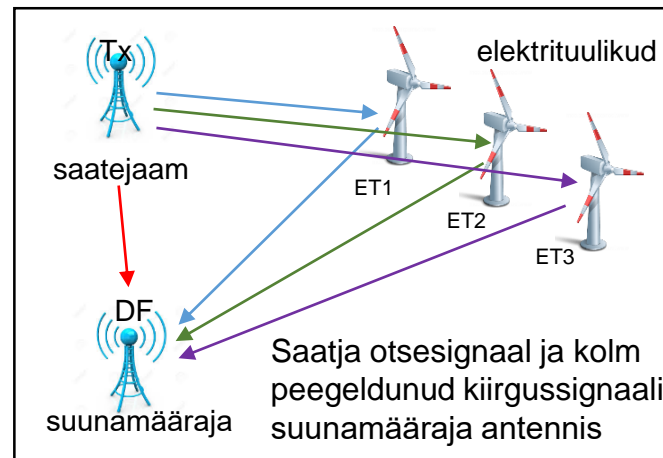
Signaalide S_1 ja S_2 suurima (MAX) amplituudiga interferentssignaalid.



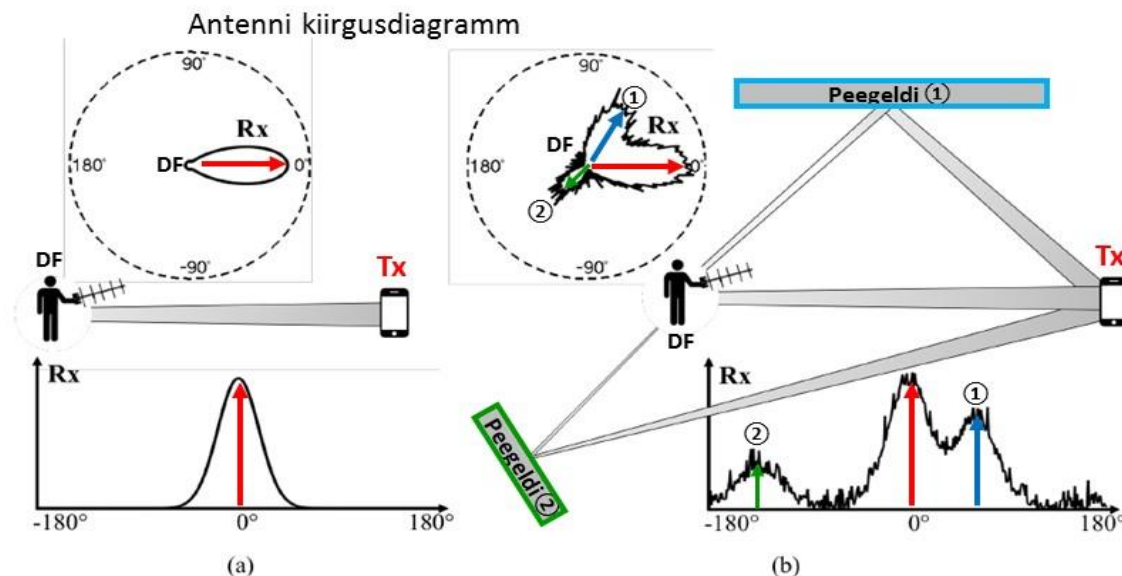
Signaalide S_1 ja S_2 väikseima (MIN) amplituudiga interferentssignaalid.



Otsesignaali S ja peegeldunud hilistunud signaalid S_1 ja S_2

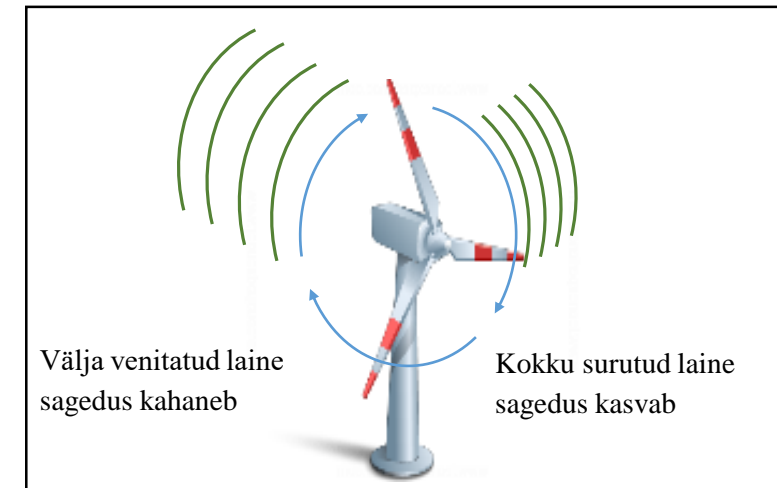
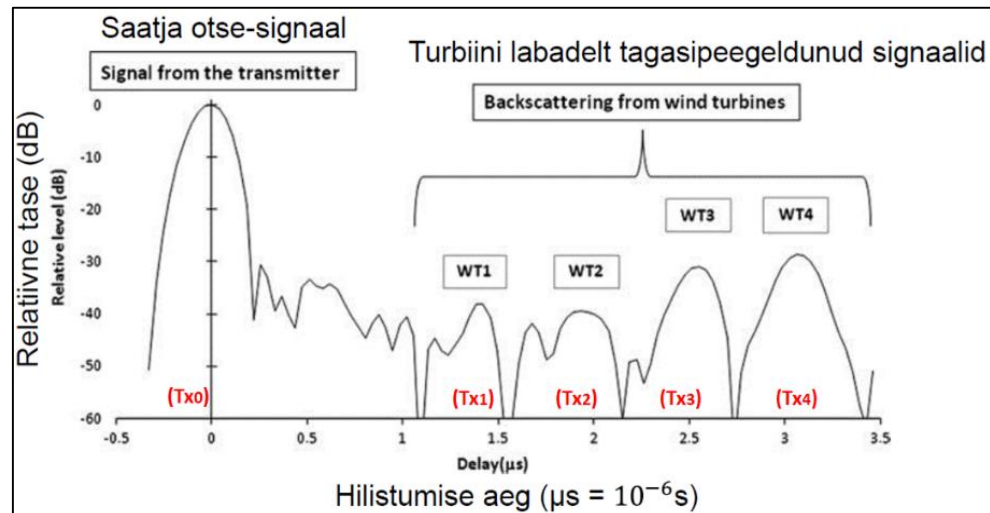
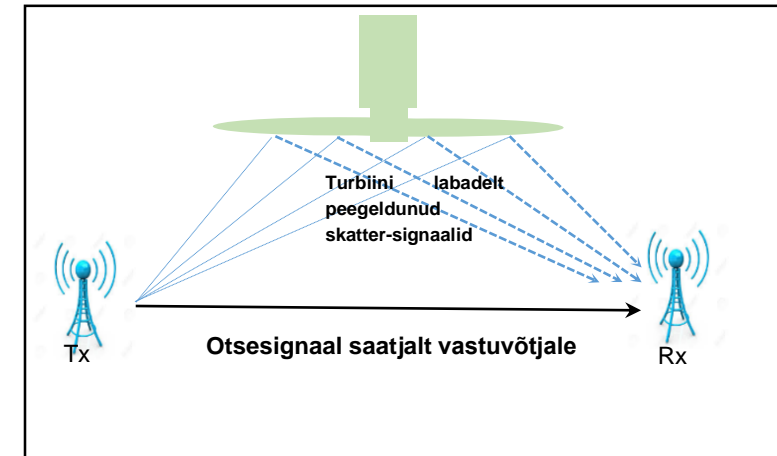
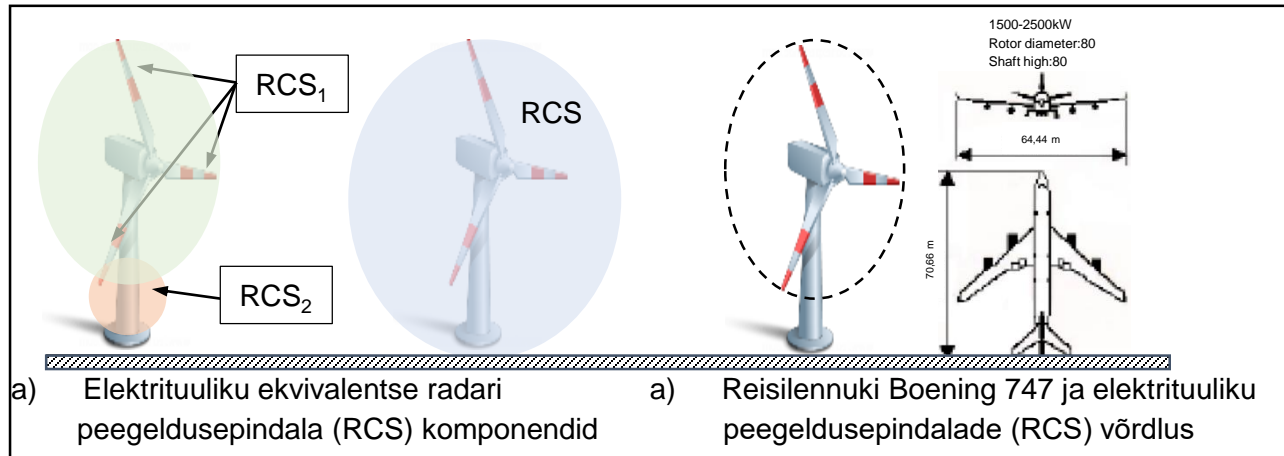


Suunamääraja virtuaalse kiirgusallika tekke mehhanism



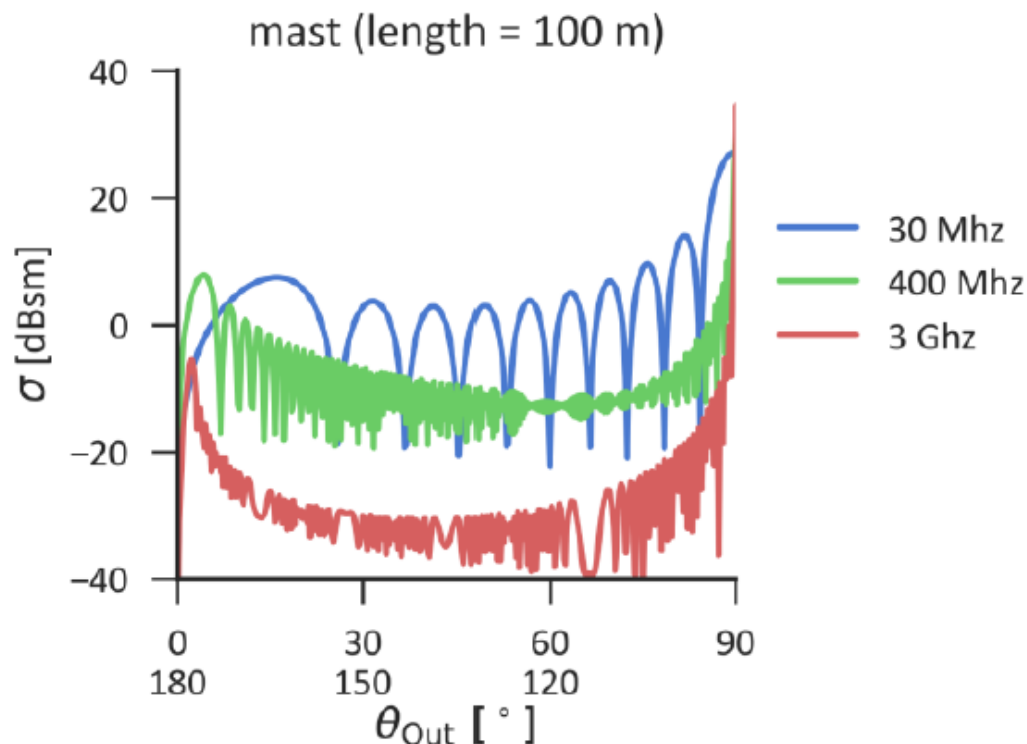
a) Suunamääraja (DF) tööne peiling saatja (Tx) suunale b) Suunamääraja (DF) tööne peiling saatjale (Tx) ja peegeldunud signaalide valed peilingu suunad 1 ja 2

LABADE PÖÖRLEMISEST PÕHJUSTATUD DOPPLERI SAGEDUSNIHE

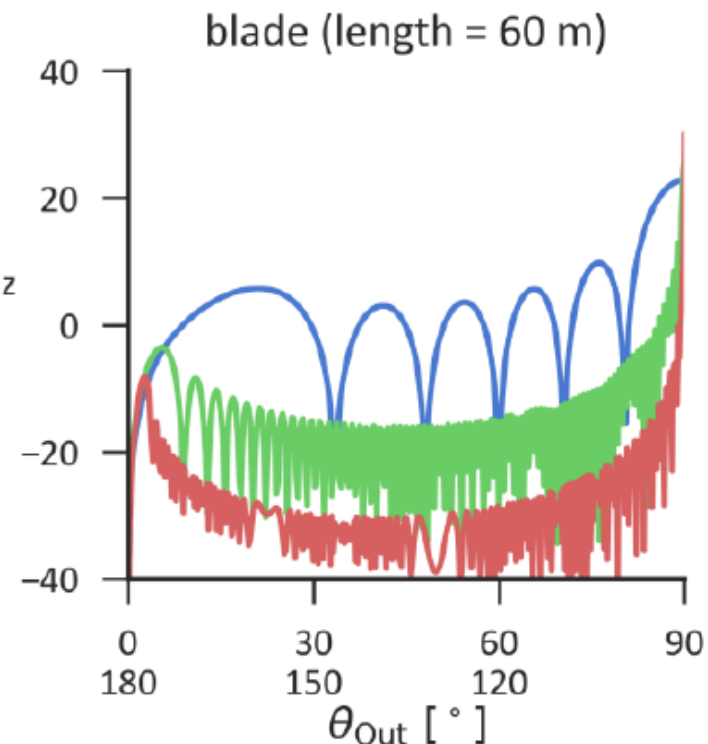


TUULIKU RAADIOSAGEDUSLIKE PEEGELDUSTE KOMPONENDID

Radari ekvivalentse peegelduspindala (RCS) suurused
(Elektrituuliku mast pikkusega 100 m)



Radari ekvivalentse peegelduspindala (RCS) suurused
(Elektrituuliku rootor laba pikkusega 60 m)



Kiirusenergia radari ekvivalentse peegelduspindala (RCS) suurused dBsm elektromagnetlaine vertikaalpolarisatsiooniga (V-POL) kui elektrituuliku mast pikkusega 100 m ja laba pikkusega 60 m.

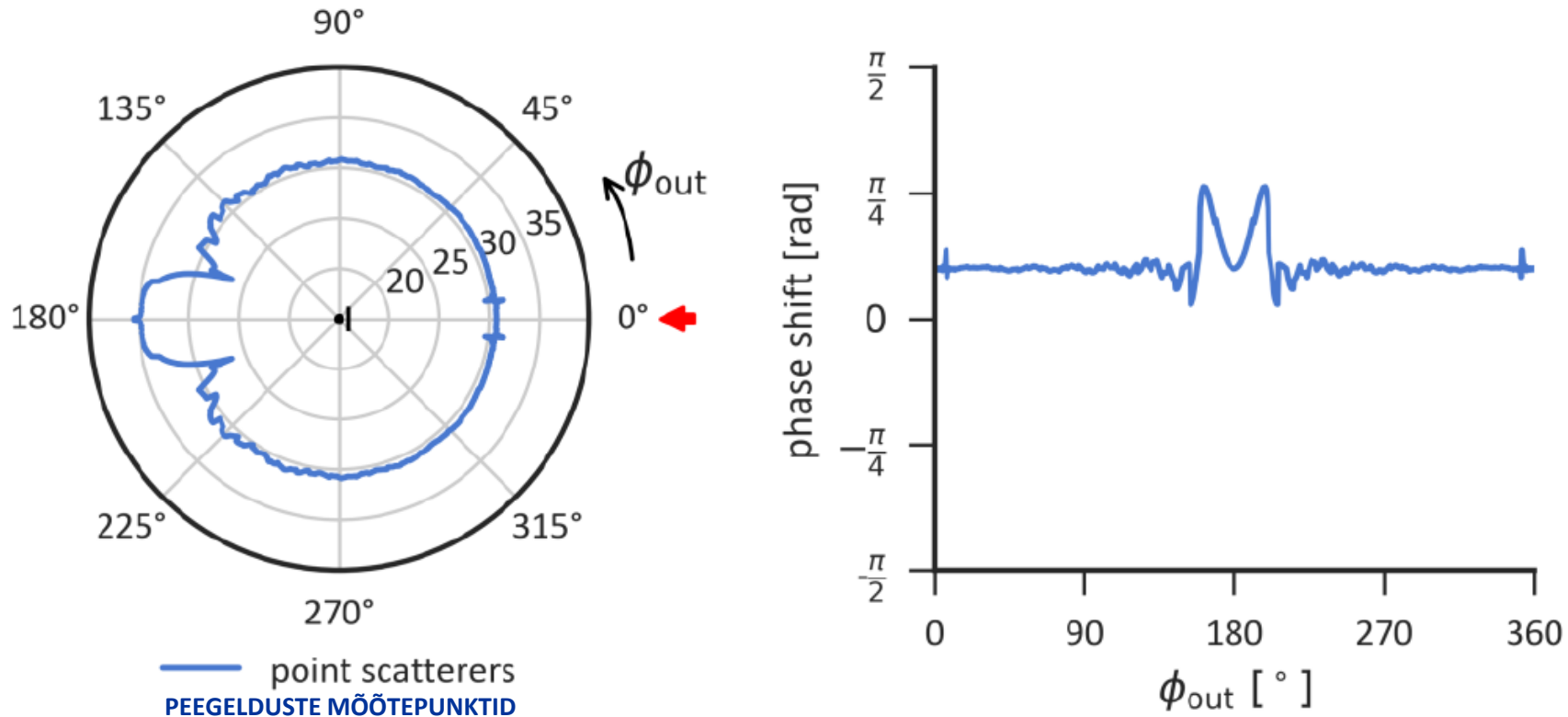
Sagedustel: 30 MHz, 400 MHz, 3 GHz. Suurim peegeldusnäitaja tekib horisontaaltasapinnal kõrgematel sagedustel.

RCS näitaja on sümmeetriline $\theta > 90$.

The radar cross section (RCS) σ in dBsm for a vertically polarized incoming plane wave ($\theta_{in} = 90^\circ$) on a wire with 100 m (mast) and 60 m (blade) length at three frequencies (30 MHz, 400 MHz, 3 GHz). The main scattering is happening in the horizontal plane with a larger directivity at higher frequency. The RCS is symmetric for $\theta > 90$.

ELEKTRITUULIKU PEEGELDUSPINDALA MÕJUD

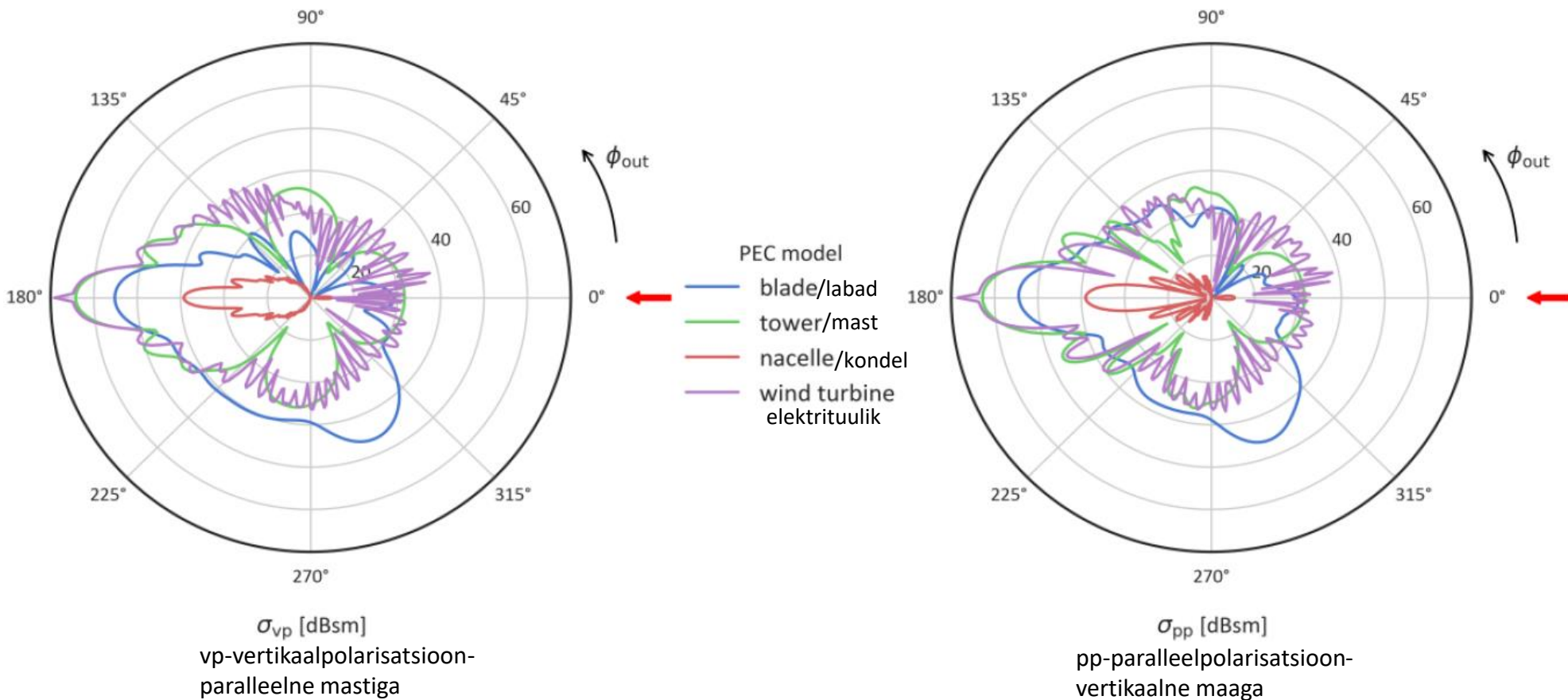
Elektrituuliku ekvivalentse peegelduspindala (RCS) simulatsiooni tulemused



Elektrituuliku ekvivalentse peegelduspindala (RCS) rootori kaldenurk (6°) horisontaalse langeva elektromagnetlaine (vertikaal-polarisatsiooniga) $\Theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ sagedusel 400 MHz.

Radar cross section σ [dBsm] for the point scatterer (4 points) and a tilted rotor (6°) for a horizontal incoming plane wave (vertical polarized) ($\theta_{in} = 90^\circ$, $\phi_{in} = 0^\circ$) at 400 MHz. The pattern due to constructive interference observed in Fig. 4.4 is no longer observed.

ELEKTRITUULIKU PEEGELDUSPINDALA MÕJUD

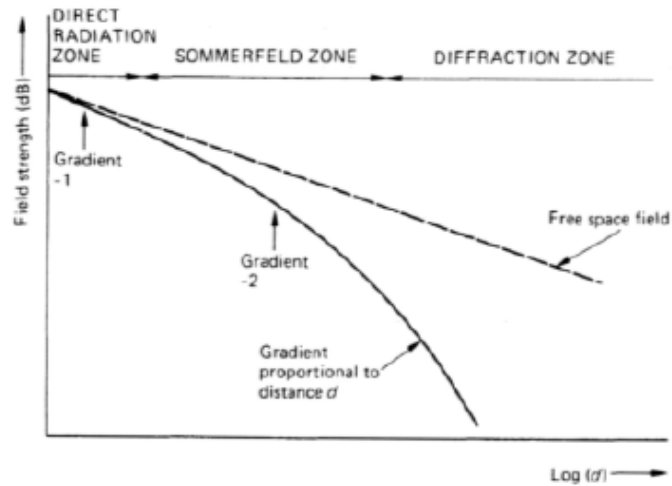


Võrdlus elektrituuliku erinevate konstruktsiooni elementide ekvivalentsete peegelduspindalade (RCS) sagedusel $f = 400$ MHz. Vertikaalse polarisatsiooniga (paralleelselt mastiga) rootori kaldenurk (6°) horisontaalse langeva elektromagnetlainel (vertikaal-polarisatsiooniga) $\Theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ sagedusel 400 MHz.

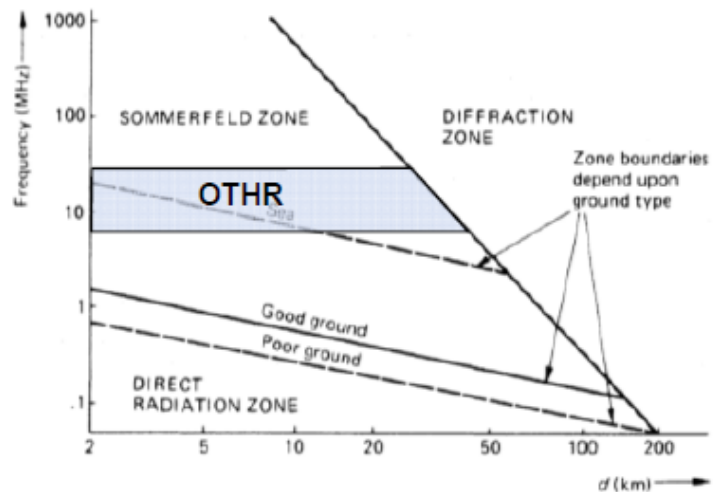
Comparison of the RCS for different elements of the wind turbine at $f = 400$ MHz. Vertical polarization (parallel to the mast) σ_{vp} and parallel polarization (vertical to the ground) σ_{pp} show similar scattering strengths. In both cases, the mast shows the most significant impact.

SOMMERFELD'I ALAS EM-LAINE LEVI JA PEEGELDUSTEGUR

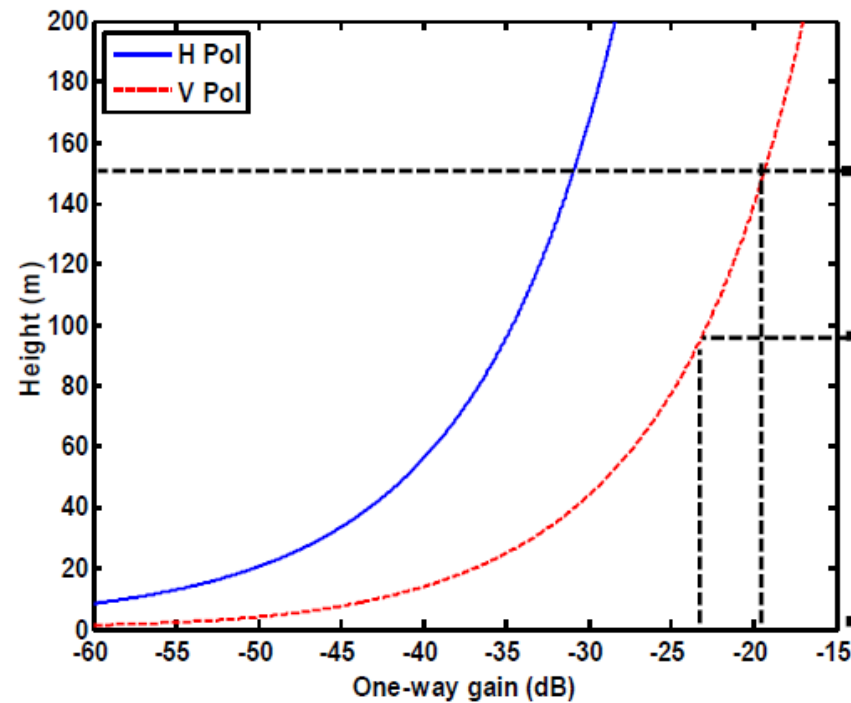
Propagation Zones



Boundary Locations



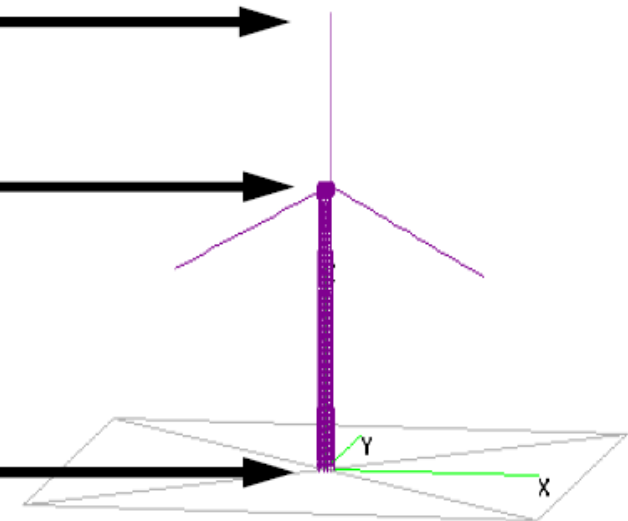
Propagation Factor



Peegeldustegur:

— - horisontaal-polarisatsioon

- - - - - vertikaal-polarisatsioon

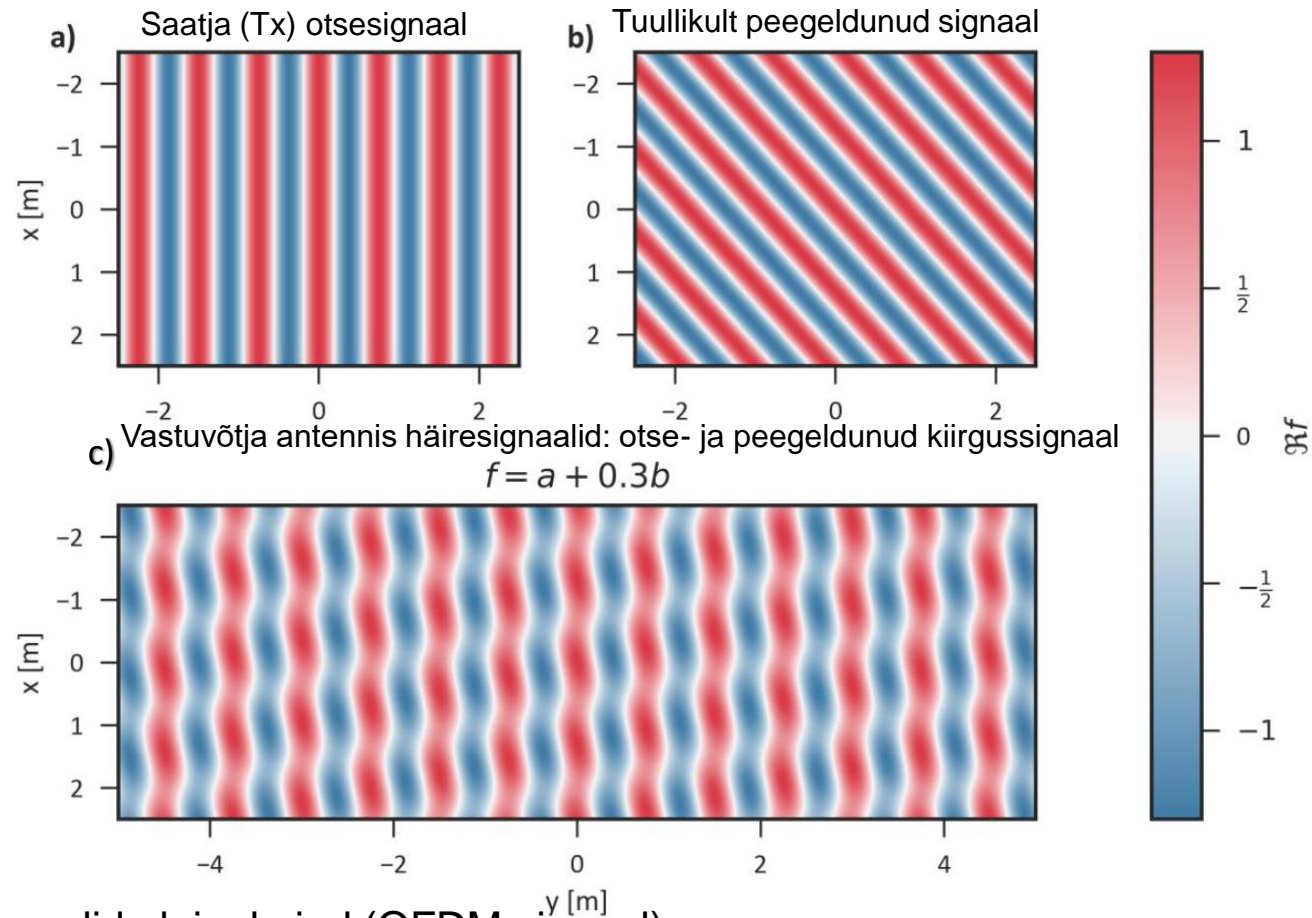


Elektrituuliku laba tipu peegeldustegur -19 dB

Elektrituuliku laba alumine/madalam peegeldustegur -27 dB

(Propagation Factor ranges from -19 dB at the top of the blade to less than -27 dB at bottom of blade)

ELEKTRITUULIKU KIIRGUSKESKONNAS PEEGELDUSTE MÕJUD

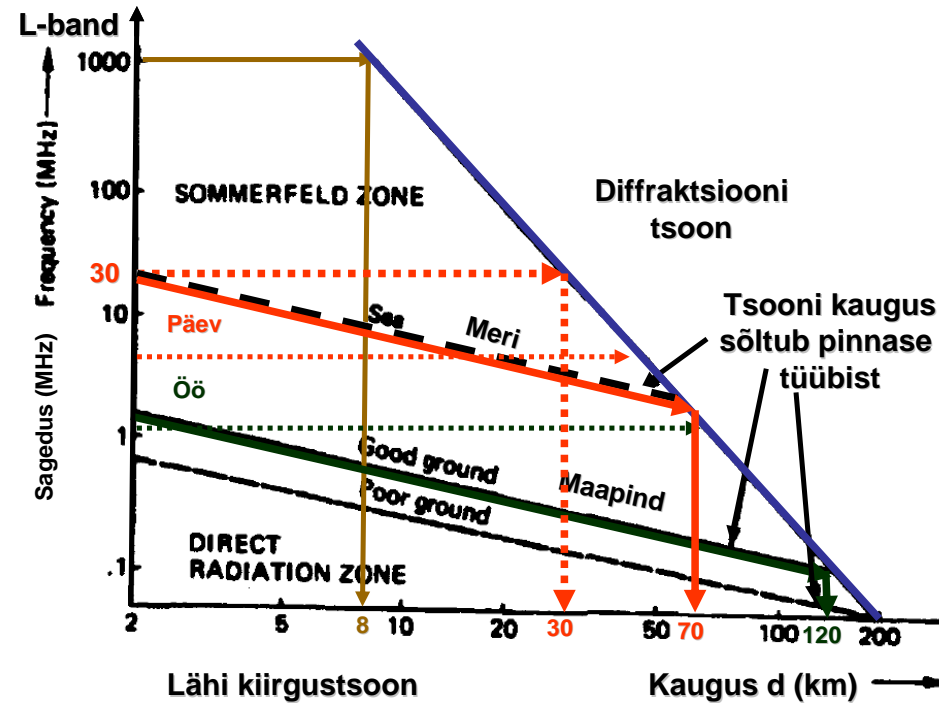


Kiirgussignaali laine kujud (OFDM signaal):

- a) Saatja signaal sagedusel $f=400$ MHz amplituudiga 100%;
- b) Elektrituulikult peegeldunud saatja signaal amplituudiga 30%;
- c) Vastuvõtja/suunamääraja antennis kiirgussignaali laine kujud sagedusel $f=a+0,3b$

The real part of the function $f(x, y)$ with the wavenumber $k = 2\pi f/c$ at a frequency $f = 400$ MHz. The amplitude of the scattered field (b) is 30% of the direct field (a). The sum shows the additional modulation along the angle bisector of the two propagation directions. The direction of the direct field (a) is not completely clear anymore, especially if only a small area is considered.

PEJ ja TEJ häirete levikaugus Sommerfeld'i mudeli alusel



Elektromagnetilise laine levi lähikiirgusalas (Sommerfeldi tsoonis) difraktsiooni tsoonis on määratud valemiga $E = KFP^{1/2}/d$

kus:

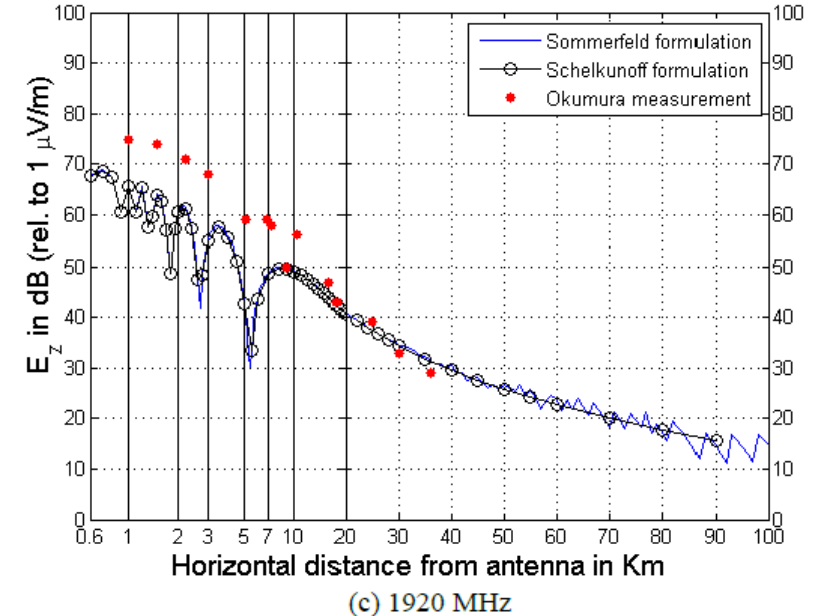
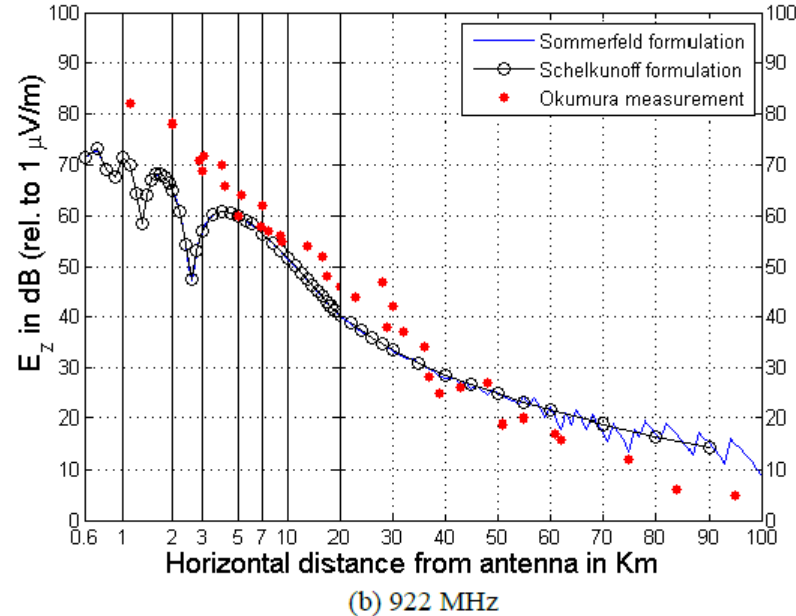
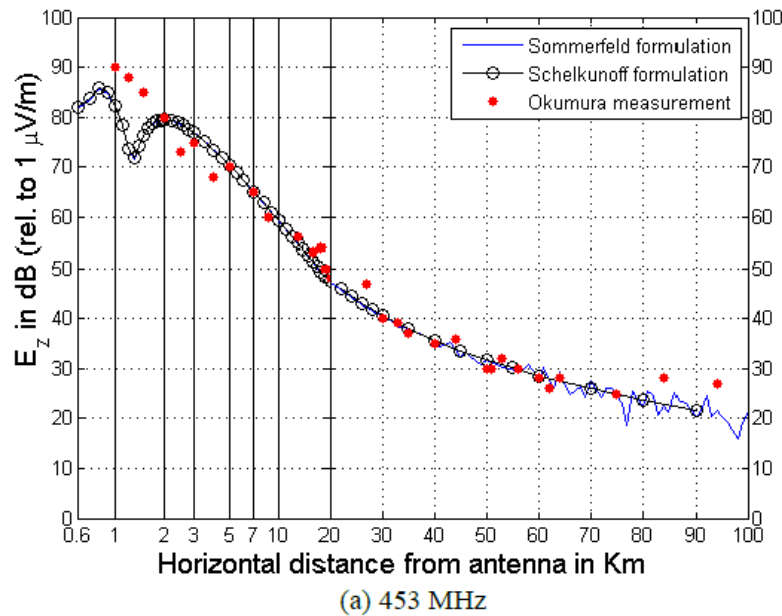
P - summaarne kiirgusvõimsus (W);

K - elektromagnetilist kiirgusantenni iseloomustav konstant;

F - faktor, mis sisaldab sagedussõltuvuses kiirguse polarisatsiooni ja maapinna karkteristikuid;

d - kaugus/distants (m).

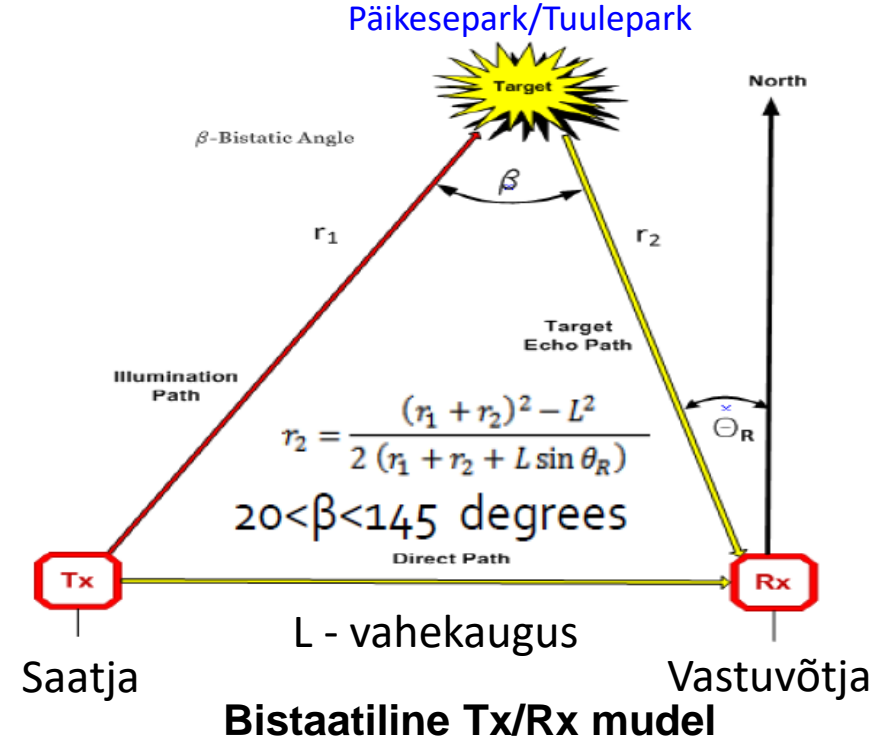
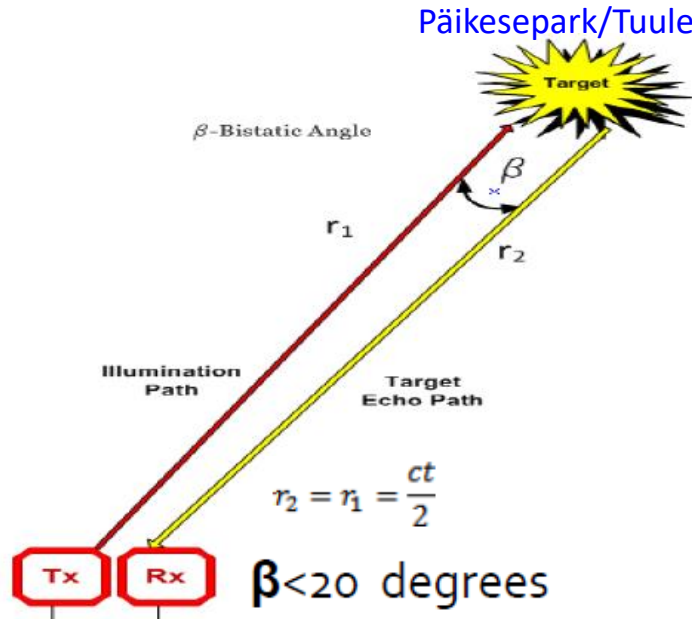
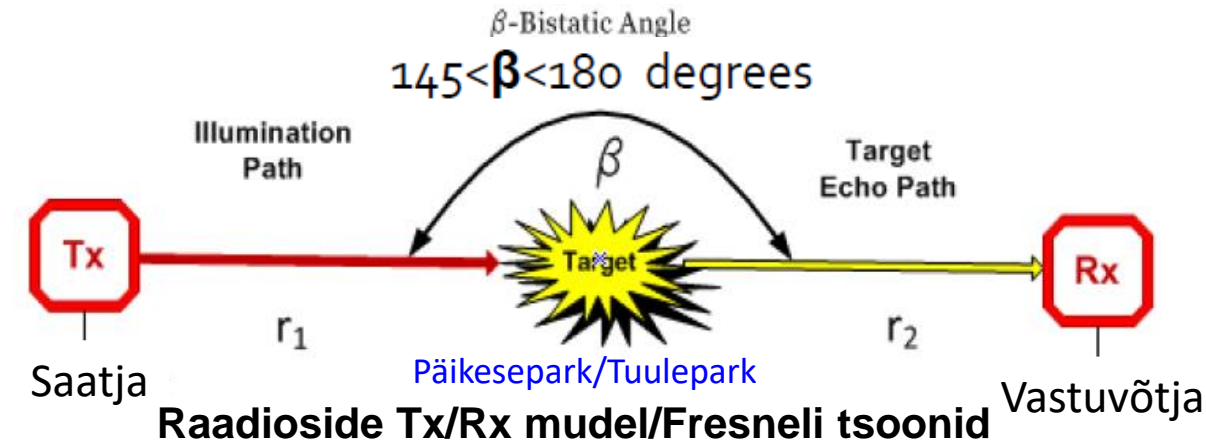
Sommerfeld'i ja Shelkunoff'i levimudelite võrdlus



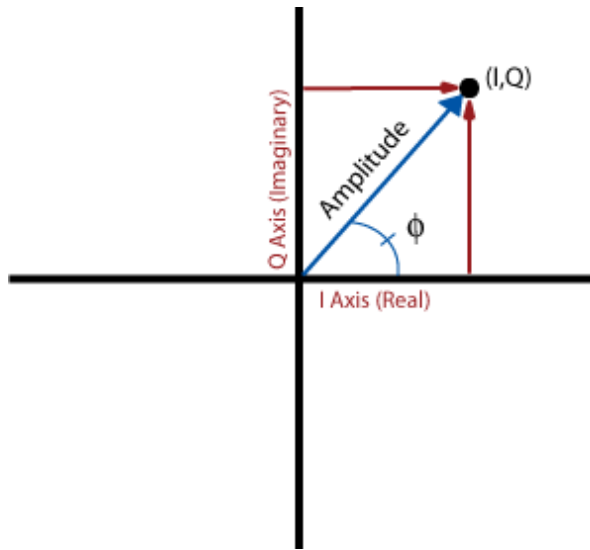
Võrdlusandmed Okumura eksperimentaalsete tulemuste ja Schelkunoff'i ja Sommerfeld'i teoreetiliste ennustuste ja simulatsioonide tulemustena loodud makromudelid ning elektromagnetlainelevi kaod sagedustel (a) 435MHz, (b) 922 MHz, (c) 1920 MHz.

Comparison between the experimental (Okumura et al.) and theoretical predictions (Schelkunoff and Somerfeld formulations) computed through a macro model for predicting propagation path loss in an urban environment at: (a) 453 MHz, (b) 922 MHz, (c) 1920 MHz

PEJ ja TEJ mõju saatja-vastuvõtja lainelevi erinevates mudelites



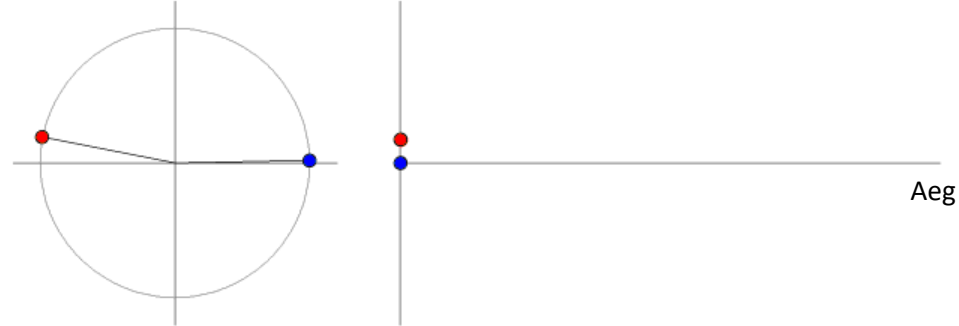
I-Q tüüpi raadiosignaali amplituudi, sageduse ja faasi muutused



Kiirgussignaali I-Q kirjeldus:

- A - signaali amplituud
- Q - signaali imaginaarosa
- I - signaali reaalosa
- ϕ - signaali faas

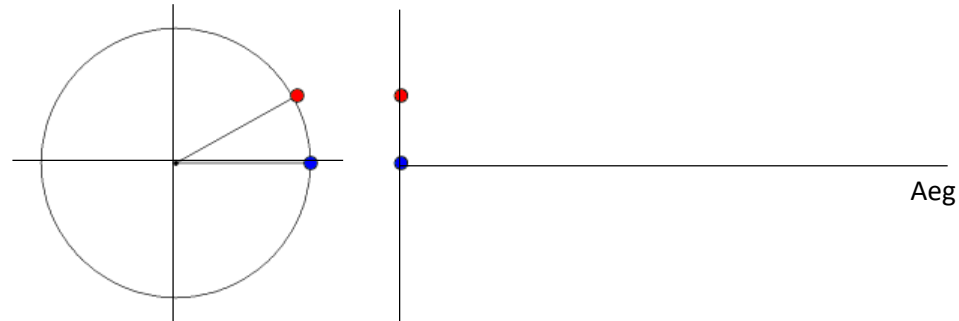
I-Q signaal kahe muutujaga



- Signaal (S1) amplituud (A1), faas (ϕ_1) ja sagedus (F1)
- Signaal (S2) amplituud (A2), faas (ϕ_2) ja sagedus (F2)

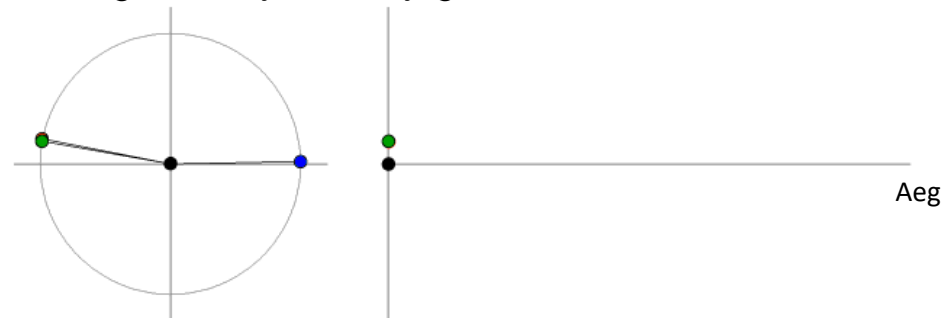
Image courtesy of whiteboard.ping.se

I-Q signaal kolme muutujaga



- Signaal (S1) amplituud (A1), faas (ϕ_1) ja sagedus (F1)
- Signaal (S2) amplituud (A2), faas (ϕ_2) ja sagedus (F2)
- Signaal (S3) amplituud (A3), faas (ϕ_3) ja sagedus (F3)

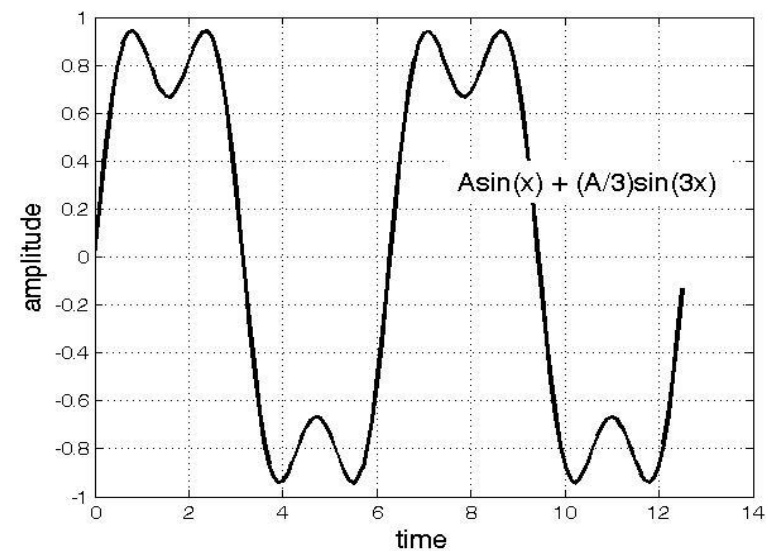
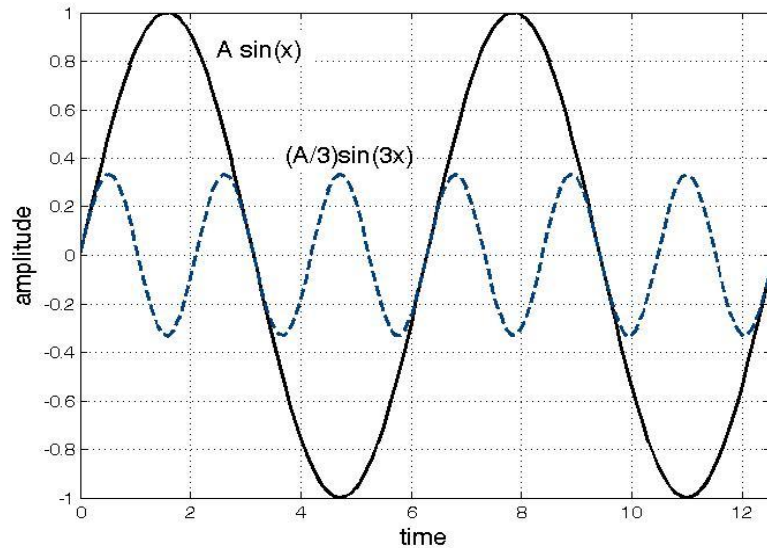
I-Q signaal nelja muutujaga



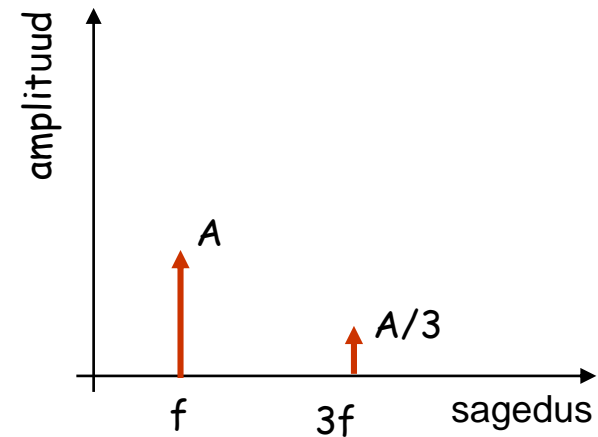
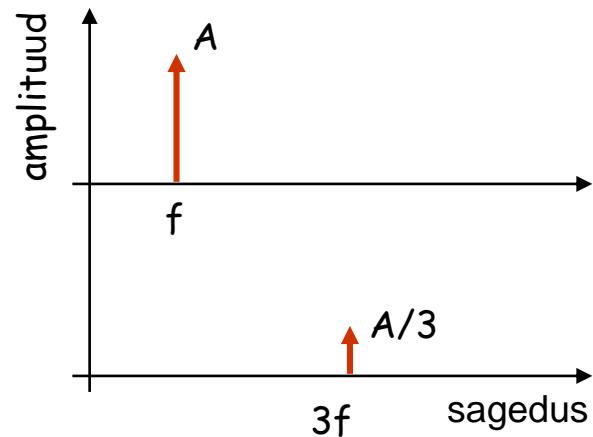
- Signaal (S1) amplituud (A1), faas (ϕ_1) ja sagedus (F1)
- Signaal (S2) amplituud (A2), faas (ϕ_2) ja sagedus (F2)
- Signaal (S3) amplituud (A3), faas (ϕ_3) ja sagedus (F3)
- Signaal (S4) amplituud (A4), faas (ϕ_4) ja sagedus (F4)

Image courtesy of whiteboard.ping.se

Saatja signaali+häire signaali lainekujude liitumine



Lainekujud erinevate amplituudi ja sagedusega signaalidega $A(f)$ ja $A/3(3f)$

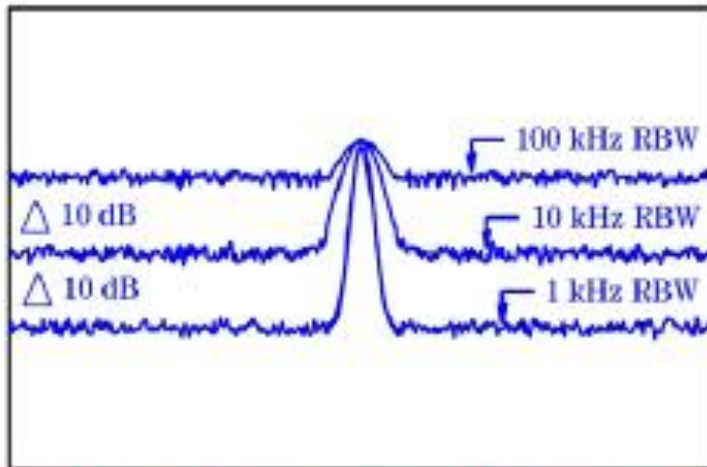


Kiirgussignaali spektraalne esitus kiire FFT signaalidega (Fast Fourier Transform)

Vastuvõtja ribalaius ja signaal/müra suhe

Vastuvõtja müra tase ja ribafilti ribalaius

Displayed Noise is a Function of Receiver Filter Bandwidth

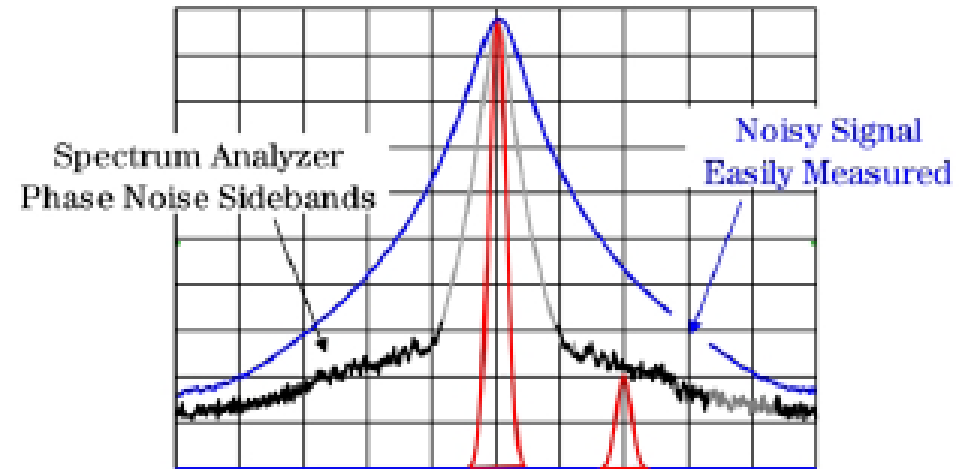


Decreased BW = Decreased Noise = Increased Sensitivity

Ribalaiuse suurenemine = Müra suurenemine =
Tundlikuse vähenemine = Sidekauguse vähenemine

Spektrianalüsaatoriga faasimüra
mõõtmise piiratud ribalaiusega

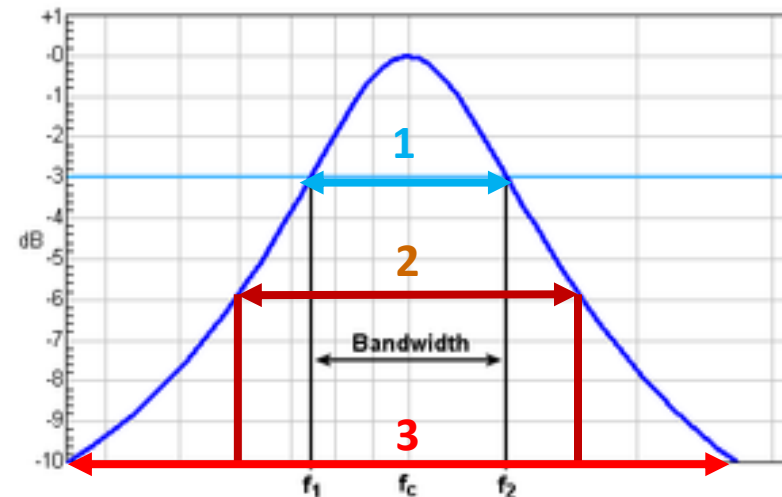
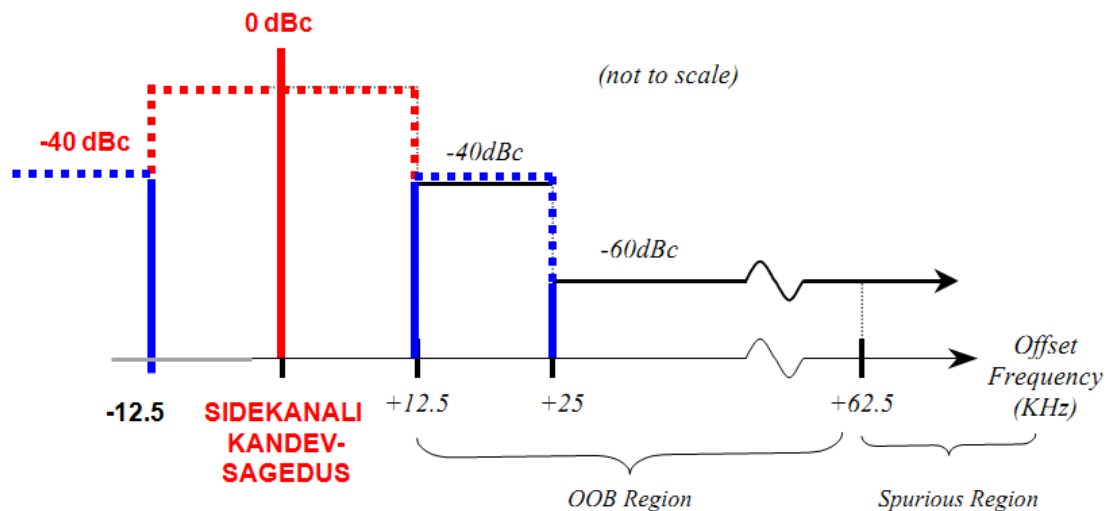
Spectrum Analyzer Phase Noise
Limits Narrowband Measurements



Undetectable Narrowband Response

Saatja kiirgussignaale vastav vastuvõtja ribalaius
annab optimaalse signaal/müra (S/N) suhte

VHF-lainealas saatja kiirgusnäitajad ja vastuvõtja selektiivsus



VHF- ja UHF-lainealas FM-saatja/vastuvõtja
EMC- ja EMI-kiirgusparameetrid

Vastuvõtja ribalaius: 1 (-3 dB); 2 (-6dB); 3 (-10 dB)
 $f_c = f_0$ – kesksagedus ehk resonantssagedus)

Raadioside töövõime nõuded

Raadioside funktsioonide täitmiseks ning töövõime tagamiseks nõutavad erinevate raadiosignaali signaal-müra (S/N) suhte alljärgnevad suurused:

1. Raadiooperaatori poolt vastuvõetavad signaalitugevused (signaal/müra S/N=3-8 dB).
2. Automatiseeritud avastus-süsteemide signaalitugevused (signaal/müra S/N=10-14 dB).
3. Automatiseeritud suunamääramine ja sagedusmõõtmine (signaal/müra S/N=14-18 dB).
4. Automatiseeritud interferomeetiline suunamääramine (signaal/müra S/N=14-18 dB).
5. Digikanali signaali ülekanne ja automatiseeritud amplituud-suunamääramine (signaal/müra S/N=16-24 dB).

Typical Minimum S/N Required				
Skilled Operator	Auto-Detection	Auto-detection with Amplitude, TOA, and Frequency Measurements	AOA Phase Interferometer	AOA Amplitude Comparison
3 to 8 dB	10 to 14 dB	14 to 18 dB	14 to 18 dB	16 to 24 dB

Raadioside töövõime tagatakse kui on täidetud standardi nõuded:

- sidekanali ribalaius
- ülekandekiirus
- signaali tugevus
- signaal/müra (S/N) suhe vastab tabeli andmetele:

Standard	Ribalaius [Hz]	Ülekandekiirus (1 TX, 1RX antenn) [bit/s]	Ülekandekiirus ribalaiuse Hz kohta [bit/s*Hz]	S/N [dB]
HF	2 400	9 600	4,00	11,8
HF	2 400	600	0,25	-7,2
UHF	16 000	64 000	4,00	11,8
IEEE 802.11 a/g	20 000 000	54 000 000	2,70	7,4
IEEE 802.11 b	20 000 000	11 000 000	0,55	-3,3
IEEE 802.11 n	20 000 000	72 200 000	3,61	10,5
IEEE 802.11 n	40 000 000	150 000 000	3,75	11,0
IEEE 802.11 ac	80 000 000	433 000 000	5,41	16,2
IEEE 802.11 ac	160 000 000	867 000 000	5,42	16,2

Tööstuslike raadiosidevahendite töövõime tagatakse kui raadiosignaali (S) amplituud ületab mürataset (N) vähemalt 12 dB:

$$SINAD(dB) = 10 * \log_{10} \left(\frac{Signal+Noise+Distortion}{Noise+Distortion} \right)$$

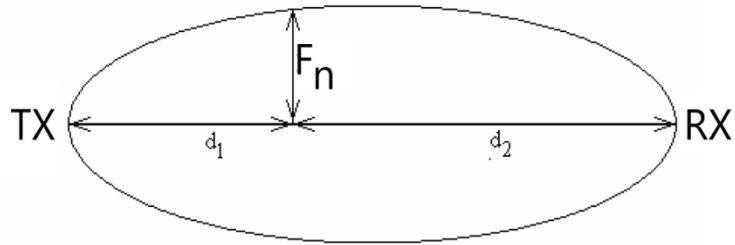
Kokkuvõte PEJ ja TEJ mõjudest raadioside kvaliteedile

1. Raadioside planeerimisel arvestada piirkonnas asuvate PEJ ja TEJ ruumilisel paigutusel tekkivate kiirgusmõjudega:
 - a) Sidevahendite sidekauguse vähenemine kõneside režiimis;
 - b) Sidevahendite sidekauguse vähenemine andmeside režiimis.
2. Raadiolinkide ja sidetrasside planeerimisel arvestada signaal/müra suhte vähenemisega, mille põhjustavad PEJ ja TEJ emiteeritud laiaribaline kiirgusmüra.
3. Mobiilside tugijaamade (2G, 3G, 4G, 5G) levikauguse vähenemine.
4. WiFi tugijaamade levikauguse vähenemine (põhjus S/N suhte vähenemine).
5. GPS-signaalide tugevuse vähenemine (sat-signaalide S/N suhe väheneb).
6. Erinevates ilmastiku tingimustes muutuvad PEJ ja TEJ töörežiimid, mille tulemuseks Sommerfeldi tsoonis emiteeritakse muutuvaid elektromagnetilisi laiaribalisi häiresignaale ning kiirgusmüra.

Küsimused?

FRESNELI ELEKTROMAGNETLAINE LEVI MUDEL

RAADIOSIDE LEVI MUDEL



Fresneli tsoon

$$F_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

kus on n Fresneli tsooni number, Fresneli III tsooni puhul $n=3$

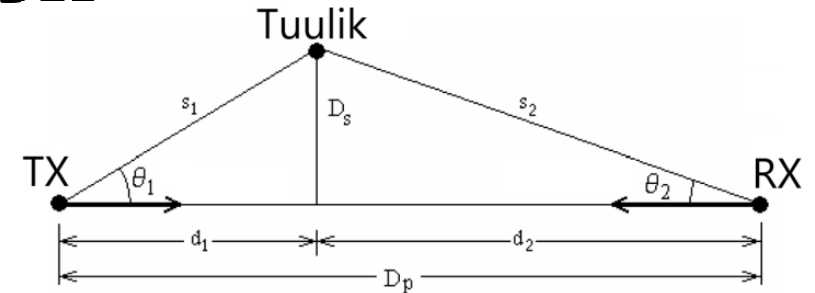
F_n – n -nda Fresneli tsooni raadius [m],

λ – kiirguse lainepikkus [m],

d_1 – kaugus saatjast takistava objektini [m],

d_2 – kaugus takistavast objektist vastuvõtjani [m].

Otsenähtavuse korral avaldub häiresuhe seosega:



$$r_{ci} = \frac{l_i}{l_d} = \frac{4\pi s_1^2 s_2^2 g_1(0) g_2(0)}{\sigma D_p^2 g_1(\theta_1) g_2(\theta_2)}$$

kus

l_i – levikaod saatja ja vastuvõtja vahel, kui levitrassile jääb tuulik,

l_d – levikaod saatja ja vastuvõtja vahel vabas ruumis,

s_1 – kaugus saatjast elektrituulikuni,

s_2 – kaugus tuulikust vastuvõtjani,

$g_1(0)$ – saateantenni võimendus vastuvõtja suunal,

$g_2(0)$ – vastuvõtuantenni võimendus saatja suunal,

σ – tuuliku hinnanguline suurim efektiivne peegelduspindala RCS (m²),

D_p^2 – radiolingi pikkus saatjast vastuvõtjani,

$g_1(\theta_1)$ – saateantenni võimendus tuuliku suunal,

$g_2(\theta_2)$ – vastuvõtuantenni võimendus tuuliku suunal.