10. Friisi valem

IEE2580 – Antennid ja raadiolevi

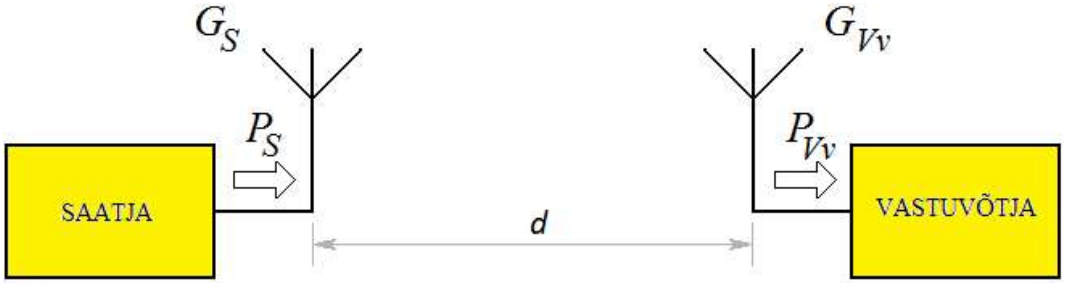
Friisi ülekande valem



- Harald T. Friis (1893 - 1976).
- Lihtsaim raadiokanali mudel.
- Mudel on aluseks kõikidele teistele, keerukamatele mudelitele.
- Praktikas kasutatava kahel erijuhul:
  - Kosmoseside;
  - Side **otsenähtavuse** (*Line of Sight* - LOS) tingimustes. Näiteks lennuvahendite-kõrgete mastide jms vahel.

Foto: https://www.semanticscholar.org/

Friisi valem - eeldused



- Kogu sidekanal asub vaakumis. Madalatel sagedustel võib keskkonnaks olla ka õhk.
- Puuduvad muud objektid mis võiksid põhjustada peegeldusi või heita varje.
- Esialgu eeldame, et puuduvad kõik muud kaod.

Friisi valem

- **Ekvivalentne isotroopne kiirgusvõimsus** (*Equivalent isotropically radiated power*) [W]:

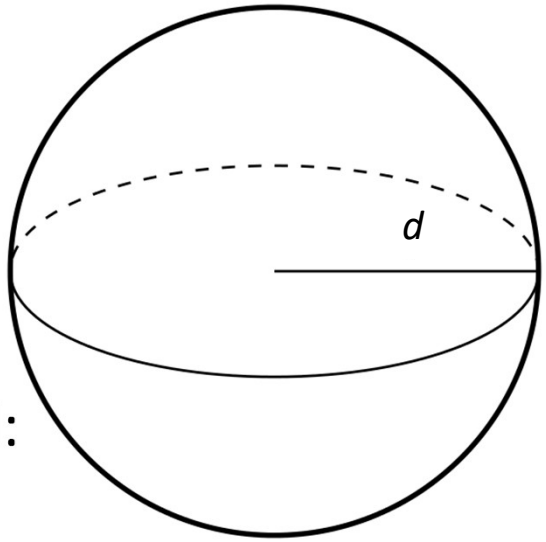
$$EIRP = P_s \cdot G_s \, .$$

- Võimsuse pindtihedus vastuvõtja asukohas:

$$\Pi = \frac{EIRP}{4\pi d^2} = \frac{P_s G_s}{4\pi d^2} \, .$$

- Seos antenni võimenduse *G* ja efektiivse pindala vahel:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \, .$$



Friisi valem

- Vastuvõetud signaali võimsus P_{Vv} on võimsuse pindtiheduse ja vastuvõtu-antenni efektiivse pindala korrutis vastuvõtja asukohas

$$P_{Vv} = P_s G_s G_{Vv} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 .$$

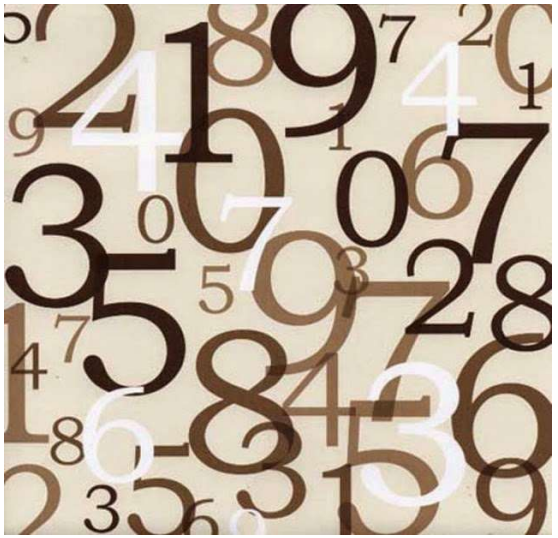
- Suurus

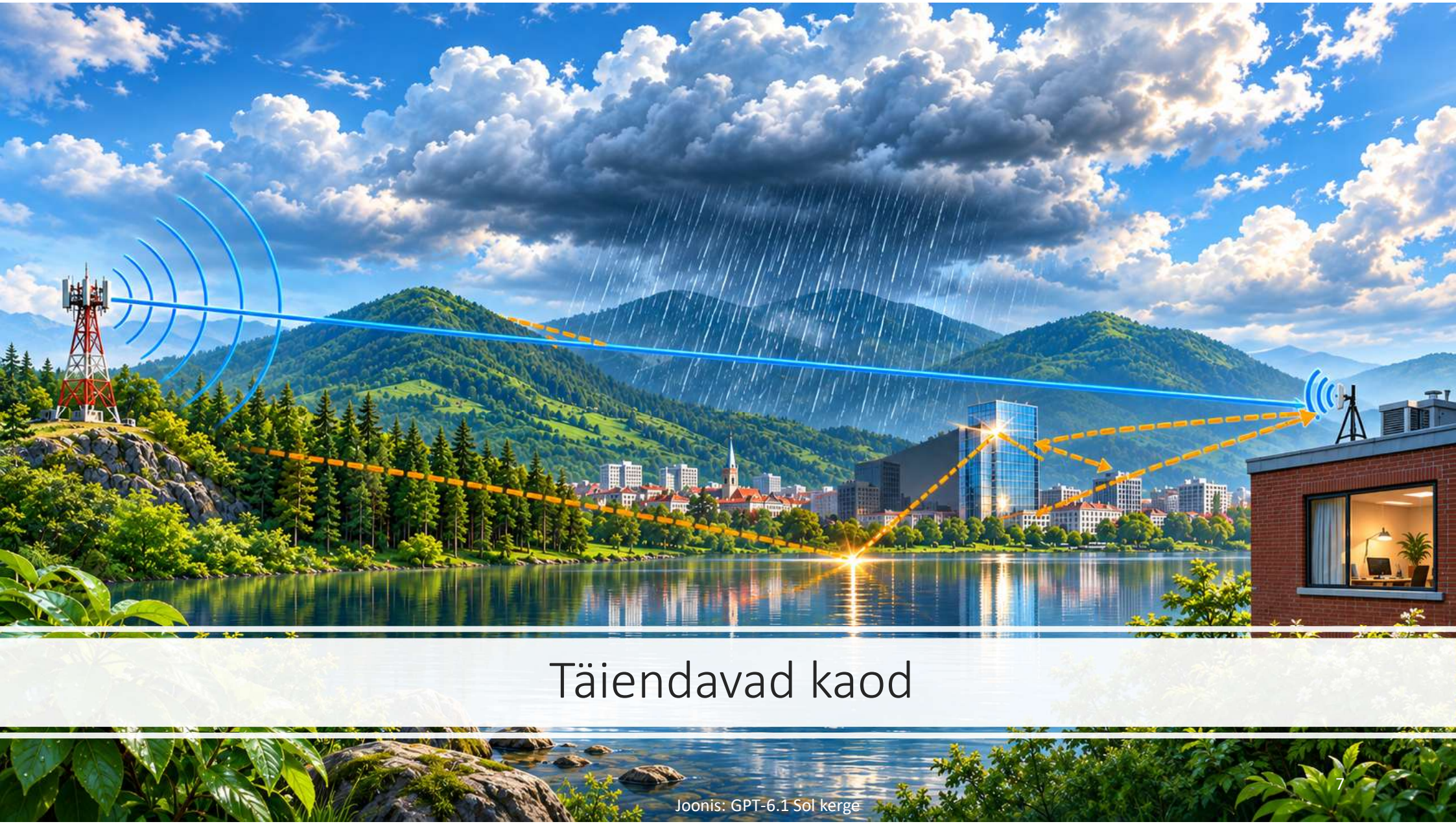
$$FSL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 .$$

  on vaba ruumi kadu (*free space (path) loss*).
- See kadu on põhjustatud Universumi kolmemõõtmelisusest ja eksisteerib alati ning kõikjal.
- **NB!** Valem kehtib ainult siis kui $d >> \lambda$ (kaugväljas).

Friisi valem - muutujad

- P_{Vv} – vastuvõetud signaali võimsus[W];
- P_s – saatevõimsus [W];
- G_s – saateantenni võimendus;
- G_{Vv} – vastuvõtuantenni võimendus;
- λ – signaali lainepikkus [m];
- d – saatja ja vastuvõtja vahekaugus [m].





Täiendavad kaod

Joonis: GPT-6.1 Sol kerge

Lahkusobituskadu



- Lahkusobituskadu (*Mismatch loss*)

$$ML = 1-|\Gamma|^2$$

  tekib kui antenn ei ole sobitatud saatja väljundi/vastuvõtja sisendi või seda nendega ühendava ülekandeliini/lainejuhiga.

- Peegeldustegur Γ on seotud antenni- Z_A ja allika (koormuse) impedantsidega Z_0 järgnevalt

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}.$$

Antenni suunamise kadu

- Friisi valemis kasutatud antennide võimendused on antud eeldusel, et antennide suunadiagrammide maksimumid on täpselt teineteise suunas.
- Reaalses elus asjad tavaliselt nii ei ole.
- Suunamise kao hinnang sõltub antennide suunadiagrammide kujust.
- Arvestama peab kas antennid on statsionaarsed või mobiilsed, kas nad on fikseeritud orientatsiooniga või pööratavad jms.
- Tugev tuul, kogunenud vihmavesi või lumi, jäide soojuspaisumine jms võib samuti antenni orientatsiooni muuta.



Polarisatsioonikadu

- Kahe lineaarselt polariseeritud antenni polarisatsioonitasandite erinevusest põhjustatud täiendavat kadu iseloomustatakse **polarisatsioonikao teguriga** (*Polarization Loss factor*)

$$\mathrm{PLF} = |\mathbf{a}_s \cdot \mathbf{a}_{Vv}|^2 = \cos^2(\phi),$$

  kus $\mathbf{a}_s$ ja $\mathbf{a}_{Vv}$ on vastavalt saate- ja vastuvõtuantenni polarisatsiooni suunda (tasandit) näitavad ühikvektorid. Nurk ϕ on nende tasandite- ja seega ka antennide orientatsioonide vaheline nurk.

- Suurus näitab kui suur osa saadetud võimsusest vastu võetakse jäädes arvuliselt vahemiku 0…1.

Polarisatsioonikadu



- Polarisatsioonikadu

$$L_{pol} = -10\log(PLF)\,.$$

- Lineaarse- ja ringpolarisatsiooniga antenni vaheline polarisatsioonikadu on, nende orientatsioonist sõltumatult, alati 3 dB.
- Kahe samakäelise ringpolarisatsiooniga antenni vaheline polarisatsioonikadu on alati null.
- Vastupidiste käelisuste korral on polarisatsioonikadu lõputult suur.

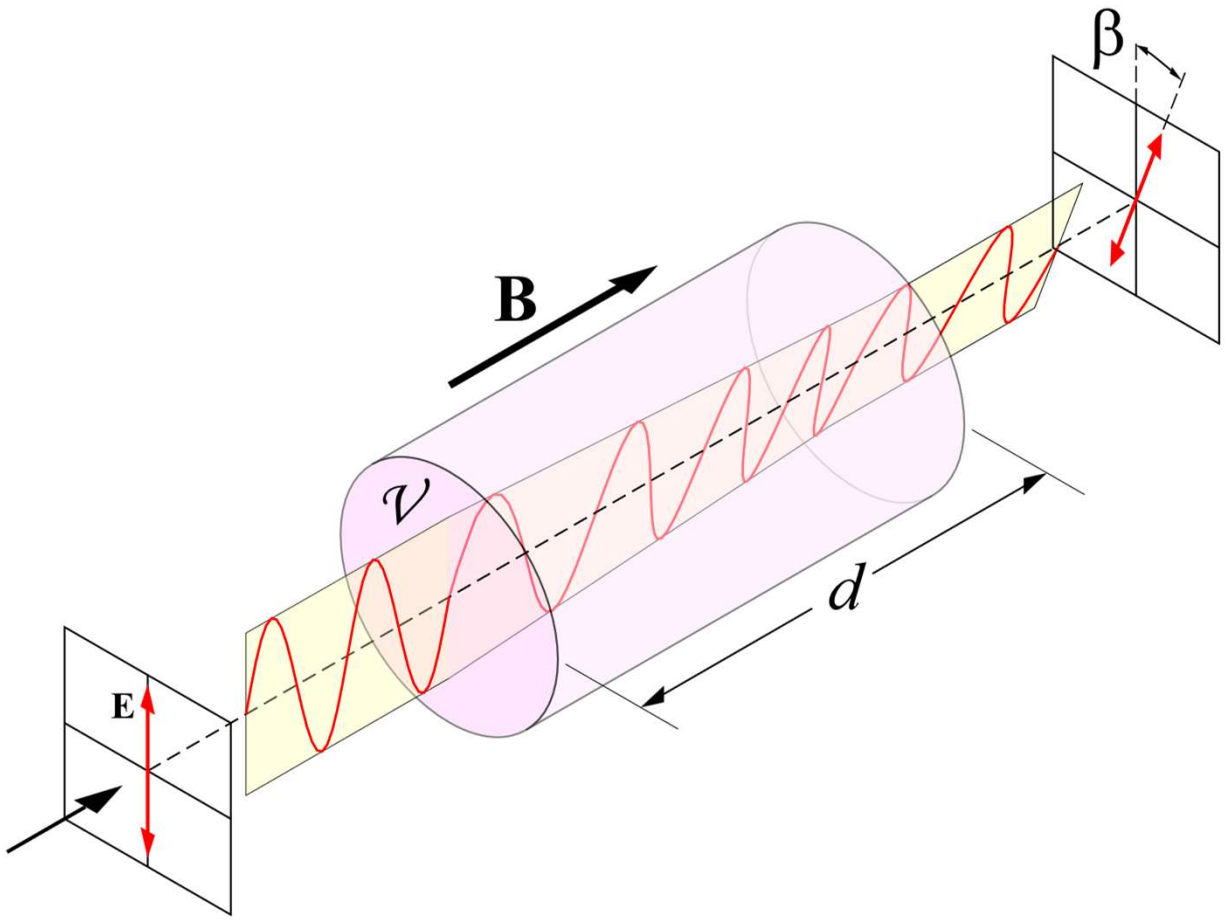
Foto: https://shop.prodrone.pl/en_US/p/PRO-Helical-antenna-7-turn-5.8Ghz-12dbi-v2-/464

Faraday efekt

- Tuntud ka kui magneto-optiline Faraday efekt.
- Faraday efekt seisneb magnetväljas asuvas keskkonnas kulgeva elektromagnetlaine polarisatsioonitasandi pöördumises. Pöörde suurus on võrdeline magnetvälja liikumissuunalise komponendi tugevusega.
- Efekt mõjub Maa ionosfääris levivatele raadiolainetele põhjustatuna Maa enda magnetväljast.
- Polarisatsioonitasandi pöördenurk on: $\beta = vBd$
  - *B* on magnetvoo tiheduse levisuunaline komponent, *d* on leviteekonna pikkus ja **Verdet' konstant** *v* sõltub keskkonna temperatuurist ning signaali lainepikkusest

$$v \sim \lambda^2.$$

Faraday efekt



Joonis: https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_effect#/media/File:Faraday-effect.svg

Kaod ülekandeliinides

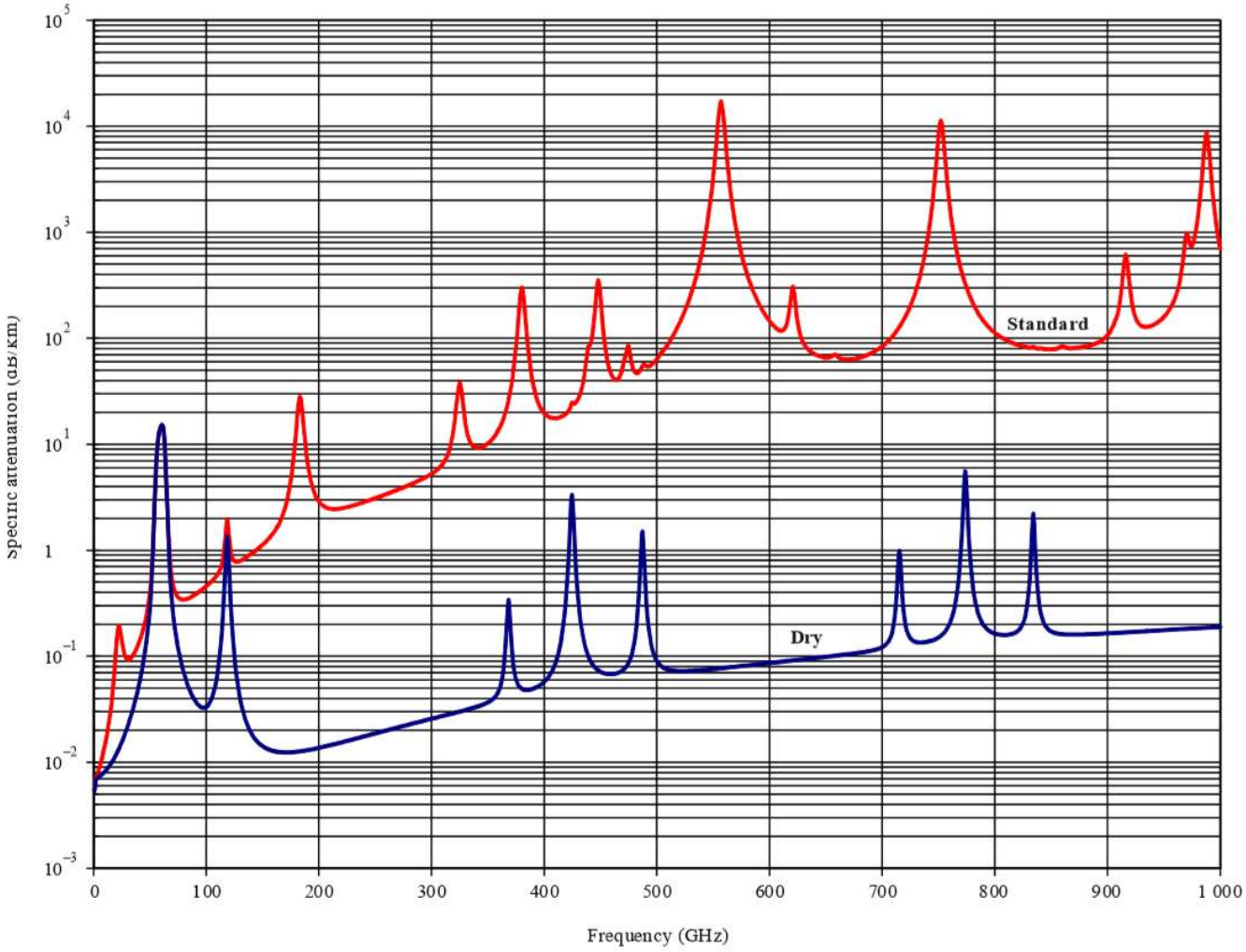
- Antenni ja raadiosideseadme vahelistes ülekandeliinides või lainejuhtides tekivad samuti täiendavad kaod millega tuleb arvestada.
- Kadudega keskkonnas leviva signaali energiakadu iseloomustatakse sumbeteguriga α [Np/m]. Levides sellises keskkonnas vahemaa d on ülekanne $e^{-\alpha d}$.
- Praktikas väljendatakse kadusid levikeskkonnas detsibellides pikkusühiku kohta. Näiteks ülekandeliinis [dB/100 m] või õhus [dB/km].
- Kadude suurus sõltub tavaliselt signaali sagedusest.
- Kaod atmosfääris sõltuvad ka selle veesisaldusest.
  - Erinev kaotegur vihma, udu, lumesaju jms korral.

Sumbumus atmosfääri gaasides

- Saadaval ligikaudsed hinnangud sagedusvahemikus 1 – 1000 GHz.
- Lihtsustatud hinnangud sagedusvahemikus 1- 350 GHz.
- Mõlemal juhul on vaja teada õhurõhku, -temperatuuri ja veeauru tihedust huvipakkuvas kohas.

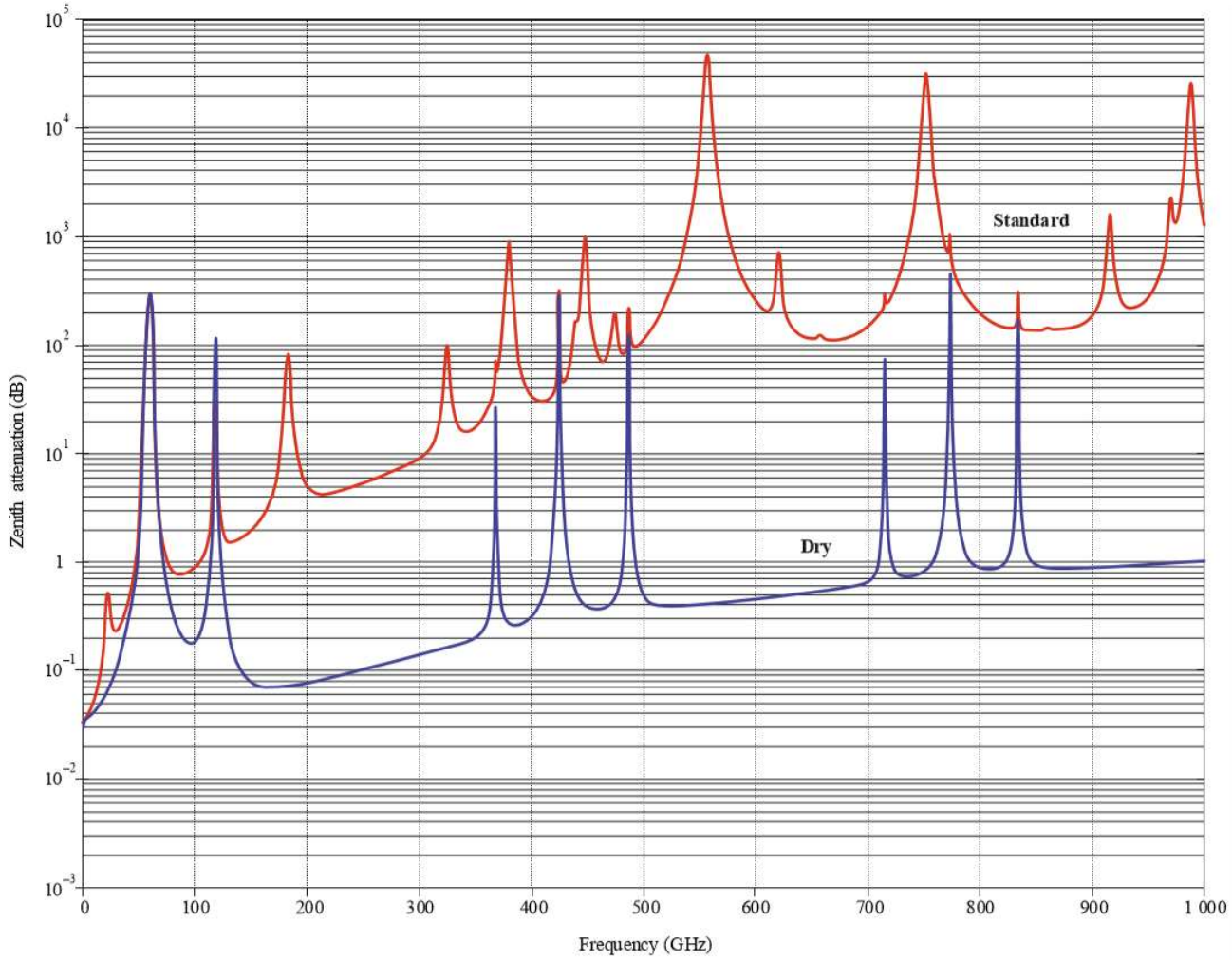


Erisumbumus atmosfäärigaaside tõttu



Joonis: ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases

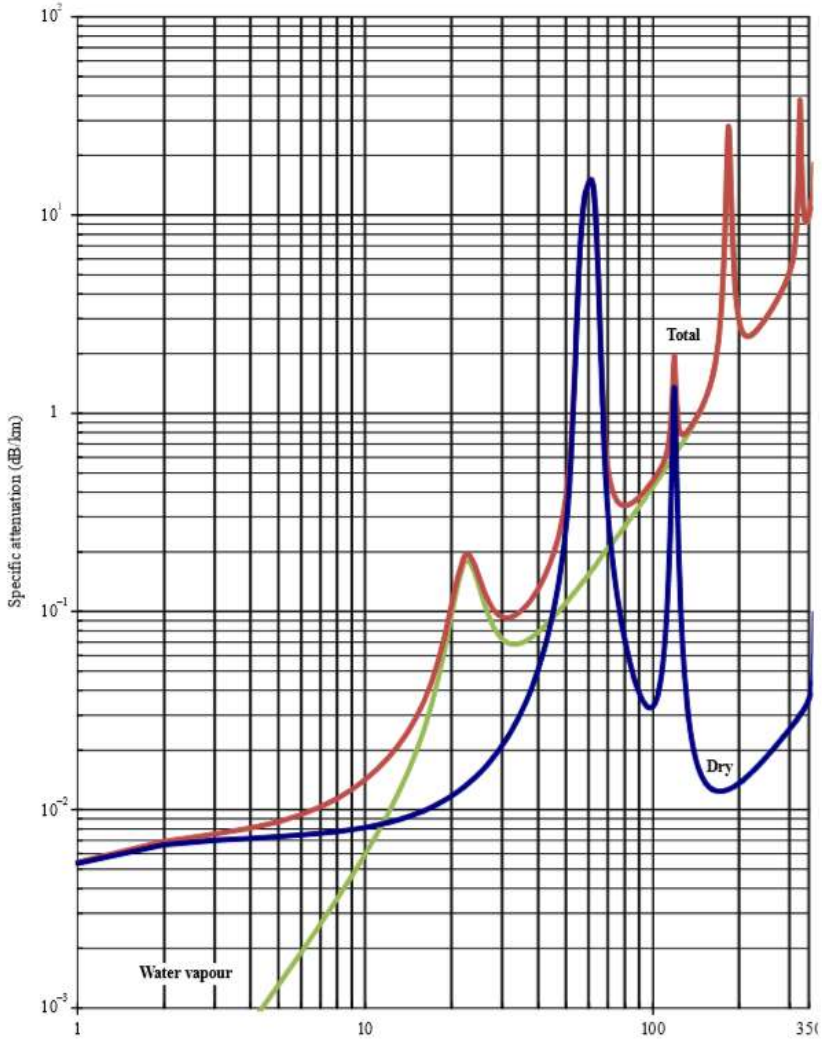
Erisumbumus seniidis



Joonis: ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases

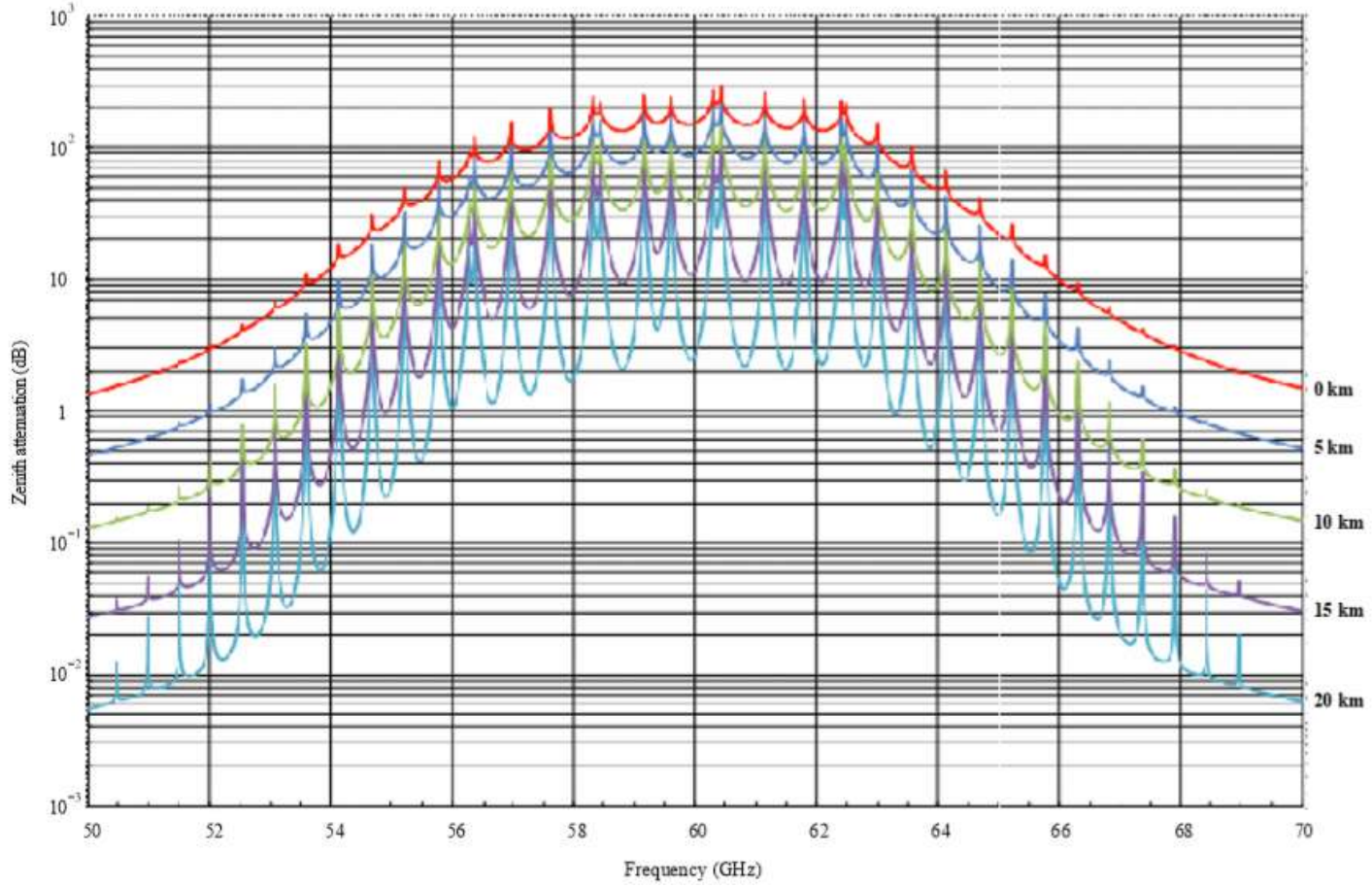
Erisumbumus atmosfäärigaaside tõttu

Lihtsustatud lähendus
Õhurõhk: 1013,25 hPa;
Õhutemperatuur: 15°C;
Veeauru tihedus: 7,5 g/m^3.



Joonis: ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases

Õhuhapniku sumbumus seniids



Joonis: ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases

Vihmast põhjustatud erisumbumus

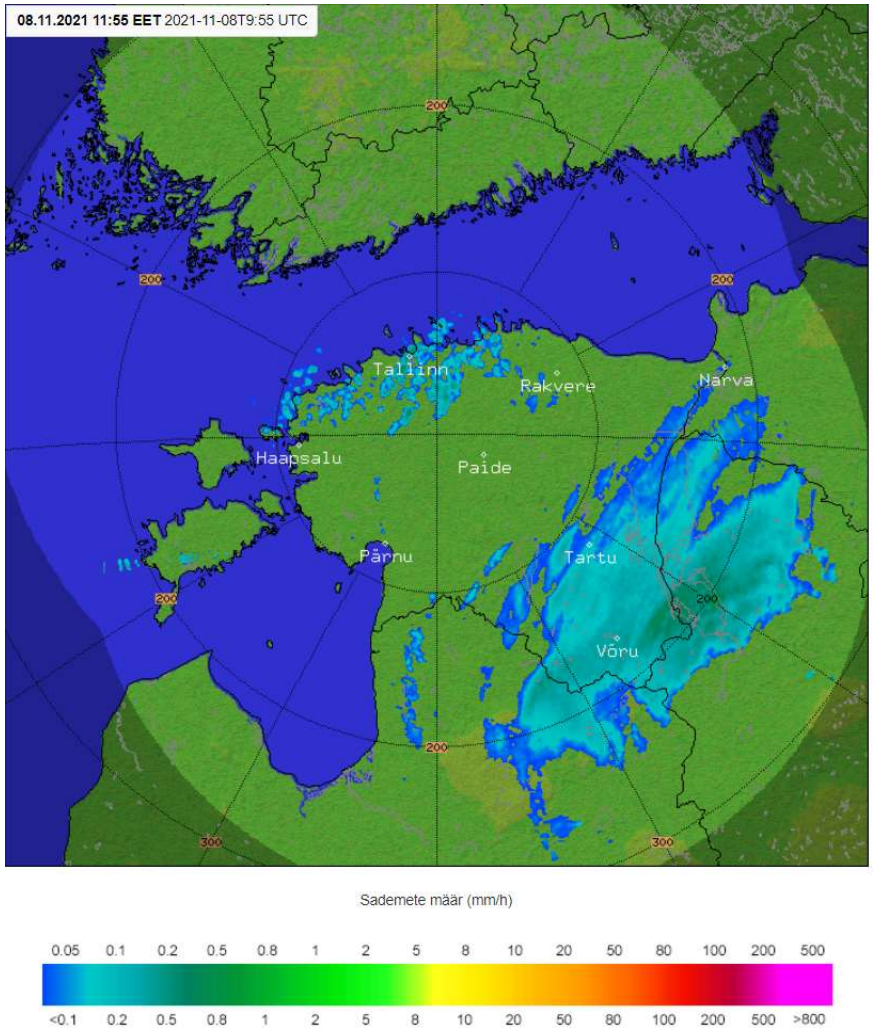
- Vihmast põhjustatud erisumbumus γ_R (dB/km) sõltub **sademete määrast** (*rain rate*) R (mm/h) järgmiselt:

$$\gamma_R = kR^{\alpha}.$$

- Koefitsientide k ja α sõltuvad sagedusest, f vahemikus 1 to 1 000 GHz.
- Väärtused on eksperimentaalselt kogutud ja need sõltuvad lisaks ka raadiolainete polarisatsioonist.
- Sademete määr:
  - Kerge: $R < 2{,}5$ mm/h
  - Mõõdukas: $2{,}5 < R < 7{,}6$ mm/h
  - Tugev $7{,}6 < R < 50$ mm/h

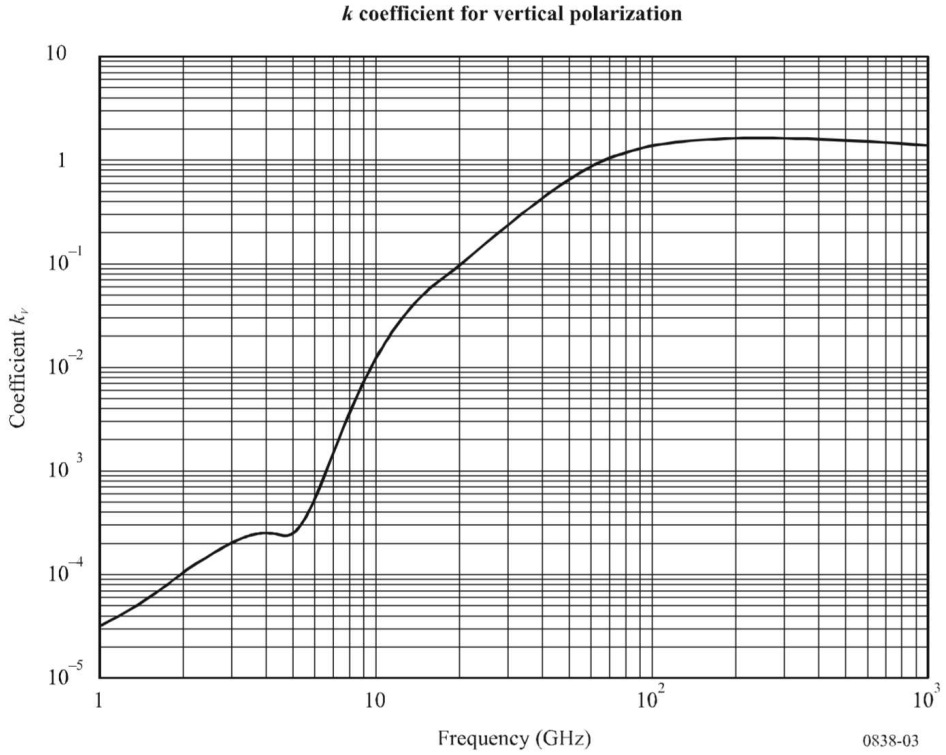


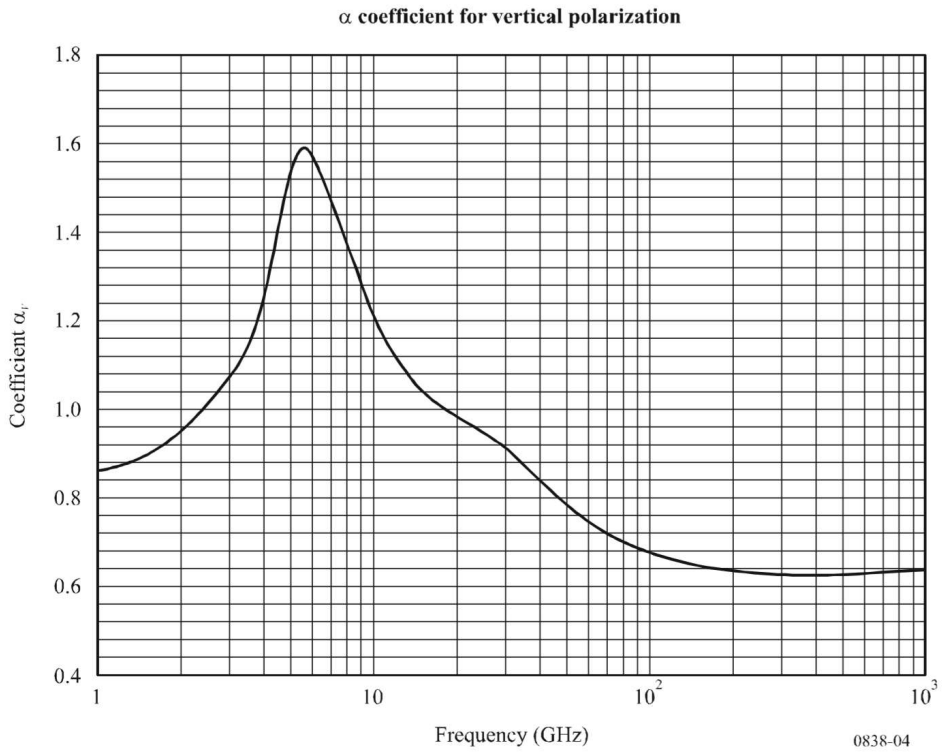
Sademete määr



Reaalaja ilmaradari pilt: http://www.ilmateenistus.ee/ilm/ilmavaatlused/radaripildid/komposiitpilt/

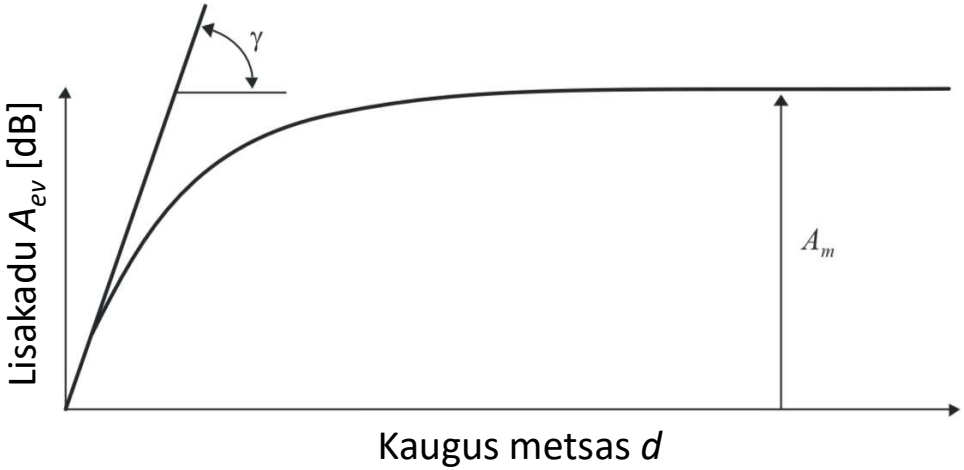
Vihmast põhjustatud erisumbumus





Joonis: ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.

Sumbumus taimestikus



Täiendav sumbumus sagedustel üle 30 MHz kaugustel üle 500 m [6].

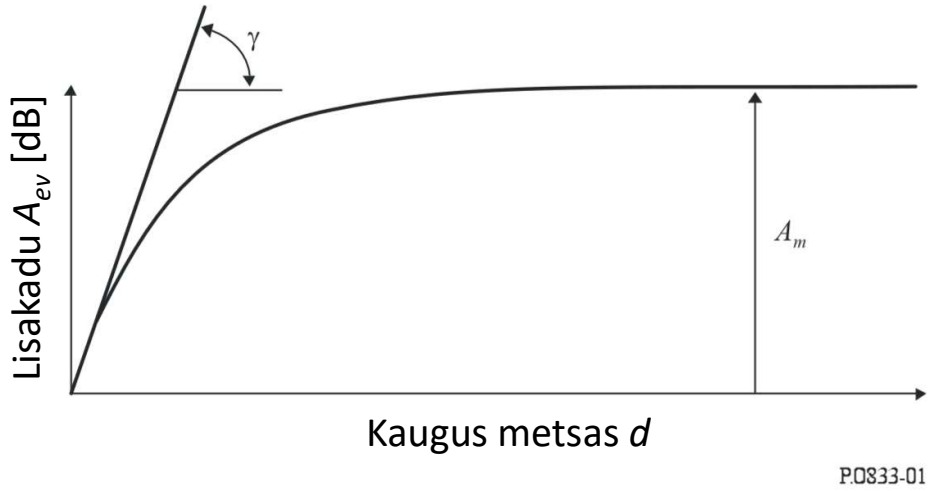
Sagedus [MHz]	Sumbumus [dB]
50	7
145	10
225	12
300	14
400	16



Joonis: ITU-R P.833-10. Attenuation in vegetation

Sumbumus taimestikus

- Täiendav sumbumus lühikese vahemaa korral on



Joonis: ITU-R P.833-10. Attenuation in vegetation

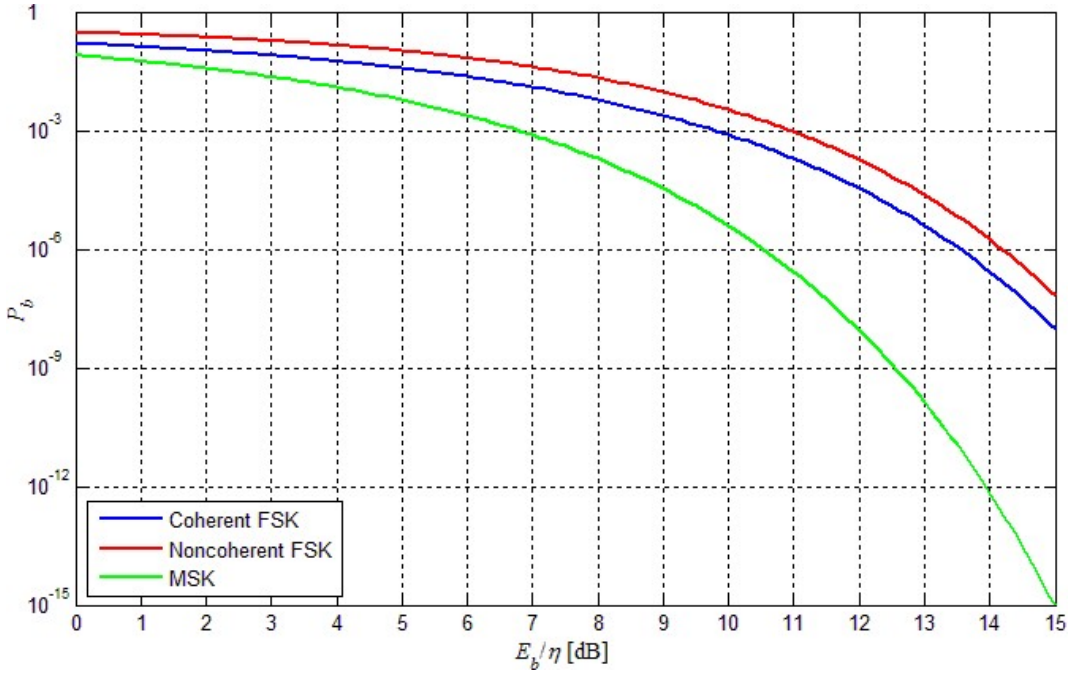
Vastuvõtja tundlikkus

- Minimaalne vajalik võimsus vastuvõtja sisendis

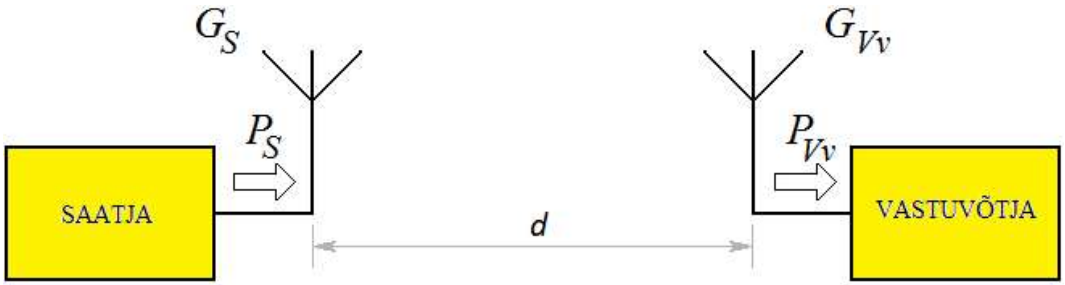
$$P_{min} = k \cdot T_0 \cdot B \cdot F \cdot SNR_{Vmin}$$

- Joonisel on näitena toodud bitivea sõltuvus signaal-müra suhtest erinevate FKS modulatsiooniviiside korral.
- Signaal-müra suhe on võrdeline biti energia E_b valge müra võimsuse spektraaltihedusse η:

$$SNR = \frac{E_b}{\eta} \cdot \frac{r}{B} .$$



Lingi bilanss



- Friisi ülekande valem logaritmilises skaalas on tuntud kui **lingi bilanss** (*Link Budget*).
- Võimsused [dBm] , antennide võimendused [dBi] ja kaod sidekanalis [dB]:

$$P_{Vv} = P_s + G_S + G_{Vv} - FSL - L.$$

- Praktilistes ühikustes kui vahemaa on [km] ja sagedus [MHz]:

$$FSL = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 32{,}45.$$

Lingi bilansi näide:

parameter	value		unit
	best case	worst case	
Satellite transmitter			
Transmit power	0,32	0,50	W
Transmit power P_t	-4,95	-3,01	dBW
Frequency f	0,44	0,44	GHz
Transmit antenna gain G_t	-1,40	2,15	dBi
Transmission line losses	0,00	0,05	dB
$EIRP = P_t + G_t$	-6,35	-0,86	dBW
Channel			
Antenna pointing loss	4,00	18,55	dB
Atmospheric / Ionospheric Loss	0,08	5,25	dB
Zenith:			
Distance *d1*	540	600	km
Free Space Loss *FSL1*	139,87	140,84	dB
Total loss *L1*	143,95	164,64	dB
Near horizon:			
Distance *d2*	2678	2830	km
Free Space Loss *FSL2*	153,78	154,31	dB
Total loss *L2*	157,86	178,11	dB

parameter	value		unit
	best case	worst case	
Receiver (ground station)			
Antenna gain G_r	16,00	16,00	dBi
System noise temperature T_s	241,00	241,00	°K
Figure of merit Gr/T_s	-7,82	-7,82	dB/°K
General			
Bit rate r_b	9600	4800	bps
Required E_b/N_0 for given modulation	13,00	14,00	dB
Zenith:			
Final1 E_b/N_0	30,65	18,47	dB
Link margin	17,65	4,47	dB
Near horizon:			
Final2 E_b/N_0	16,75	4,99	dB
Link margin	3,75	-9,01	dB

Lingi bilanss - muutujad

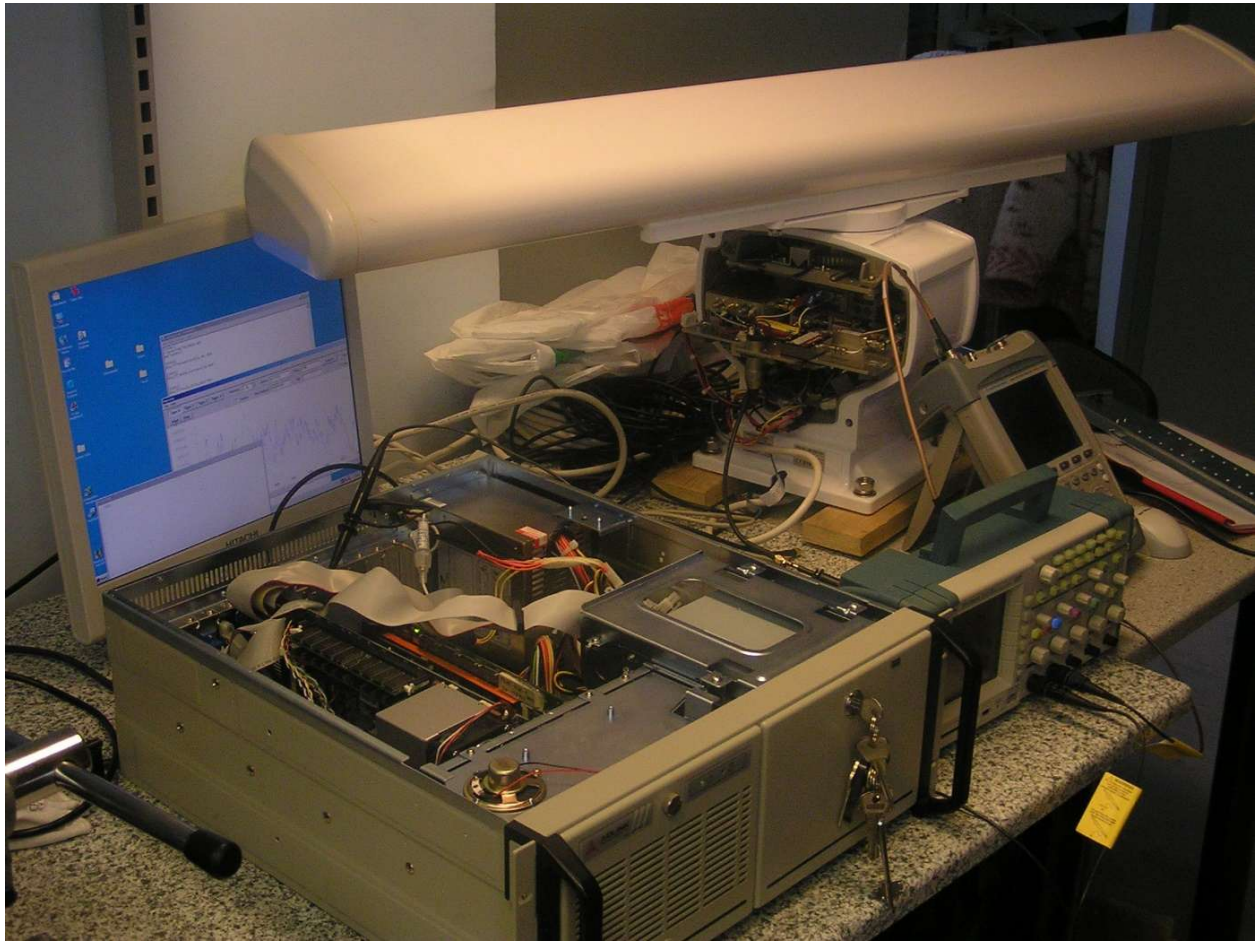


- Friisi valem logaritmilises skaalas:
  - Saatevõimsus P_s [dBm] või [dBW];
  - Vastuvõetud signaali võimsus P_{Vv} [dBm] või [dBW];
  - Saate- G_t ja vastuvõtuantenni võimendused G_r [dBi];
  - Ekvivalentne isotroopne kiirgusvõimsus *EIRP* = P_t + G_t [dBm] või [dBW];
  - Vaba ruumi kadu *FSL* [dB]

$$FSL = 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right);$$

  - Muud kaod *L* [dB].

Radar

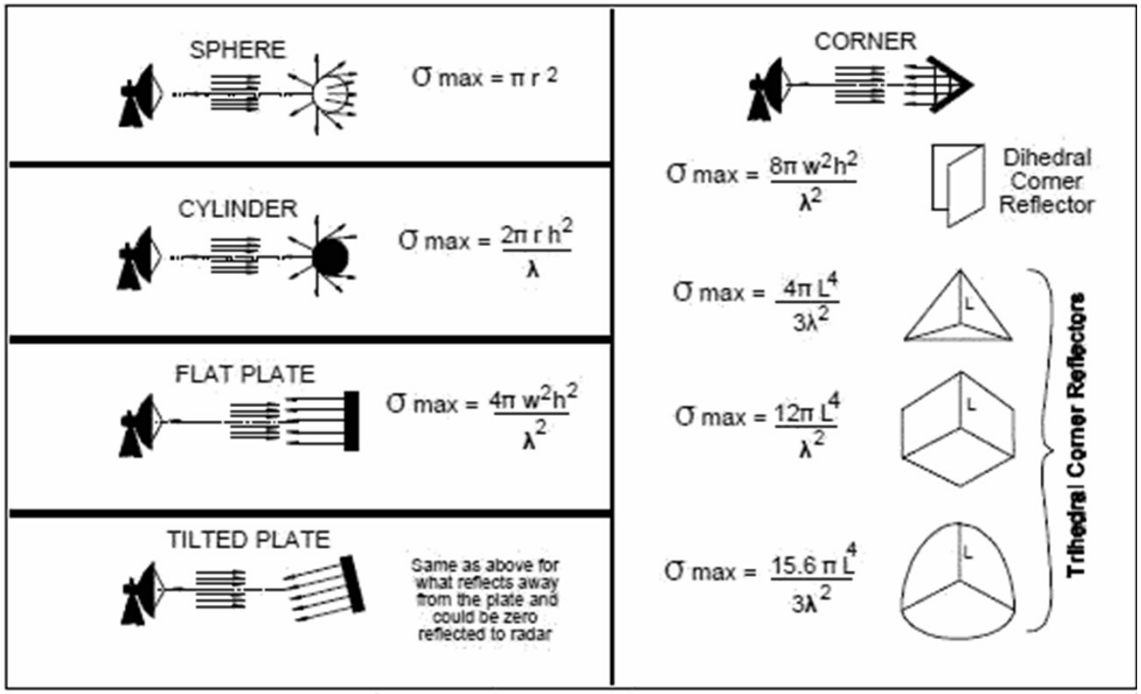


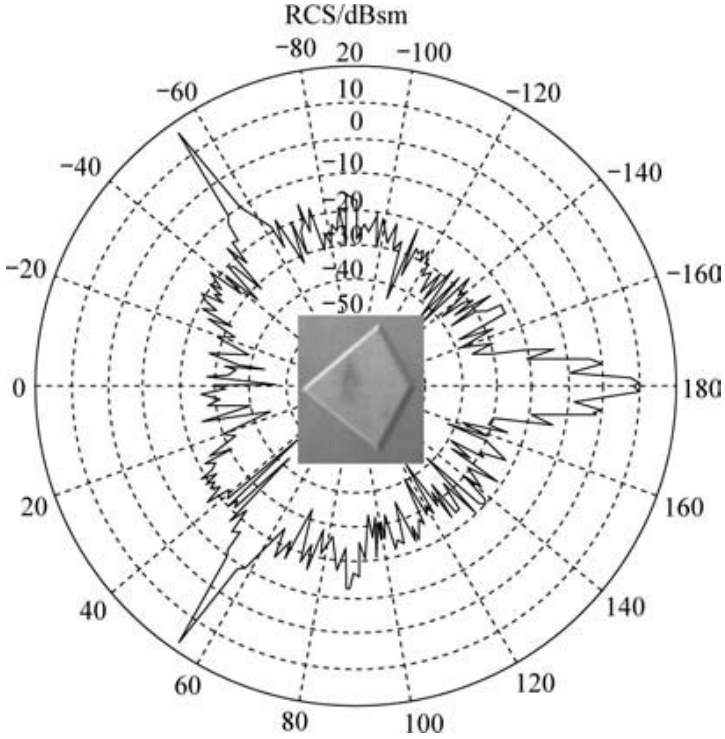
Radari valem

- P_{Vv} – vastuvõetud kajasignaali võimsus [W];
- P_s – saatevõimsus [W];
- G_s and G_{Vv} – saate- ja vastuvõtuantenni võimendused
  - Monostaatilise impulss-radari korral kasutatakse sama antenni nii saatel kui vastuvõtul: $G_s = G_{Vv} = G$;
- σ – Sihtmärgi efektiivne peegelduspindala (*radar cross section*) [m^2];
- λ – signaali lainepikkus [m];
- d – kaugus sihtmärgini[m].

$$P_{Vv} = \frac{P_s G_s G_{Vv} \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 d^4}$$

Efektiivne peegelduspindala





Joonised: Keysight. A Framework for Understanding: Deriving the Radar Range Equation,
https://www.researchgate.net/figure/RCS-curves-corresponding-to-two-types-of-stealth-aircraft-under-the-S-wave-band_fig1_222403698

Efektiivne peegelduspindala (*X-band*)

Sihtmärk	*RCS* [m^2]	*RCS* [dB]
Lind	0.01	-20
Inimene	1	0
jaht	10	10
auto	100	20
veok	200	23
nurkpeegeldi	20379	43.1



Tabel: www.radartutorial.eu



Efektiivse peegelduspindala mõõtmine

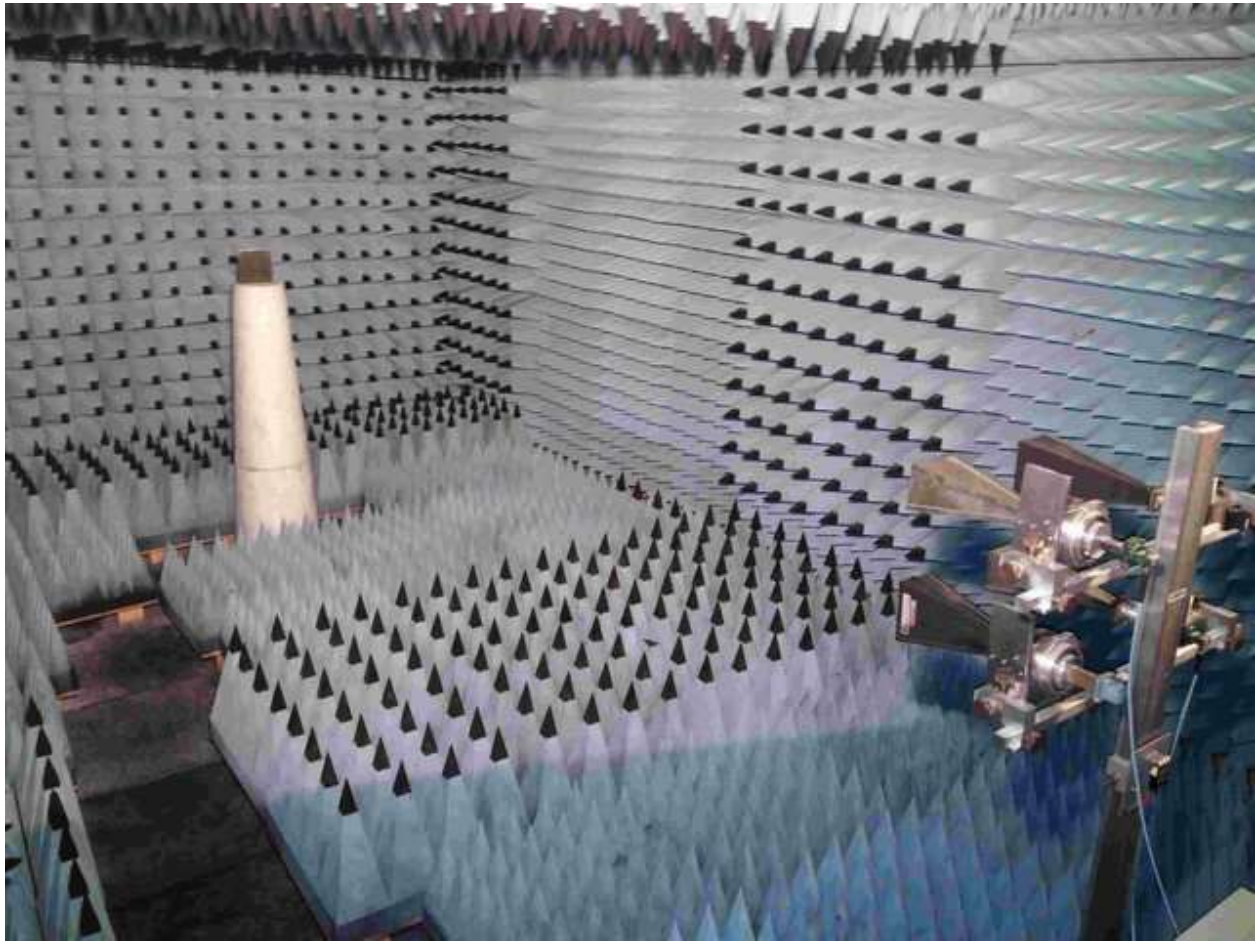


Foto: A. Reis et al., "Radar Cross Section Pattern Measurements in a Mode-Stirred Reverberation Chamber: Theory and Experiments," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 9, pp. 5942-5952, Sept. 2021

Näide



Antud:

- P_s = 250 kW;
- G = 36 dBi;
- A_{eff} = 4 m^2;
- σ = 25 m^2;
- P_{rmin} = -90 dBm.
- Leia maksimaalne tuvastuskaugus d_{max} = ?

Täiendavaid materjale

[1] Practical Telecommunications and Wireless Communications for Business Industry. Elsevier Ltd, 2004. Ch 3 - Transmission media.

[2] Keysight. A Framework for Understanding: Deriving the Radar Range Equation. Application Note http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-1386EN.pdf, 03.11.2026.

[3] RF-cafe. Radar Cross Section. http://www.rfcafe.com/references/electrical/ew-radar-handbook/radar-cross-section.htm, 03.11.2026.

[4] ITU-R Recommendation ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-I!!PDF-E.pdf, 03.11.2026.

[5] ITU-R Recommendation ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-E.pdf , 03.11.2026.

[6] Recommendation ITU-R P.833-10. Attenuation in vegetation https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-10-202109-I!!PDF-E.pdf, 03.11.2026.

