

Voyager: Signaldæmpning for Radioamatører

Aktuelle Tal (april 2026)

Voyager 1

- Afstand: ~~170 AU~~ (25,5 mia. km)
- One-way signaltid: ~23,5 timer

Voyager 2

- Afstand: ~~143 AU~~ (21,4 mia. km)
- One-way signaltid: ~19,75 timer

Kilde: NASA JPL Horizons (2026)

Grundlæggende: Hvad er dæmpning?

Når et radiosignal udbreder sig i det tomme rum, sker der ingen absorption af energien. Der er ingen molekyler, gas eller materiale til at absorbere eller sprede signalet. Dette er fundamental forskellen fra kabler eller atmosfærisk kommunikation.

Men signalet bliver alligevel svagere - og det skyldes udelukkende geometrisk spredning.

Invers kvadratloven - den simple forklaring

Tænk på lys fra en lommelygte i mørket. Jo længere væk du holder den, desto svagere virker lyset. Det er præcis det samme med radiosignaler.

Signalets energi fordeles sig over en stadig større kugleflade, efterhånden som det bevæger sig væk fra senderen.

Kugleareal

$$A = 4 \times \pi \times r^2$$

hvor r er afstanden fra senderen.

Intensitet (invers kvadratlov)

$$I = P / (4 \times \pi \times r^2)$$

hvor P er den sendte effekt og I er intensiteten ved afstanden r.

Forholdet mellem modtaget og sendt effekt

$$P(\text{modtaget}) / P(\text{sendt}) = 1 / r^2$$

Eller omskrevet:

$$P(\text{modtaget}) = P(\text{sendt}) \times (1 / r^2)$$

Fri-rum dæmpning (Free Space Path Loss)

For radioamatører er den klassiske formel for fri-rum dæmpning:

Formlen

$$L(\text{FdB}) = 32,45 + 20 \times \log_{10}(f(\text{MHz})) + 20 \times \log_{10}(d(\text{km}))$$

Forklaring

Led	Beskrivelse
L(FdB)	Fri-rum dæmpning i decibel
32,45	Konstant (afhænger af valgte enheder)
f(MHz)	Sendefrekvens i megahertz
d(km)	Afstand i kilometer

Alternativ formel (med miles)

$$L(\text{FdB}) = 37 + 20 \times \log_{10}(f(\text{MHz})) + 20 \times \log_{10}(d(\text{miles}))$$

Eksempel med Voyager 1

Voyager 1 bruger primært X-band (8420 MHz) og befinder sig i ca. 25.500.000.000 km's afstand.

Beregning

$$L(\text{FdB}) = 32,45 + 20 \times \log_{10}(8420) + 20 \times \log_{10}(25.500.000.000)$$

Udfyldning af værdier

- $20 \times \log_{10}(8420) = 20 \times 3,925 = 78,5 \text{ dB}$
 - $20 \times \log_{10}(25.500.000.000) = 20 \times 10,406 = 208,1 \text{ dB}$
-

Resultat

$$L(\text{FdB}) = 32,45 + 78,5 + 208,1 = 305 \text{ dB}$$

Hvad betyder 305 dB i praksis?

Voyager sender med 23 watt fra sin 3,7 meter parabolantenne. Vi beregner den modtagne effekt:

Link budget formel

$$P(\text{modtaget}) = E(\text{udsendt}) + G(\text{sender}) + G(\text{modtager}) - L(\text{FdB})$$

hvor:

- E = Effekt i dBm (eller dBW)
- G = Antenneforstærkning i dBi
- L = Dæmpning i dB

Tal for Voyager 1

Parameter	Værdi
Sendereffekt	23 W = 43,6 dBm
Sender-antenne gain	~48 dBi
Modtager-antenne gain (70m DSN)	~57 dBi
Path loss	-305 dB

Beregning

$$P(\text{modtaget}) = 43,6 + 48 + 57 - 305 = -156,4 \text{ dBm}$$

Sammenligning med støj

Termisk støj ved rumtemperatur (290K) i 1 Hz båndbredde:

$$P(\text{støj}) = -174 \text{ dBm/Hz}$$

Hvorfor virker kommunikationen stadig?

Trods den ekstreme dæmpning holder NASA kontakten takket være:

1. Extremt smal båndbredde: Kun 40-160 bit/s, hvilket holder støjgulvet lavt
2. Kæmpe modtagerantenner: 70m paraboler med høj gain
3. Kølede forforstærkere: LNA ved ~15-20K reducerer støjbidraget
4. Avanceret modtagning: Kan detektere enkelte fotoner med korrelationsmodtagelse

5. Korrektion for Doppler: Voyager bevæger sig ~17 km/s væk fra Jorden, så frekvensforskydning skal korrigeres

Konklusion: Dæmpning i tomt rum følger invers kvadratloven

I modsætning til kabler eller atmosfære, hvor dæmpning skyldes materialeabsorption, er der i det tomme rum ingen tab af energi. Signalet dæmpes udelukkende fordi energien spreder sig over et stadig større areal.

Praktisk tommelfingerregel

Afstand	Effekttab
2×	¼ effekt = -6 dB
10×	1/100 effekt = -20 dB
100×	1/10.000 effekt = -40 dB

Voyager 1 specifikt

- Ved launch (1977): ~100 dB path loss
- I dag (2026): ~305 dB path loss

Voyager 1's signal er nu så svagt, at det svarer til at modtage en 23-watts sender fra en afstand på 25 milliarder kilometer - en præstation der kun er mulig takket være enorme antenner, kølet elektronik og sofistikeret signalbehandling.

Det er et monumentalt bevis på ingeniørkunstens grænser.

Kilder

- NASA JPL Horizons: ssd.jpl.nasa.gov
- SpaceTracker.live
- Wikipedia "Link budget"
- SETI Allen Telescope Array observation
- Silicon Graybeard beregninger