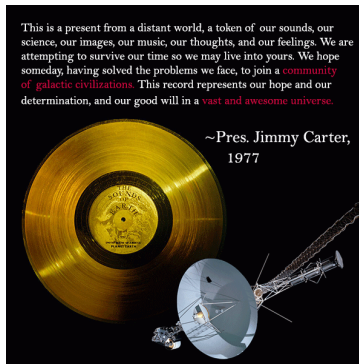

Link-Budget: La missió interestel·lar Voyager



Xavier Fàbregas, Francesc Torres, Jordi Romeu (Desembre 2013)

1

QUALITAT DE LES COMUNICACIONS

Comunicacions Analògiques: Relació Senyal Soroll

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{S}{B \cdot N_0}$$

Comunicacions Digitals: BER (Taxa d'error de bits)

La BER està directament relacionada amb $\rightarrow \left(\frac{E_b}{N_0}\right)$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = \frac{1}{R_{bps}} \left(\frac{S}{N_0}\right)$$

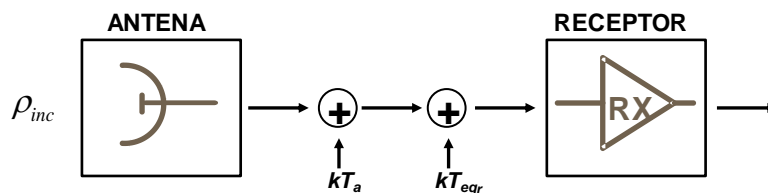
E_b : Energia del bit

N_0 : Densitat espectral de potència de soroll en el receptor kT_{eq}

R_{bps} : Velocitat de transmissió en bits per segon

2

QUALITAT D'UN ENLLAÇ



El soroll produït per l'eficiència de pèrdues de l'antena està inclòs a T_{eqr}

La temperatura de soroll total: $T_{eqs} = T_a + T_{eqr}$

Enllaç Analògic

$$\left(\frac{S}{N}\right) = PIRE \cdot \frac{1}{L_0} \cdot D_R \cdot C_p \cdot \frac{1}{B \cdot k \cdot T_{eqs}}$$

Enllaç Digital

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = PIRE \cdot \frac{1}{L_0} \cdot D_R \cdot C_p \cdot \frac{1}{k \cdot T_{eqs}} \cdot \frac{1}{R_{bps}}$$

3

FACTOR DE MÈRIT D'UNA ESTACIÓ RECEPTORA

Una vegada que els paràmetres de la transmissió estan fixats, la qualitat de la recepció depèn únicament del factor de mèrit de l'estació receptora:

Factor de Mèrit de l'estació receptora $\longrightarrow \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R \text{ (dB/K)}$

En la definició de Factor de Mèrit s'utilitza el guany de l'antena receptora assumint $G_R = D_R$

Enllaç Analògic

$$\left(\frac{S}{N}\right) = cte \cdot \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R$$

Enllaç Digital

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = cte' \cdot \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R$$

4

AVALUACIÓ DE LA QUALITAT D'UN ENLLAÇ "LINK-BUDGET"

Enllaç Analògic

$$\left(\frac{S}{N}\right) = PIRE \cdot \frac{1}{L_0} \cdot Cp \cdot \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R \cdot \frac{1}{kB}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)(dB) = PIRE(dBW) - L_0(dB) + \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R (dB/K) + Cp(dB) - k(dBW/K - Hz) - B(dB - Hz)$$

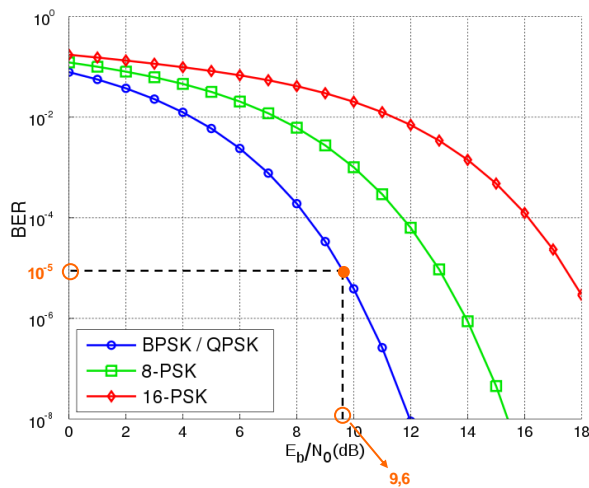
Enllaç Digital

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = PIRE \cdot \frac{1}{L_0} \cdot Cp \cdot \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R \cdot \frac{1}{kR_{bps}}$$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)(dB) = PIRE(dBW) - L_0(dB) + \left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R (dB/K) + Cp(dB) - k(dBW/K - Hz) - R_{bps}(dB - bits/s)$$

5

E_b/N_0 necessari per una BER= 10^{-5} en modulació BPSK/QPSK



$$P_{BPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right)$$

Per una BER= 10^{-5}

La $\frac{E_b}{N_0}$ necessària:

BPSK no codificat: 9.6 dB

BPSK codificat: 6.5 dB

Guany de codificació després del Viterbi: 3.1 dB

6

CÀLCUL DEL FACTOR DE MÈRIT D'UNA ESTACIÓ RECEPTORA

$$\left(\frac{G_R}{T_{eqs}}\right)_R (dB / K) = \left(\frac{E_b}{N_0}\right) (dB) - PIRE (dBW) + L (dB) + k (dBW / K - Hz) + R_{bps} (dB - bits / s) + M (dB)$$

PIRE	61,3 dBW
Pèrdues L:	
Propagació espai lliure (r=6,8·10 ⁸ km , f=8,4 GHz)	287,58 dB
Apuntament estació terrena-sonda	0,5 dB
Desadaptació polarització	0,5 dB
Absorció atmosfèrica	0,5 dB
<u>Atenuació per possible pluja</u>	<u>0,25 dB</u>
Total	289,33 dB
Constant de Boltzmann (k)	-228,6 dBW/K-Hz
Velocitat de transmissió R_{bps}= 3,5 kbit/s	35,44 dB-bit/s
(E_b/N₀) necessari per BER=10⁻⁵ BPSK amb codificació	6,5 dB
Marge de Seguretat (M dB)	4 dB
Factor de Mèrit mínim necessari de l'estació receptora	45,37 dB/K

7

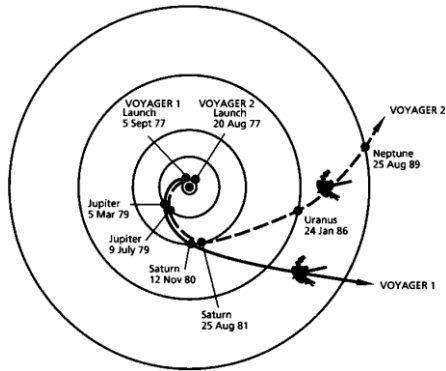
Aplicació a la Missió Voyager

La comunicació més llunyana mai realitzada

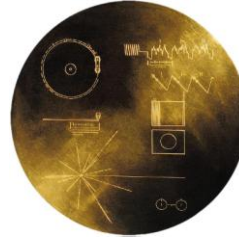
19.000.000.000 km

8

Missió Interplanetària Voyager 1 i 2 1977-2020



Missatges des de la Terra



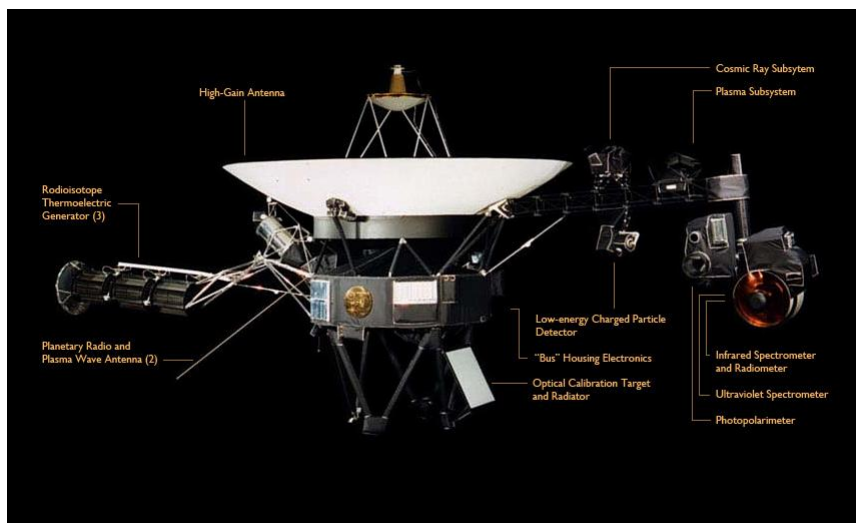
Desembre 2013:

- Temps que triga el senyal entre la Terra i el Voyager: 17h 36'
- Temps total en la comunicació (anada i tornada): 35h 12'

	Llançament	Júpiter	Saturn	Urà	Neptú	Desembre 2013
Voyager 1	5 Sept. 1977	5 Març 1979	12 Nov. 1980	-----	-----	19-10 ⁹ km
Voyager 2	20 Ago. 1977	7 Jul. 1979	25 Ago. 1981	24 Gen. 1986	25 Ago. 1989	15,6-10 ⁹ km

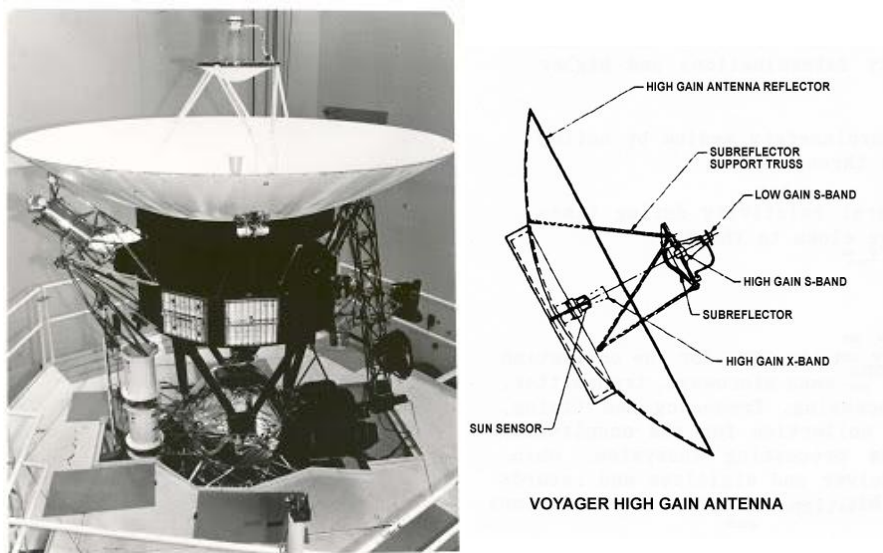
9

INSTRUMENTS EN EL VOYAGER



10

REFLECTORS I ALIMENTADORS



11

REFLECTORS I ALIMENTADORS

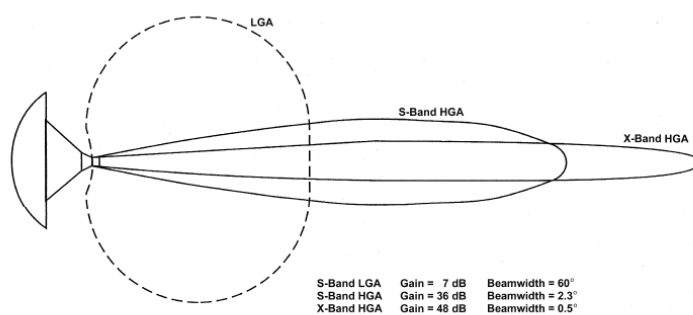


Fig. 3-2. Voyager SXA patterns and beamwidths.

S-Band LGA: Utilitzat just en el procés del llançament i després operatiu per emergències de comunicació. No útil a partir dels 80.

Les comunicacions en el Voyager es fan amb les antenes HGA:

S-Band HGA: Freqüència 2.3 GHz (telemetria), 2.1 GHz (telecontrol), Polaritzador simple RHC

X-Band HGA: Freqüència 8.4 GHz. Doble polaritzador RHC-LHC

12

LES COMUNICACIONS EN EL VOYAYER

TELEMETRIA:

Transmissió d'imatges: R: 115 kbit/s BER: $5 \cdot 10^{-3}$

Transmissió dades altres sensors: R: 3,5 kbit/s i 40 bit/s BER: $5 \cdot 10^{-5}$

TELECONTROL:

Ordres de control: R: 16 bit/s BER: $5 \cdot 10^{-3}$

RADIOMETRIA:

Mesura sobre la portadora i subportadora:

- Posició: retard
- Velocitat i acceleració: Doppler
- Efectes gravitacionals, relativistes, plasma interestel·lar

13

Deep Space Network (DSN)

Antenes de 64 m de diàmetre



Estacions:

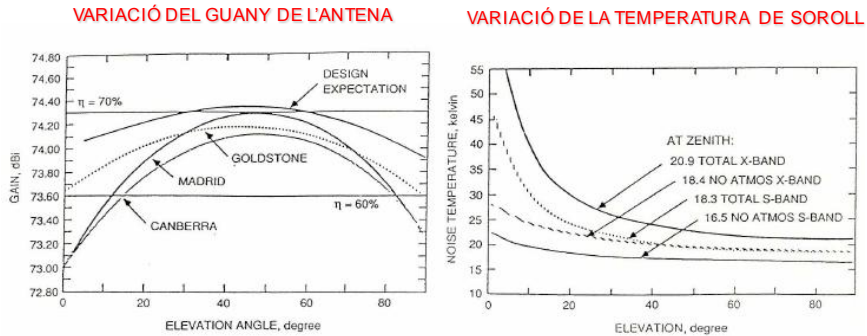
Goldstone , Madrid i Camberra

120° de separació



14

DSN VERSUS ANGLE D'ELEVACIÓ



15

MISSIÓ JÚPITER (1979)

Paràmetre	TELEMETRIA (down-link)		CONTROL (up-link)	unitats
	Banda X	Banda S	Banda S	
Freqüència de portadora	8.4	2.3	2.1	GHz
Potència transmesa	21.3	6.6	10.000	W
Guany antena transmissora	48	35	61	dB
R Terra -Júpiter	$6,8 \cdot 10^8$			Km
Diàmetre antena receptora	64	64	3.7	m
Àrea efectiva receptora	$1,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	3.9	m^2
Temperatura soroll receptors	28.4	22.3	$1,5 \cdot 10^3$	K

ANTENES DSN

Telemetria d'Encontre: Banda X. Antenes de diàmetre de 64 m.

Telemetria de Creuer: Banda S. Antenes de diàmetre de 26 m compartides amb altres missions Helios, Viking, Pioneer,

Telecontrol: Transmissor dedicat en Banda S.

16

MISSION JÚPITER (1979)

TELEMETRIA Banda X: 115 Kb/s

Per una BER $5 \cdot 10^{-3}$ és necessari que la $\frac{E_b}{N_0} > 3 \text{ dB}</math>$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Jup} = \frac{P_{rad} \cdot D_T \cdot A_{eff}}{4\pi R_{Jup}^2} \cdot \frac{1}{k \cdot T_{eq_s} \cdot R_{bps}} = 5,6 \Rightarrow 7,5 \text{ dB}$$

MARGE

$$M = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Jup} (\text{dB}) - \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{\min} (\text{dB}) = 4,5 \text{ dB}$$

Precisió dels apuntaments:

ample de feix $\rightarrow \Delta\theta_{-3\text{dB}} \approx \sqrt{\frac{4\pi}{D}}$

Antenes DSN: $\Delta\theta = 0.02^\circ \pm 0.01^\circ$

Antenes Voyager: $\Delta\theta = 0.5^\circ \pm 0.25^\circ$

El *Voyager* realitza el control de l'apuntament en Banda S.

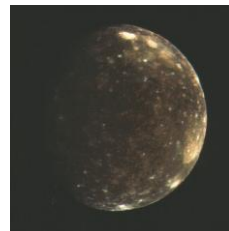
Té una rutina de recerca en cas de pèrdua de contacte.

17

IMATGES DE JÚPITER



CAL·LISTO



Durant el temps que les sondes van orbitar Júpiter van obtenir de Júpiter i els 5 satèl·lits majors:

Voyager 1 \approx 19.000 imatges

Voyager 2 \approx 33.000 imatges

MISSION NEPTÚ (1989)

TELEMETRIA Banda X: 115 Kb/s

Per una BER $5 \cdot 10^{-3}$ és necessari que la $\frac{E_b}{N_0} > 3 \text{ dB}</math>$

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Nep} = \frac{P_{rad} \cdot D_T \cdot A_{efR}}{4\pi R_{Nep}^2} \cdot L \cdot \frac{1}{k \cdot T_{eqs} \cdot R_{bps}} \cdot \left(\frac{R_{Jup}}{R_{Jup}}\right)^2 = \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Jup} \cdot \Delta\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$$

$$\Delta\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{R_{Jup}}{R_{Nep}}\right) = -16 \text{ dB} \quad \longrightarrow \quad \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Nep} = 7,5 - 16 = -8,5 \text{ dB}$$

**La transmissió no era possible sense millorar el segment de terra.
Entre les dues missions es disposava de 10 anys.**

19

MISSION NEPTÚ (1989)

TELEMETRIA Banda X: 21,5 Kb/s

Per una BER $5 \cdot 10^{-3}$ és necessari que la $\frac{E_b}{N_0} > 3 \text{ dB}</math>$

Milliores en la DSN: Antenes de 70 m de diàmetre, $D=74,37 \text{ dB}$; $T_S=25,5 \text{ K}$; $R=21,5 \text{ Kb/s}$

Millora de la directivitat	$74,37 - 72,24 = 2,13 \text{ dB}$	} MILLORA TOTAL $\Delta\left(\frac{E_b}{N_0}\right) = 9,9 \text{ dB}$
Millora en la T_{eqs}	$10 \log\left(\frac{28,5}{25,5}\right) = 0,48 \text{ dB}$	
Millora del Factor de Mèrit (G/T_{eqs})	$2,61 \text{ dB}$	
Millora per reducció de la velocitat de transmissió	$10 \log\left(\frac{115}{21,6}\right) = 7,28 \text{ dB}$	

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{Nep} = -8,5 + 9,9 = 1,4 \text{ dB} \quad \longleftarrow \text{ encara no és possible}$$

20

MISSIÓ NEPTÚ (1989)

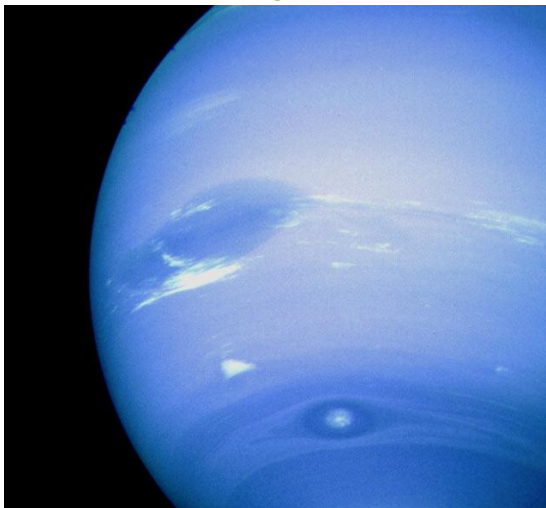
Es van aconseguir 5 dB addicionals de millora, durant la fase d'encontre, combinant el DSN amb un array de 27 antenes de 25 m del VLA i les dues antenes de 34 m



21

IMATGES DE NEPTÚ

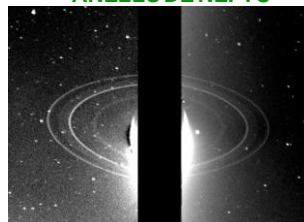
NEPTÚ



TRITÓ

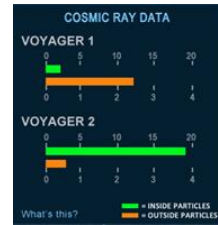
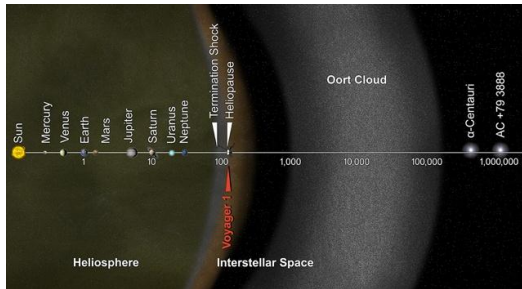


ANELLS DE NEPTÚ



22

MISSIÓ VOYAGER



- El 13 de setembre de 2013 el Voyager 1 ha arribat a l'espai interestel·lar (espai entre estrelles).
- Els Voyager envien un 160 bits de dades cada dia

“Voyager 1, which is working with a finite power supply, has enough electrical power to keep operating the fields and particles science instruments through at least 2020. At that point, mission managers will have to start turning off these instruments one by one to conserve power, with the last one turning off around 2025.”

<http://voyager.jpl.nasa.gov/>