

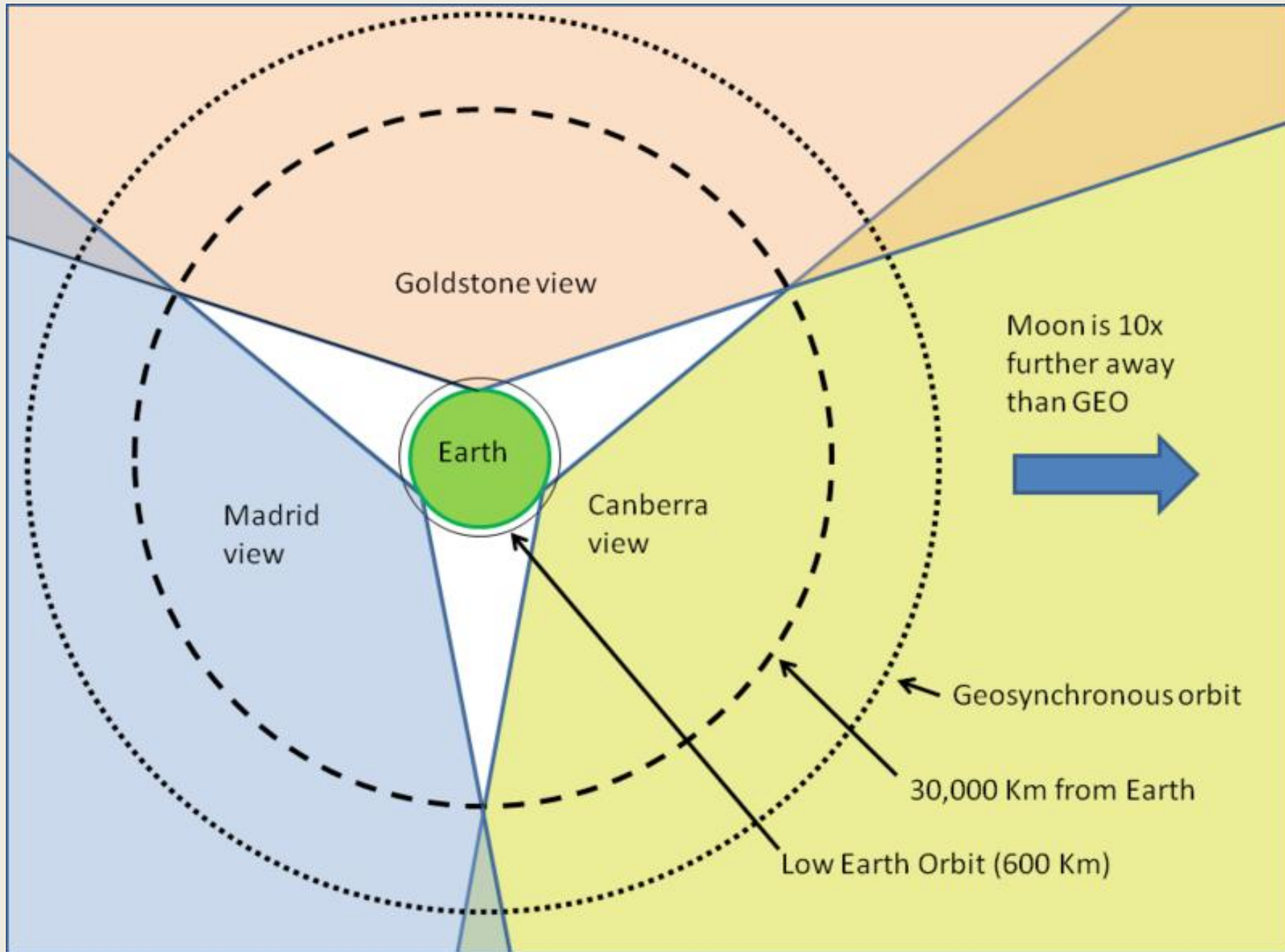
Rádiová komunikace s kosmickými sondami

Miroslav Kasal
kasal@feec.vutbr.cz



Úvod

Rádiová komunikace v meziplanetárním a dnes již dokonce v mezihvězdném prostoru, patří ke špičkovým aplikacím současné radiotechniky. Komunikace probíhá v mikrovlnných pásmech s pozemním segmentem sítě DSN (Deep Space Network), řízeným JPL (Jet Propulsion Laboratory) v Pasadeně. Při prezentaci budou stručně popsány nejzajímavější projekty z tohoto hlediska - Voyager I a II, Cassini&Huygens, New Horizons , MRO-Curiosity a sondy v libračních bodech.





- M
OCT 6
9:28 PM
- G
OCT 6
12:28 PM
- C
OCT 7
6:28 AM

DSCC (Deep Space Communication Center)

Goldstone (USA) s **DSS14**, 24, 25, 26,

Madrid **DSS63**, 65, 54, 55,

Canberra (Austrálie) **DSS43**, 34, 35, a 36,

DSS14, **63** a **43** mají průměr apertury 70 m.

Ostatní DSS (Deep Space Station) mají průměr apertury 34 m, resp. postupně nahrazují starší DSS s 26 m.

OK2AQ EME x OK EME toplist - OK VHF CI x DSN Now x

NASA Jet Propulsion Laboratory [US] | <https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>

Jet Propulsion Laboratory | California Institute of Technology

DEEP SPACE NETWORK NOW

LAST UPDATED: JUL 11 8:37 AM (UTC)

DSN home

TARGET
VOYAGER 2

	TEST	LRO	GTL	
MADRID JUL 11 10:38 AM				
	63	65	54	55
	NHPC	M01O MEX MRO MVN	JNO	MMS2
GOLDSTONE JUL 11 1:38 AM				
	14	24	25	26
	VGR2	ORX	M01O MEX NSYT	MCOA MCOB
CANBERRA JUL 11 6:38 PM				
	43	34	35	36

VIEW ANTENNA VIEW SPACECRAFT VIEW WORLD MAP

VGR2

SPACECRAFT

NAME
Voyager 2

RANGE
17.53 billion km

ROUND-TRIP LIGHT TIME
1.35 days

+ more detail credits gamma Internet access

POWER RECEIVED
-156.76 dBm
(2.11 x 10⁻²² kW)

<https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>

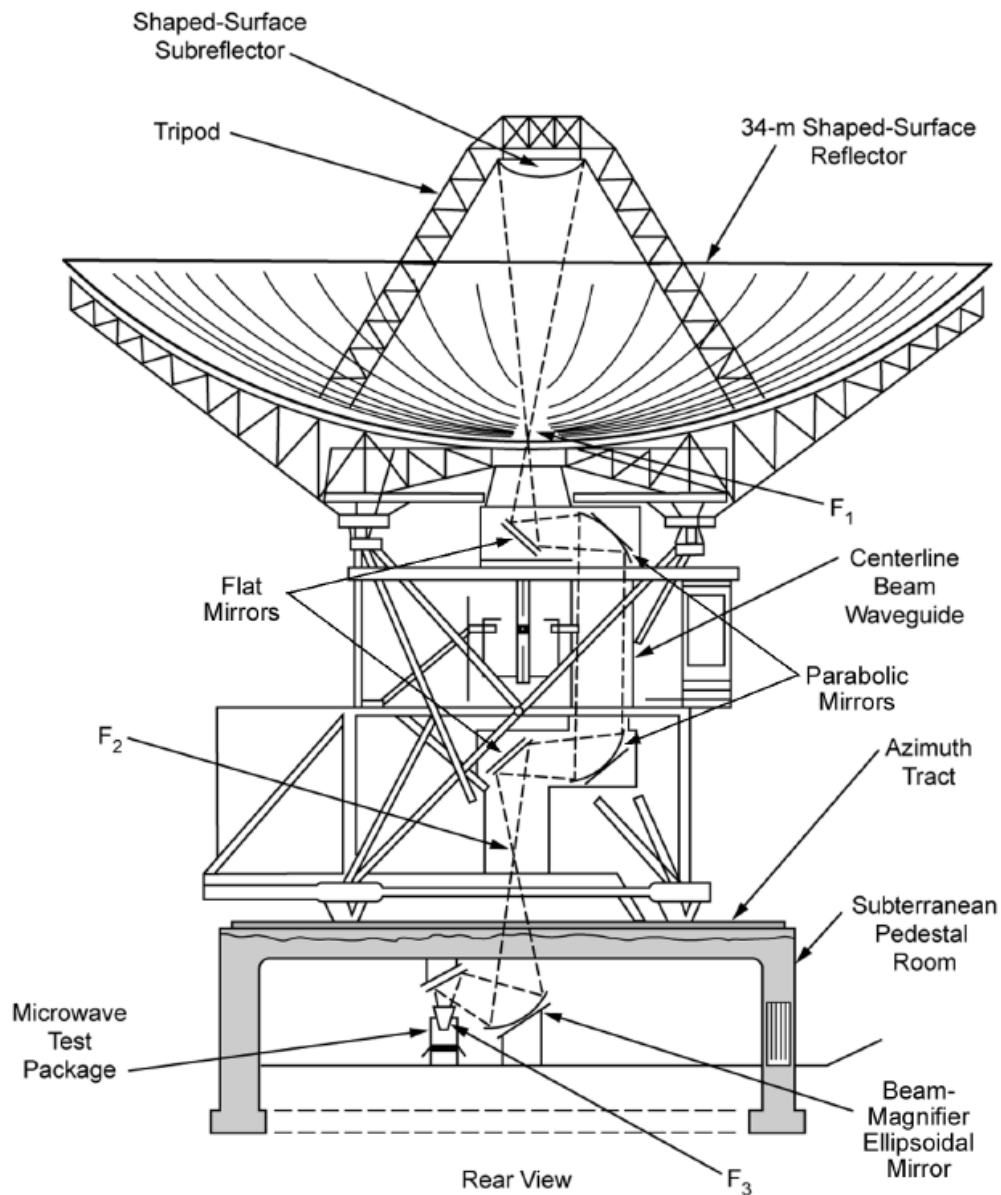
Komunikace probíhá většinou v pásmech L, S, X a v poslední době i v pásmu Ka

Typické parametry DSS [3]

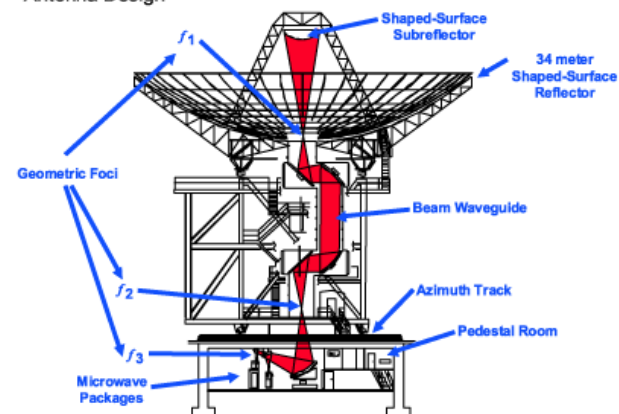
DSS	Band	AntGain [dBi]	HPBW [deg]	Power [kW]	EiRP [dBm]	NoiseTemp [K]	FreqUpl [MHz]	FreqDwl [MHz]
34 m BWG	S Band	56,3/56,8	0,263	20	128,7	26,1	2110-2118	2200-2300
	X Band	67,1/68,2	0,077	20	139,6	20,2	7149-7188	8400-8500
	Ka Band	79,5/78,9	0,016	0.8	138,2	27,9	34315- 34415	31800- 32300
70 m	S Band	63,0/63,6	0,128	20/400	135,6/148,7	10,5	2110-2118	2200-2300
	X Band	73,2/74,6	0,038	20	145,8	20,2	7149-7188	8400-8500

DSS - BWG (Beam Waveguide)
- HEF (High Efficiency)

BWG DSS

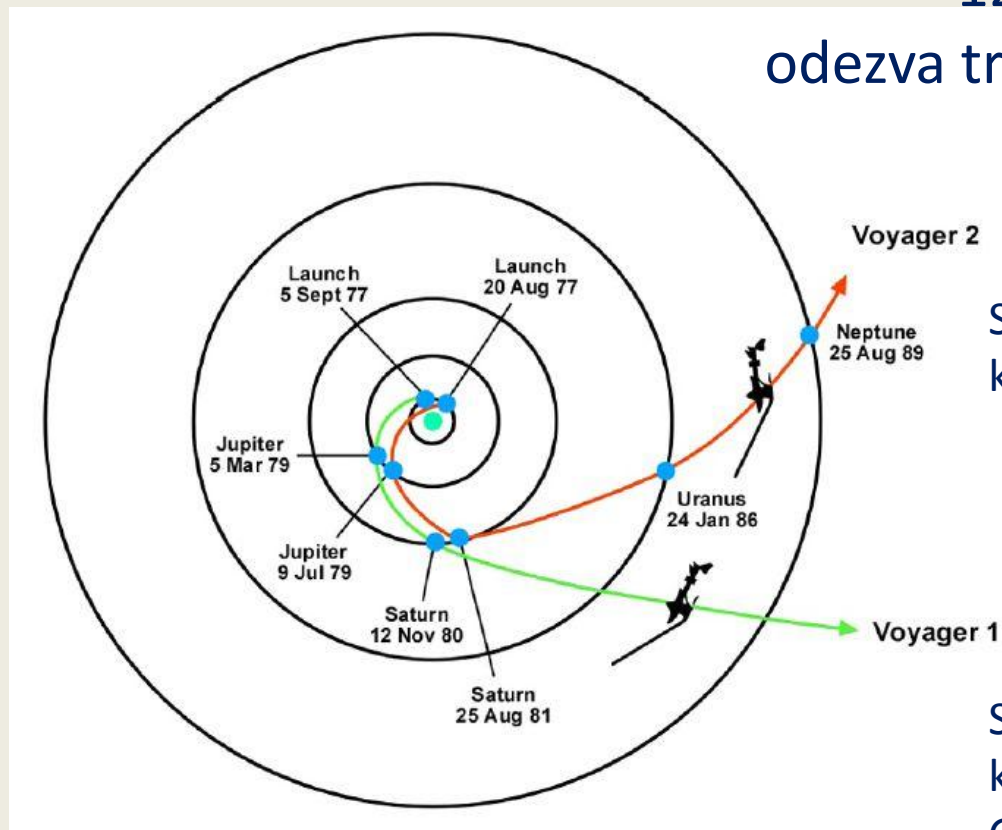


Beam Waveguide Antenna Design



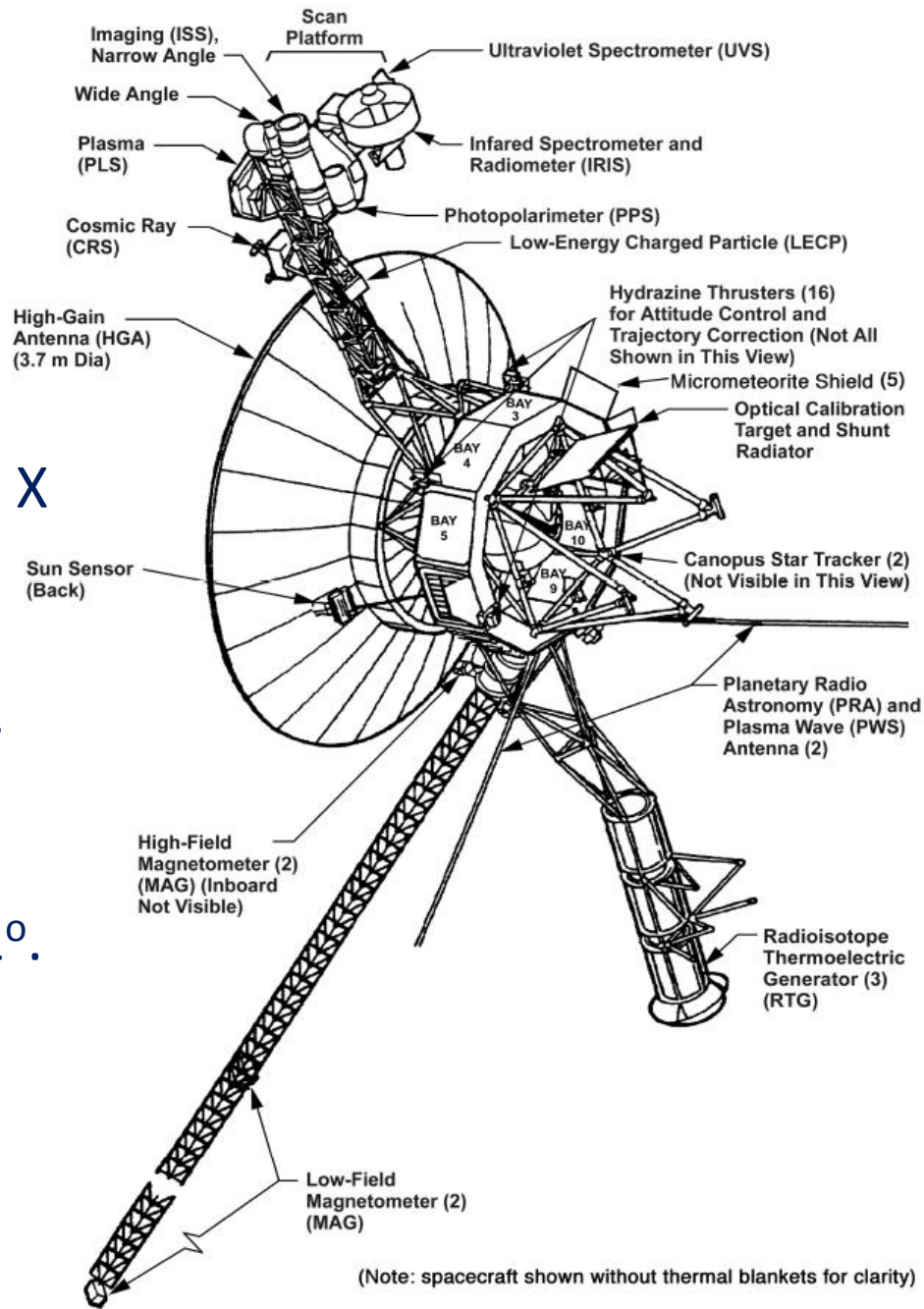
Voyager I a II

V současnosti je vzdálen
více než 18 miliard km, tj.
120 AU
odezva trvá 33,36 hodiny



S Voyagerem II
komunikuje Canberra

S Voyagerem I
komunikuje Madrid a
Goldstone



HGA má v pásmu X
 zisk 48 dBi a
 tomu odpovídá
 šířka svazku $0,7^\circ$.
 Orientace sondy
 proto musí být
 přesná v řádu $0,1^\circ$.

Stanice DSS komunikují s kosmickými objekty ve třech základních módech:

- Radiometrická data – Doppler a Ranging
- Povelování s/c – stream, file, command delivery
- Demodulace a dekódování telemetrie

Komunikační systémy

Uplink v pásmu S – nosná (2,1 GHz) může být nemodulovaná, modulovaná povelům nebo sekvencí pro ranging, případně současně. **Přijímač transpondéru** má má smyčku PLL, jehož zavěšené VCO tvoří referenci pro downlink, jenž je pak koherentní s uplinkem.

Modulace pro ranging – standardní DSN sekvence – transpondér v koherentním módu s poměrem frekvencí 240/221 (S) resp. 840/221 (X)

Povely – jsou modulovány na subnosnou uplinku 512 Hz modulací BPSK 16 bps a kódováním Manchester.

Telemetrie – dva nezávislé kanály
- pomalorychlostní je nekódovaný NRZ BPSK 40 bps.

- vysokorychlostní telemetrie má modulační rychlosti od 10 bps do 115,2 kbps a je modulován kódovanými symboly s pevnou délkou ($k = 7$, $r = 1/2$). Každý modulátor může modulovat subnosnou 22,5 kHz nebo 360 kHz.

Downlink v pásmu X – (8,4 GHz) obě sondy mají dva vysílače s TWT, z nichž jedna generuje RHCP a druhá LHCP vlnu.

Antény s/c

- **high gain** - 3,7 m parabolické zrcadlo se soustavou ozařovačů.
v pásmu S je zisk 36 dBi a v pásmu X 48 dBi, alternativně pro RHCP a LHCP.
- **low gain** – pouze v pásmu S - 7 dBi (použita jen po startu)

Aktuální energetická bilance

S band uplink

$$\begin{aligned} \text{Tx Power } 20 \text{ kW} &= 43 \text{ dBW}, & G_{T34} &= 56,3 \text{ dBi}, & \text{EiRP} &= 99,3 \text{ dBiW} \\ & & G_{T70} &= 63,0 \text{ dBi}, & \text{EiRP} &= 106 \text{ dBiW} \end{aligned}$$

$$G_R = 36 \text{ dBi}, \quad T_s = 40 \text{ K} = 16 \text{ dB(K)} \quad G/T = 36 - 16 = 20 \text{ dBi/K}$$

$$f_s = 600 \text{ bps} = 27,8 \text{ dB (s)}$$

$$E_b/N_0 = \text{Eirp} - L_0 + G/T + 228,6 - f_s \quad L_0 = 304,2 \text{ dB}$$

$$= 99,3 - 304,2 + 20 + 228,6 - 27,8 = 15,9 \text{ dB} \quad (34\text{m})$$

$$= 106 - 304,2 + 20 + 228,6 - 27,8 = 22,6 \text{ dB} \quad (70\text{m})$$

X band downlink

Tx Power 18 W = 12,5 dBW, $G_T = 48,0$ dBi, EIRP = 60,5 dBiW
(high power)

$$G_{R34} = 68,2 \text{ dBi}, T_s = 20,2 \text{ K} = 13,0 \text{ dB(K)}$$
$$G/T = 68,2 - 13,0 = 55,2 \text{ dBi/K}$$

$$G_{R70} = 74,6 \text{ dBi}, T_s = 20,2 \text{ K} = 13,0 \text{ dB(K)}$$
$$G/T = 74,6 - 13,0 = 61,6 \text{ dBi/K}$$

$$f_s = 600 \text{ bps} = 27,8 \text{ dB (s)}$$

$$L_0 = 315,7 \text{ dB}$$

$$E_b/N_0 = E_{\text{irp}} - L_0 + G/T + 228,6 - f_s$$
$$= 60,5 - 315,7 + 55,2 + 228,6 - 27,8 = 0,8 \text{ dB} \quad (34\text{m})$$
$$= 60,5 - 315,7 + 61,6 + 228,6 - 27,8 = 7,2 \text{ dB} \quad (70\text{m})$$

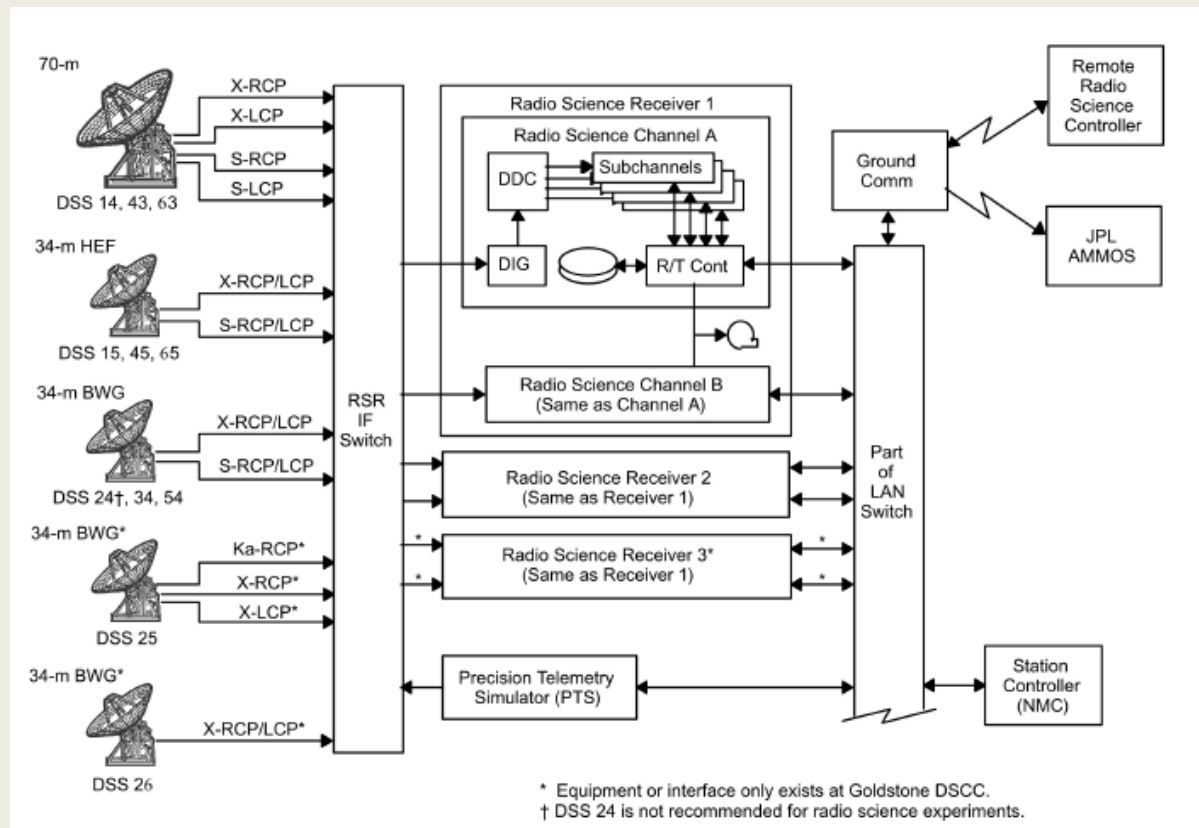
Odhad životnosti a komunikačních parametrů v průběhu let

	Voyager 1	Voyager 2
Electrical power	2023	2023
Telemetry link capability		
7200 bps, 70-/34-m HEF ^a array	1994	1998
1400 bps, 70-m antenna	2007	2011
600 bps, 70-m antenna	2026	2030
600 bps, 34-m HEF antenna	2003	2007
160 bps, 34-m HEF antenna	2024	2029
40 bps, 34-m HEF antenna	2050	2057
Hydrazine for attitude control	2040	2048

V současnosti se řeší důležitý problém. Jak sondy stárnou, ochabují také jejich energetické zdroje. Každá sonda má tři radioizotopové termoelektrické generátory RTG. Samozřejmě nejdůležitější jsou komunikační systémy a polohová stabilizace sond, aby úzce směrová anténa mířila k Zemi. A tak se rozhodovalo který přístroj, resp. jeho ohřev vypnout a část energie tak ušetřit. U Voyagera II byl tedy vypnut ohřev CRS (Cosmic Ray Subsystem). Zatím stále pracuje i když jeho teplota poklesla již na -59°C .

Cassini – Huygens

Start 1997 – výzkum **Saturnu** a modul **Huygens** měkce přistál na měsíci **Titanu** s hustou uhlovodíkovou atmosférou, - cesta trvala 7 let s využitím gravitace Venuše (2x), Země a Jupitera v prvních třech letech.



Uplink i Downlink DSN se sondou **Cassini** pracoval v pásmu **X**
(povelování, radiometrie, telemetrie)

Modul **Huygens** komunikoval s **Cassini** v pásmu **S**

Během letu k Saturnu byla objevena fatální chyba komunikačního systému Huygens, jenž nedovoloval kompenzovat Dopplerův posuv, tak aby byla zajištěna synchronizace pro demodulaci dat.

Tím byla ohrožena nejzajímavější část velmi drahé mise.

Řešení se po mnoha měsících našlo: spočívalo ve změně dráhy s/c Cassini tak, aby při sestupu a po přistání Huygens byl relativní pohyb obou těles minimální.

Cenou za tuto změnu bylo vynechání nízkého průletu nad Titanem (1200 km).

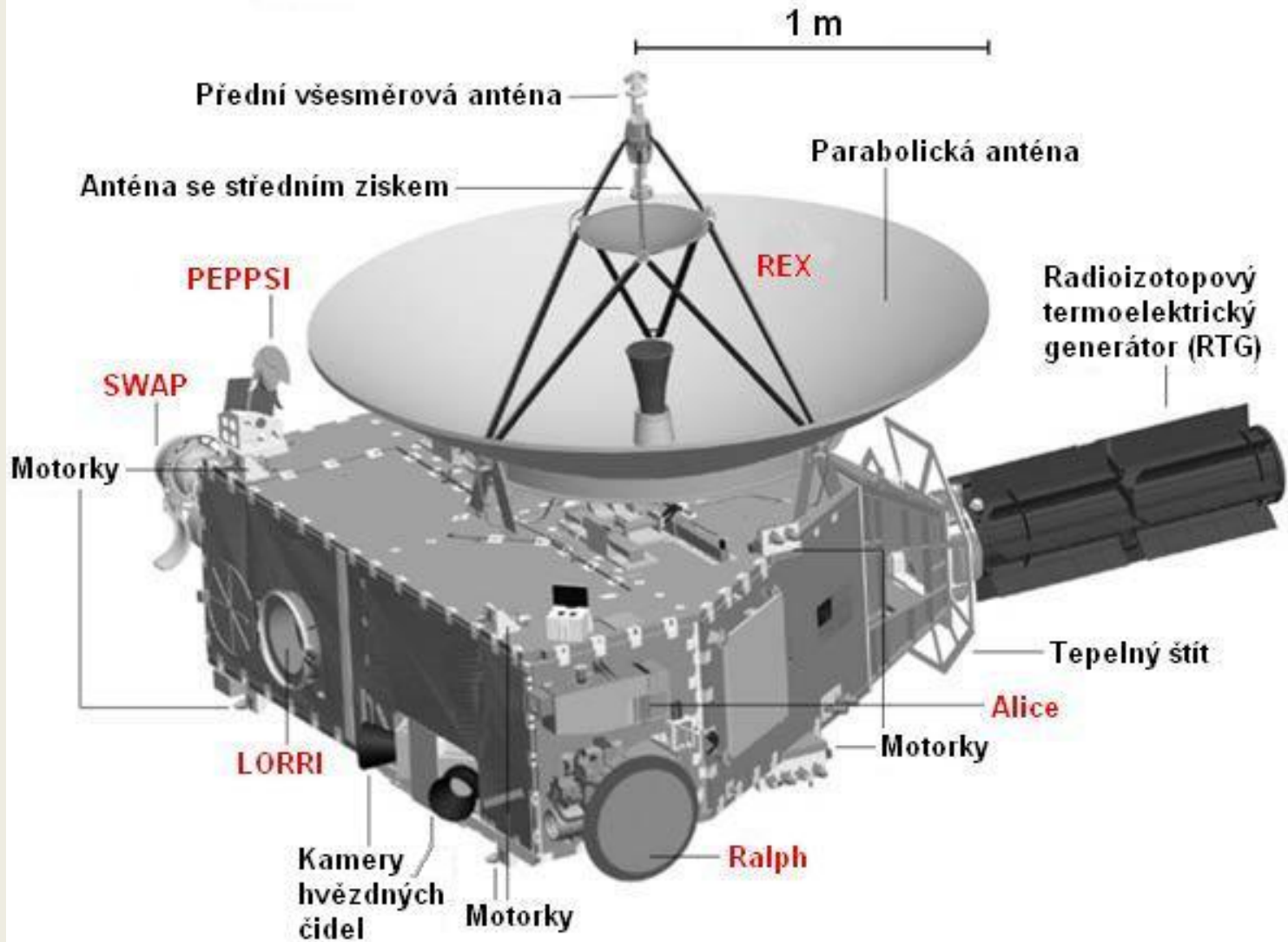
New Horizons - 2006

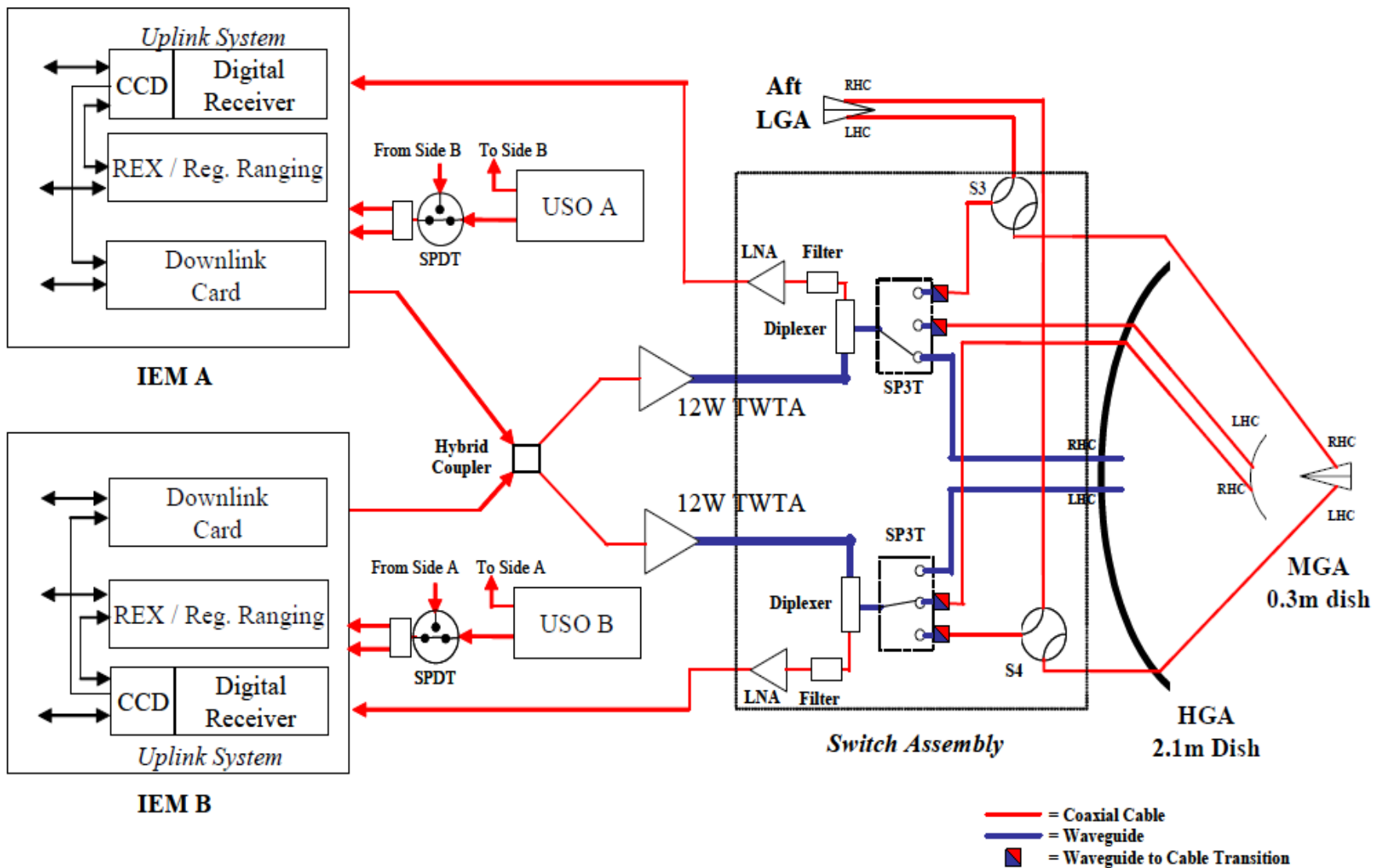
Po gravitačním urychlení Jupiterem prolétl NH kolem Pluta a jeho největšího měsíce Charonu. V lednu 2019 potom kolem MU69 Ultima Thule v Kuiperově pásnu na samém okraji sluneční soustavy. Vzdálenost sondy je dnes až 44 AU a je to tedy další nejvíce vzdálená sonda s kterou komunikuje DSN. Signál se vrátí na Zemi za více než 12 hodin.

Sonda je poněkud odlišné koncepce – navrhla a realizovala ji Laboratoř aplikované fyziky Hopkinsonovy Univerzity v Baltimore.

Zvláštností je anténa se středním ziskem MGA (slouží především pro povelování) a dále regenerativní ranging. Minimální přenosová rychlost je 600 bps. Komunikace probíhá v obou směrech v pásnu X

- uplink 7,2 GHz,
- downlink 8,4 GHz.





3. 8. 2019

RANGE

6.59 billion km

ROUND-TRIP LIGHT TIME

12.22 hours

= 44 AU

POWER RECEIVED

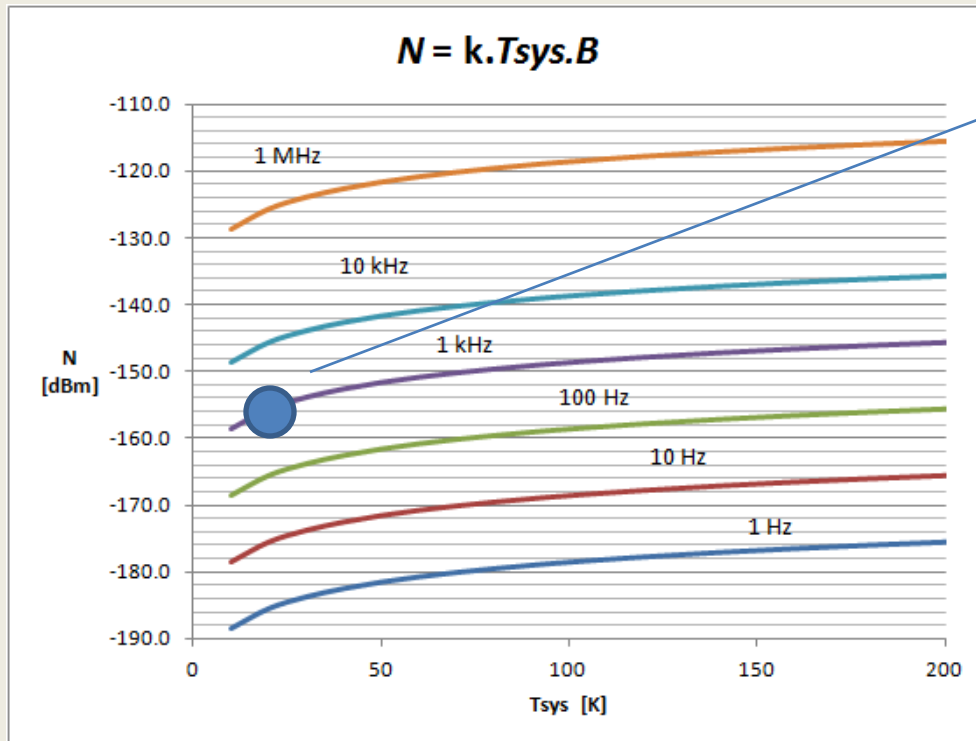
-156.76 dBm

(2.11×10^{-22} kW)

DSS 43

(70 m)

$T_{\text{sys}} \approx 20$ K



Úroveň šumu -156 dBm odpovídá šířce pásma 1 kHz při $T_{\text{sys}} = 20$ K. Z toho vyplývá, že se blížíme minimální přenosové rychlosti 600 bps.

MARS

Ve srovnání s předchozími je komunikace s „Marsem“ na velmi malou vzdálenost – 250 mil. km,

- odezva signálu je kolem 28 minut,
- objemy přenášených dat jsou mnohonásobně větší.

- **Mars Odyssey**

- **Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)**

jsou radiová relé pro **Curiosity** a **InSight**

MRO má 3 m zrcadlo a v pásmu X umožňuje přenos až 6 Mbps v reálném čase i z paměti (store&forward).

Sondy na povrchu Marsu s nimi komunikují v pásmu UHF. Pomalou rychlostí (povelování) mohou komunikovat v pásmu X přímo se Zemí.

Sondy v libračních bodech

5 Lagrangeových bodů soustavy Slunce – Země

- L1** – leží na spojnici Země – Slunce asi 1,5 mil. km od Země. Sondy pro výzkum Slunce, např. SOHO (1995 -). Při komunikaci je problémem samo Slunce jako zdroj šumu. Volí se proto výstřední eliptická orbita v kolmé rovině.
- L2** – je ve stejné vzdálenosti na opačné straně Země. Využívá se naopak pro sondy které mají být od působení Slunce odstíněny – výzkum vzdáleného vesmíru.

Závěr

Pokusili jsme se velmi stručně popsat systémy rádiové komunikace sítě DSN s těmi nejvzdálenějšími a také nejzajímavějšími objekty ve vesmíru právě z pohledu rádiového spojení s nimi. Vzhledem k rozsahu textu jsme ale celou řadu zajímavých projektů museli vynechat:

- GALILEO
- Rosetta&Philae
- JUNO
- a další
- MARINER
- STEREO

Reference

- [1] <https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_Deep_Space_Network
- [3] <https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/>
- [4] https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso4--Voyager_new.pdf
- [5] <http://sci.esa.int/cassini-huygens/27650-esa-and-nasa-agree-a-new-mission-scenario-for-cassini-huygens/>
- [6] Ch. C. DeBoy, Ch. B. Haskins, T. A. Brown, R. C. Schulze, M. A. Bernacik, J. R. Jensen, W. Millard, D. Duven, S. Hill: The RF Telecommunications System for the New Horizons Mission to Pluto. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720)
- [7] <https://mars.nasa.gov/mro/mission/overview/>
- [8] https://www.nasa.gov/mission_pages/soho/index.html
- [9] <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nasa-establishes-contact-with-stereo-mission>

Děkuji Vám za pozornost