

Rádiová komunikace s kosmickými sondami

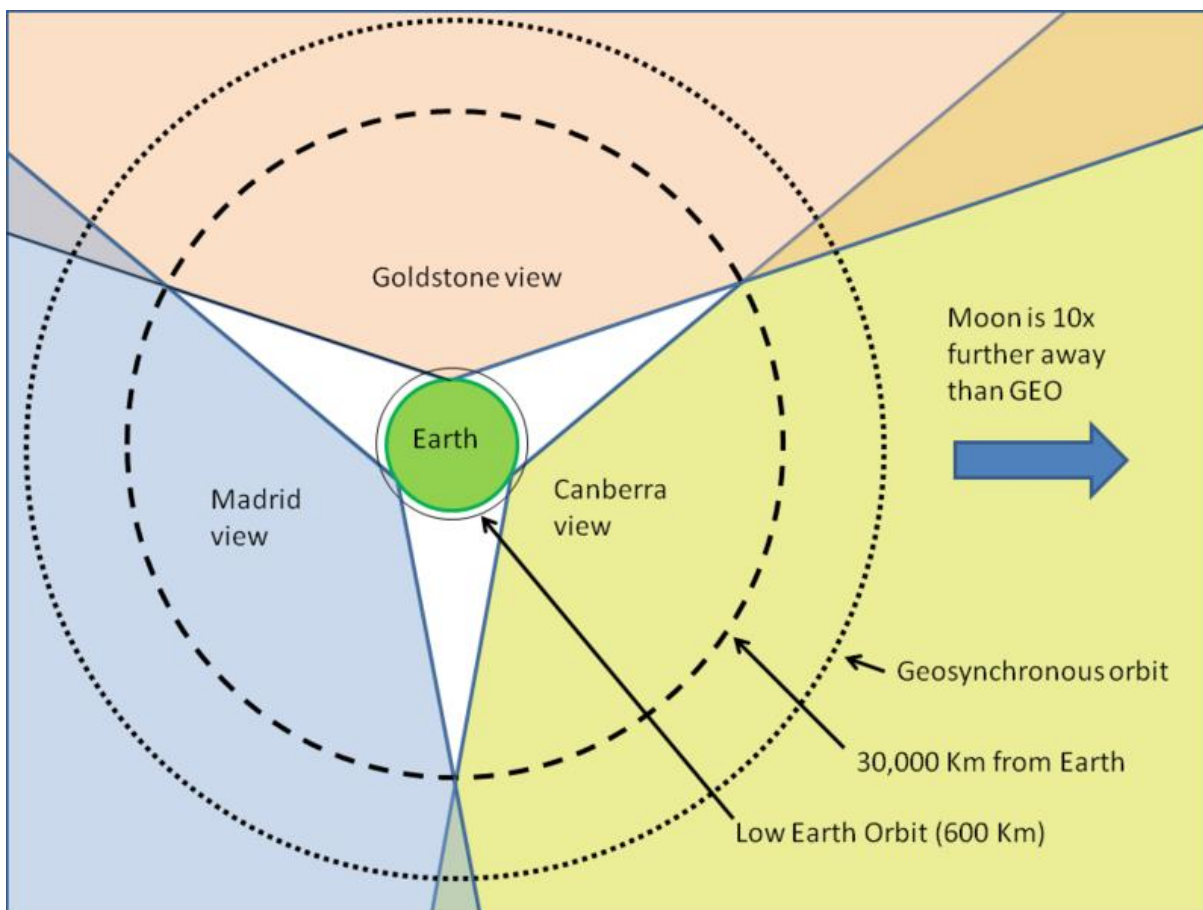
Miroslav Kasal

Abstrakt: 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 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.

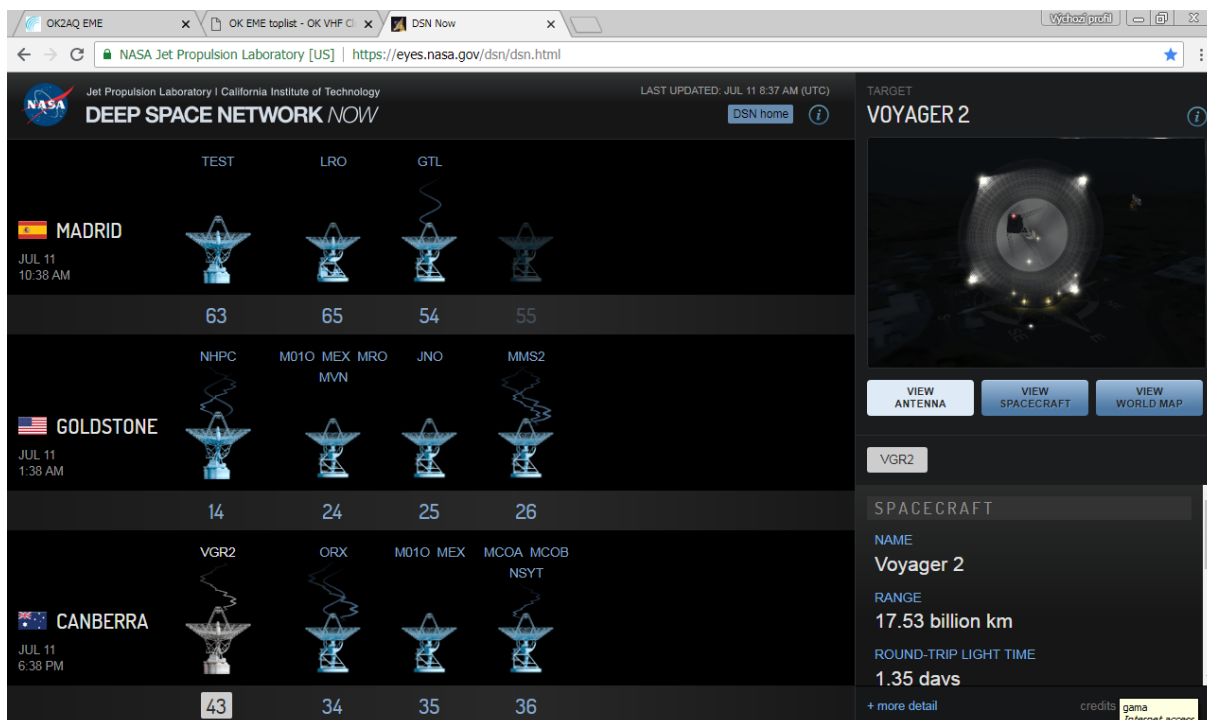
1. Pozemní segment sítě pro spojení se vzdáleným vesmírem

Pozemní segment sítě pro spojení se vzdáleným vesmírem (Deep Space Network – DSN) tvoří tři podobně vybavená pracoviště DSCC (Deep Space Communication Complex) v Goldstone (USA) s DSS14, 24, 25, 26, u Madridu DSS63, 65, 54, 55, a u Canberru v Austrálii DSS43, 34, 35, a 36. Jejich rozmístění je dáno požadavky na pokrytí „všech“ směrů, obr. 1. [2] a samozřejmě požadavky na nerušený příjem extrémně slabých signálů přicházejících z kosmu. Každé ze tří pracovišť má čtyři „Deep Space Station“ – DSS lišící se číslem a vlastní anténou. První je s průměrem apertury 70 m a další tři až pět s aperturou 34 m (které postupně nahrazují antény s průměrem 26 m).

Řízení sítě přísluší Jet Propulsion Laboratory (JPL) v Pasadeně. Touto Laboratoří je také realizována většina projektů sond k vzdáleným objektům ve vesmíru. Na webové stránce [1] můžete vidět aktuální stav která DSS právě komunikuje a také s kterým vesmírným objektem, obr.2.



Obr. 1. Pokrytí kosmického prostoru stanicemi DSN [2].



Obr. 2. Aktivita sítě DSN [1].

Komunikace probíhá většinou v pásmech L, S, X a v posledních letech i v Ka pásmu.

DSS14, DSS63 a DSS43 – 70 m mají pro uplink vysílače 20 kW pro pásma S a X. Jenom DSS43 má pro pásmo S ještě 400 kW vysílač. Pásma S/X jsou oddělena dichroickým zrcadlem a diplexery. Pro uplink i downlink se používají kruhové polarizace RHCP a LHCP. Přijímače jsou vybaveny kvalitními nízkošumovými zesilovači LNA. Do roku 2010 byly používány LNA s masery, které jsou nyní nahrazeny zesilovači s HEMTy, pro vyšší pásma X, Ku a Ka chlazené v kryostatech.

DSS s anténami 34 m jsou dvojího typu-BWG (beam waveguide) a HEF (high efficiency). Vývojově poslední jsou právě BWG – DSS35. DSS jsou koncipovány velmi flexibilně, tak aby bylo možné pro každou aplikaci zvolit optimální konfiguraci. Např., pracuje-li DSS momentálně na jednom pásmu, lze vyřadit diplexer pro dosažení nižší šumové teploty. Kromě DSN slouží DSS ve volném čase také pro radioastronomické účely a naopak do sítě DSN mohou být účelově zahrnuty i jiné radioteleskopy, je-li to potřeba.

Stanice DSS komunikují s kosmickými objekty ve třech základních módech:

1. Radiometrická data – Doppler a Ranging
2. Povelování s/c – stream, file, command delivery
3. Demodulace a dekodování telemetrie

Tab. 1. Typické parametry DSS [3]

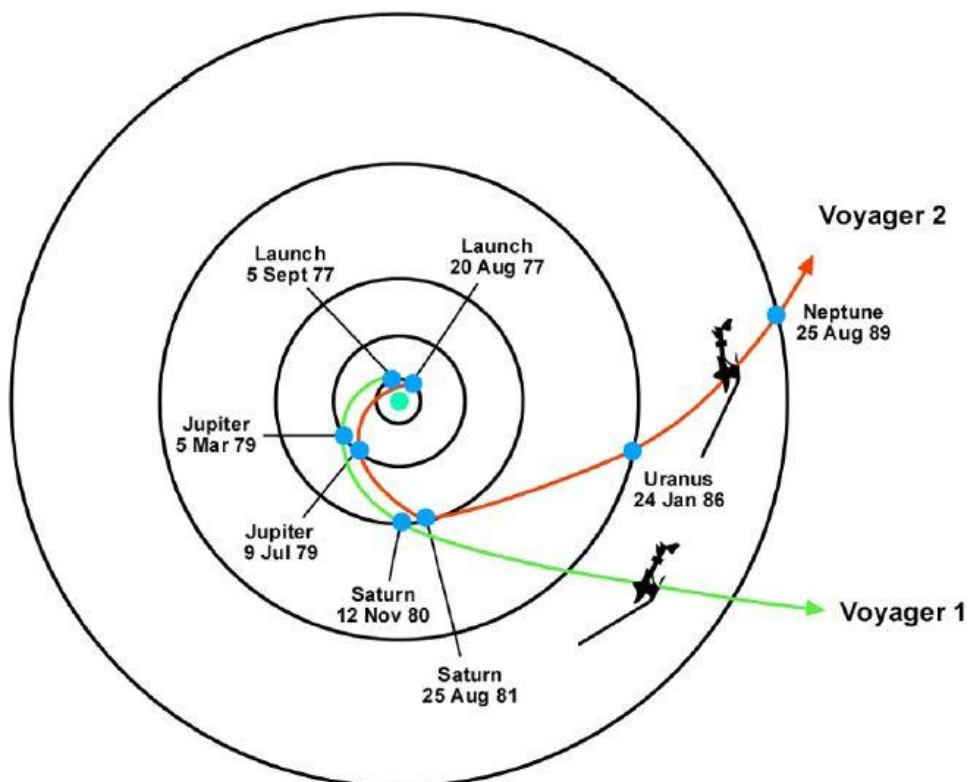
DSS	Band	AntGain [dBi]	HPBW [deg]	Power [kW]	EiRP [dBm]	NoiseTemp [K]	FreqUpl [MHz]	FreqDwl [MHz]
34 m BWG	S Band	56,3/56,8	0,263	20	128,7	26,1	2110-2118	2200-2300
	X Band	67,1/68,2	0,077	20	139,6	20,2	7149-7188	8400-8500
	Ka Band	79,5/78,9	0,016	0.8	138,2	27,9	34315-34415	31800-32300
70 m	S Band	63,0/63,6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

2. Meziplanetární sondy

2.1 Voyager – mezihvězdná mise

Počátkem sedmdesátých let se přišlo na to, že v roce 1977 nastane situace v postavení vnějších planet sluneční soustavy, které umožní jednou sondou obletět Jupiter, Saturn, Uran a Neptun. Podobná situace nastane za 176 let. Během tří let byly proto na platformě sond Mariner připraveny ke startu sondy Voyager I a Voyager II, obr. 4. A tak pět let po startu sond Pioneer 10 a 11 odstartovaly 20. srpna 1977 nejprve Voyager II a o šesnáct dní později Voyager I, obr. 3. Je to bezesporu jedna z nejprovedenějších kosmických misí s přesahem do současnosti a snad ještě do dalšího desetiletí. Vzhledem k tomu, že obě sondy již opustili sluneční soustavu, jsou také velmi zajímavé z hlediska rádiové komunikace [4].

V době psaní tohoto příspěvku byl Voyager II vzdálen od Země více než 18 miliard kilometrů (120 AU), což představuje v pásmu S útlum 304,0 dB a pásmu X 316,1 dB. Doba odezvy sondy je 1,39 dne (33,36 hod.). S Voyagerem II komunikuje nyní pouze DSS v Canbeře, neboť není ze severní polokoule viditelný. Naopak Voyager I byl posledním manévrem nasměrován nad ekliptiku a komunikují s ním DSS v Madridu a Goldstone.



Obr. 3. Trajektorie sond Voyager v meziplanetárním prostoru [4].

Některá zařízení jako nízko-zisková anténa a S band downlink byly použity jen na počátku mise. Frekvence pro S band uplink jsou 2114,676697 MHz (Voyager I), respektive 2113,312500 MHz (Voyager II). Nosná může být nemodulovaná, modulovaná povelom nebo sekvencí pro ranging nebo oběma současně. Přijímač komunikačního transpondéru má fázový závěs, jehož zalokované VCO tvoří referenci pro downlink, který je

pak koherentní s uplinkem. Pokud není VCO zalokované je nosná pro downlink odvozena od USO (ultra stabilní oscilátor $1 \cdot 10^{-12}$), který je navíc zálohován.

Modulace pro ranging – standardní DSN sekvence pro ranging je demodulována a zpětně namodulována na nosnou downlinku v pásmu S nebo X nebo na obě. Transponder musí být v koherentním módu.

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

Telemetrie – má dva nezávislé kanály – pomalorychlostní je modulován nekódovaně NRZ BPSK 40 bps. Vysokorychlostní kanál má modulační rychlosti od 10 bps do 115,2 kbps a je modulován kódovanými symboly s pevnou délkou ($k = 7, r = 1/2$). Každý BPSK modulátor může modulovat subnosnou 22,5 kHz nebo 360 kHz (tu lze použít pro rychlosti větší než 7,2 kbps).

Nosné downlinku – pokud transponder pracuje v dvoucestném koherentním módu jsou poměry frekvencí downlink/uplink 240/221 v pásmu S a 840/221 v pásmu X. V pásmu X jsou potom frekvence downlinku Voyager I 8420,432097 MHz a Voyager II 8415,000000 MHz. V nekoherentním módu se obě frekvence prohodí. Pro pásmo X mají obě sondy dva vysílače s TWT z nichž jedna generuje RHCP a druhá LHCP vlnu.

Antény – high gain sestává z osově symetrického parabolického zrcadla o průměru 3,7 m a soustavy ozařovačů. V pásmu S je zisk 36 dBi RHCP a v pásmu X 48 dBi alternativně pro RHCP a LHCP. **Low gain** anténa je instalována pouze pro pásmo S a její zisk je 7 dBi. Byla použita hned po startu než se sonda prostorově zorientovala. Po roce 1980, vzhledem k vzdálenosti sond, již nedostačuje.

Jak se vyvíjejí komunikační parametry systému Voyager je patrné z tab. 2.

Tab. 2. Odhad životnosti a komunikačních parametrů v průběhu let [4]

	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

Aktuální energetická bilance

– S band uplink

Tx Power 20 kW = 43 dBW, $G_{T34} = 56,3$ dBi, EirP = 99,3 dBiW

$G_{T70} = 63,0$ dBi, EirP = 106,0 dBiW

$G_R = 36$ dBi, $T_s = 40$ K = 16 dB (K) $G/T = 36 - 16 = 20$ dBi/K

$f_s = 600$ bps = 27,8 dB (s)

$E_b/N_0 = Eirp - L_0 + G/T + 228,6 - f_s$

= 99,3 - 304,2 + 20 + 228,6 - 27,8 = 15,9 dB (34m)

= 106,0 - 304,2 + 20 + 228,6 - 27,8 = 22,6 dB (70m)

- X band downlink

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

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

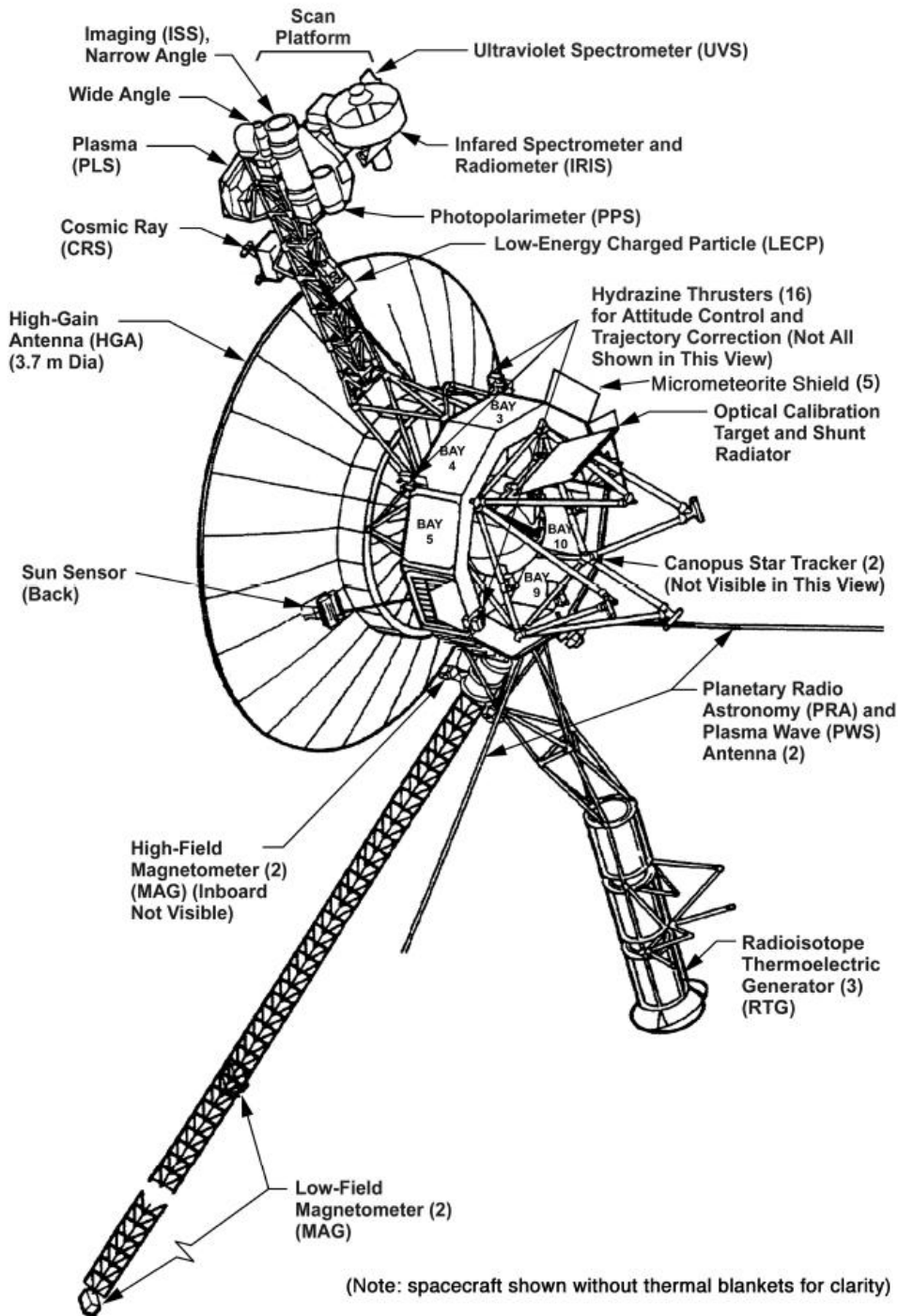
$G_{R70} = 74,6$ dBi, $T_s = 20,2$ K = 13,0 dB (K) $G/T = 74,6 - 13,0 = 61,6$ dBi/K

$f_s = 600$ bps = 27,8 dB (s)

$$E_b/N_0 = E_{irp} - L_0 + G/T + 228,6 - f_s$$

$$= 60,5 - 315,7 + 55,2 + 228,6 - 27,8 = 0,8 \text{ dB} \quad (34\text{m})$$

$$= 60,5 - 315,7 + 61,6 + 228,6 - 27,8 = 7,2 \text{ dB} \quad (70\text{m})$$

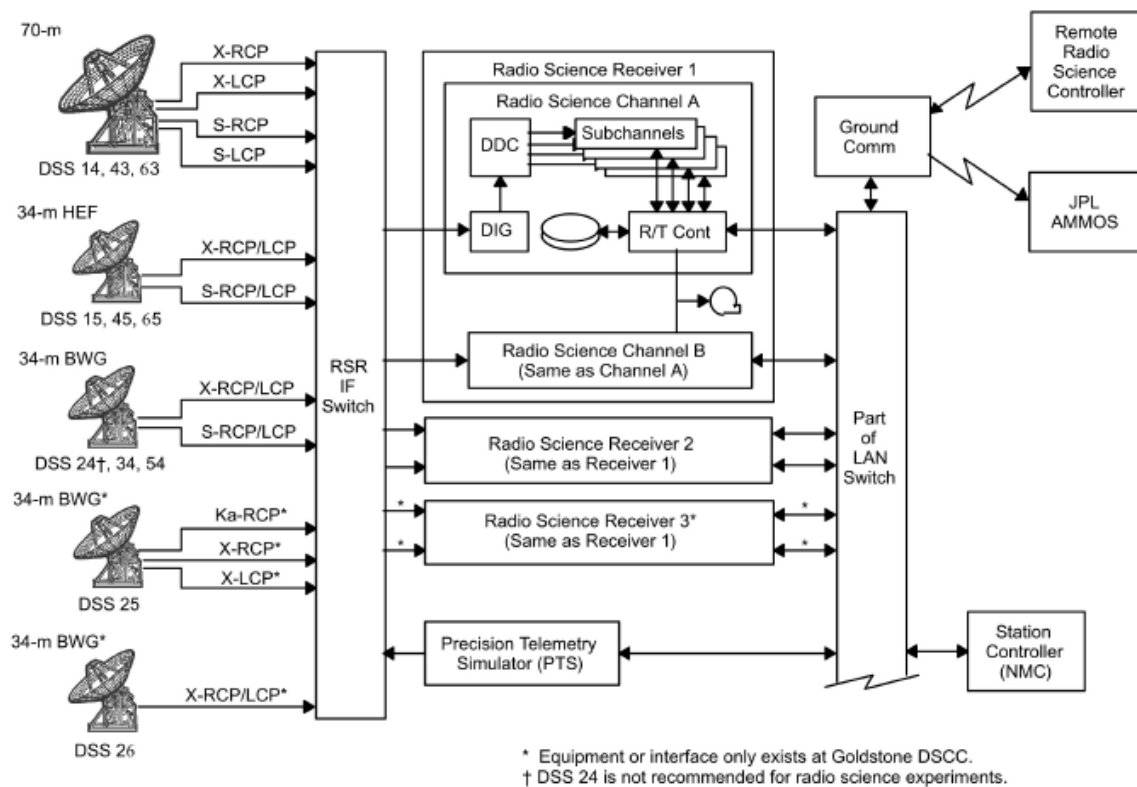


Obr. 4. Sonda Voyager [4].

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 směřová 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 .

2.2 Cassini – Huygens

V roce 1997 byla vypuštěna sonda Cassini pro podrobný výzkum Saturnu. Cesta k Saturnu jí trvala 7 let s využitím gravitace Venuše (2x) Země a Jupitera v prvních třech letech. Sonda nesla modul Huygens, jenž měkce přistál na měsíci Titan s hustou uhlovodíkovou atmosférou [5]. Nakonec byla mise velmi úspěšná a podstatně rozšířila naše znalosti o této části vesmíru. Vlastní průběh mise byl však velmi dramatický. Uplink a downlink sondy Cassini se stanicemi sítě DSN pracoval v pásmu X a oba linky zajišťovaly všechny tři základní funkce (povelování, telemetrie a radiometrii). Kromě toho bylo úkolem sondy, přenášet na Zemi data z modulu Huygens vysílaná v pásmu S. V průběhu letu k planetě se však přišlo na to, že v návrhu modulu Huygens je fatální chyba. Radioelektronický systém v pásmu S sestupového modulu nedovoloval kompenzovat Dopplerův posuv tak, aby bylo možné zajistit synchronizaci pro demodulaci dat, které modul při sestupu atmosférou a po měkkém přistání na povrchu Titanu měl vysílat. Není třeba zdůrazňovat, že nejzajímavější část mise byla vážně ohrožena. Po několika měsících úpěnlivých snah najít nějaké řešení, bylo oznámeno, že se našlo. Dráha sondy Cassini byla změněna tak, aby v době sestupu sondy a její aktivní činnosti na povrchu Titanu byl relativní pohyb mezi sondou a modulem Huygens minimální a tím i Dopplerův posuv. Cenou za tuto změnu bylo vynechání velmi nízkého průletu nad Titanem (1200 km), neboť nová orbita byla ve výšce 60 000 km.

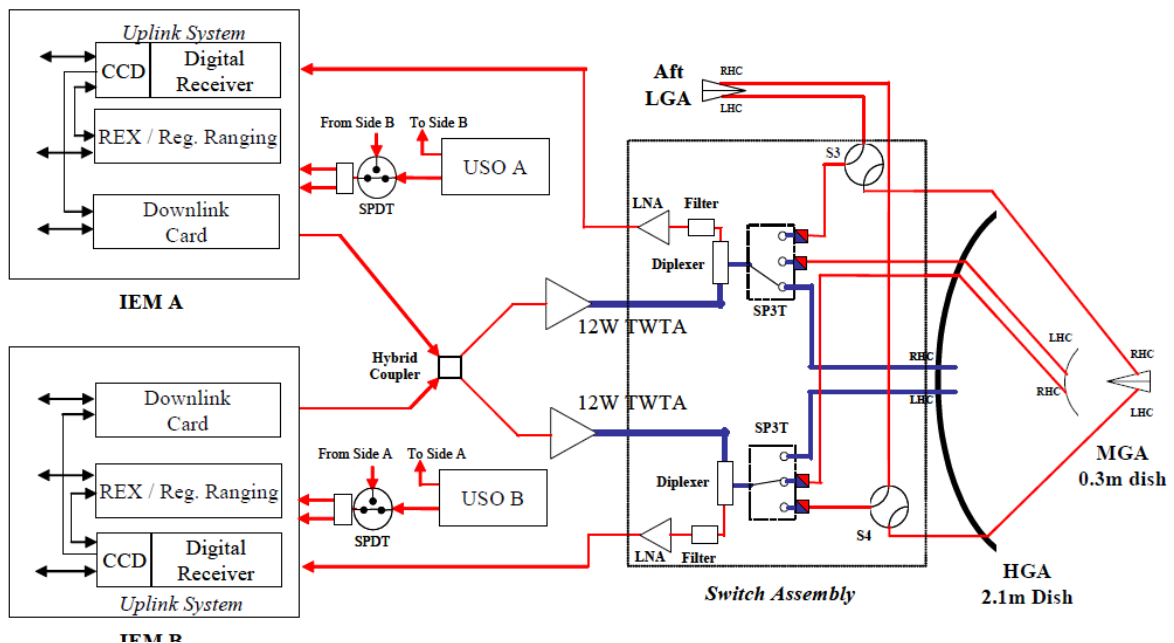


Obr. 5. Konfigurace stanic sítě DSN [5].

Typická konfigurace stanic DSN je na obr. 5. Zatímco při pohybu po „vnitřní“ dráze používala sonda Cassini antény LGA, při pohybu po vnější dráze potom HGA s nutným zajištěním přesné orientace. V tomto případě byla standardně použita rychlost 500 bps s modulačním zdvihem 1,3 rad a 3 dB potlačenou nosnou. Downlink pro přenos telemetrie měl rychlost 14 220 bps s modulačním zdvihem 80° pro ranging 0,27 rad. Prahové hodnoty E_b/N_0 popř. P_r/N_0 byly stejné pro obě antény. Pro nekódovaný povelovací kanál s BER 10^{-5} je to +9,6 dB a pro telemetrický kanál s konvolučním kódováním a BER $5 \cdot 10^{-3}$ pouze +0,31 dB.

2.3 New Horizons

V současnosti je další nejvíce vzdálenou kosmickou sondou New Horizons, která byla po gravitačním urychlení Jupiterem poslána k Plutu a jeho největšímu měsíci Charonu [6]. Po té, a to se připravuje právě nyní, by měla proletět v lednu 2019 v blízkosti dalšího objektu v Kuiperově pásu planetek na samém okraji sluneční soustavy – 2014 MU69 Ultima Thule. Vzdálenost sondy při této komunikaci je 32 až 40 AU a signál se při ní vrátí asi za 8 až 10 hodin. Pozemní segment zajišťuje síť DSN. Samotná sonda je však poněkud odlišné koncepce, protože ji navrhla a realizovala Laboratoř Aplikované Fyziky Hopkinsovy Univerzity v Baltimore MD. Blokové schéma je na obr. 6. Zvláštností je anténa se středním ziskem MGA sloužící především pro povelování a dále regenerativní ranging, který byl použit poprvé. Minimální přenosová rychlost je 600 bps. Komunikace probíhá v pásmu X na frekvenci uplinku 7182 MHz a downlinku 8438 MHz.



Obr. 6. Blokové schéma sondy New Horizons [6].

Parametry komunikace v srpnu 2019 jsou patry z následujícího obrázku 7. Z aktivity sítě DSN jsme zjistili, že sonda New Horizons byla přijímána v Canbeře anténou 43 ze vzdálenosti téměř 44 AU. Zpoždění odezvy signálu bylo 12,22 hod. a jeho úroveň (nosné)

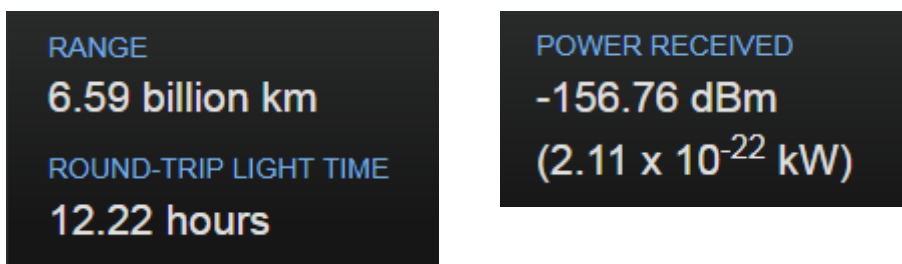
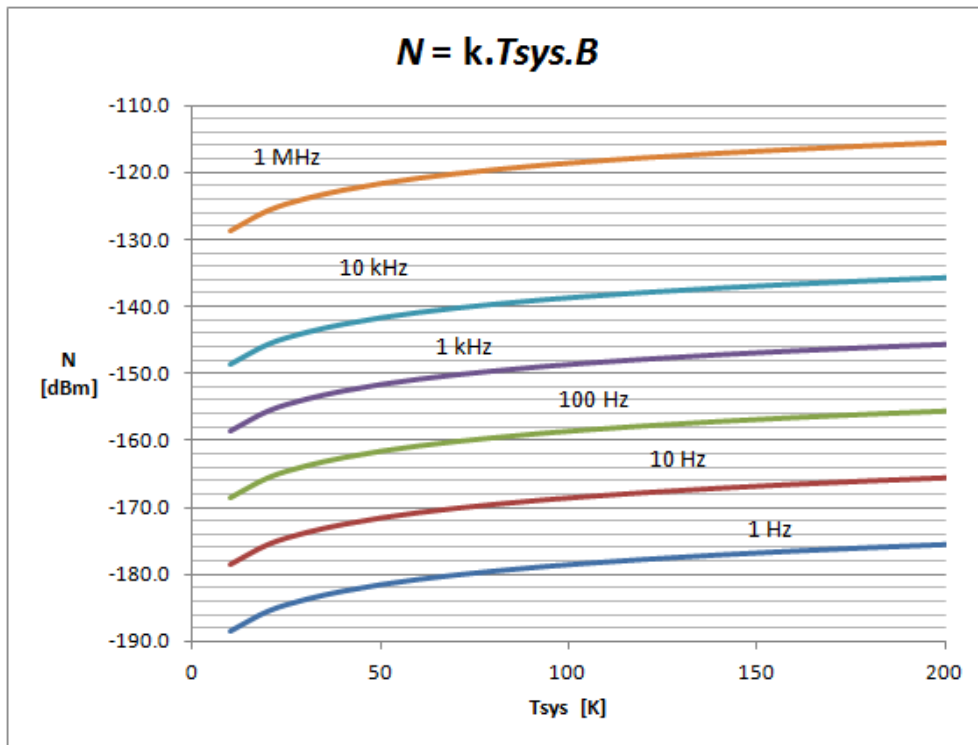


Figure 7. Vzdálenost a úroveň přijímaného signálu New Horizons 3. 8. 2019.

-156,8 dBm. Ekvivalentní šumová teplota systému SDN 43 v pásmu X je okolo 20 K, viz. tab. 1. Z grafu na obrázku 8 vyplývá, že stejná úroveň tepelného šumu je při šířce pásma 1 kHz. Pro poměr SNR > 1 musí být tedy šumová šířka pásma menší než jeden kHz a přenosová rychlost dosahuje deklarované minimální hodnoty 600 bps.



Obr. 8. Výkon tepelného šumu v závislosti na T_{sys} a B .

2.4 Mars Odyssey a Reconnaissance Orbiter

Obě tyto sondy jsou orbitery Marsu a měly své předchůdce. Kromě řady přístrojů pro dálkový průzkum planety, slouží jako rádiová relé pro známá výzkumná vozítka Spirit a Opportunity a později Curiosity. Mars Reconnaissance Orbiter [7] umožňuje přenos dat na Zemi až 6 Mbps. Má 3 m zrcadlo a kromě pásma X umožňuje i komunikaci v pásmu Ka (32 GHz), která byla úspěšně demonstrována během letu k Marsu. Přenos se může uskutečňovat buď v reálném čase nebo z paměti (store&forward). Marsovská vozítka komunikují s orbitery v pásmu UHF (400 MHz) ale mohou komunikovat pomalou rychlostí přímo se Zemí v pásmu X, především při povelování. Ve srovnání s předchozími sondami jde o komunikaci na „malé“ vzdálenosti asi 250 mil. km, kdy se signál vrátí na Zemi za 28 minut.

2.5 Sondy v libračních bodech

Lagrangeových libračních bodů soustavy Slunce - Země je pět a některé z nich se využívají pro umístění sond pro výzkum Slunce, především bod L1, který leží asi 1,5 mil. km od Země na spojnici Země – Slunce. Na opačné straně od Země je ve stejné vzdálenosti L2, který zase umožňuje výhodné umístění sondy pro výzkum vzdáleného vesmíru, neboť je dokonale odstíněna od Slunce. V L1 je např. umístěna velmi úspěšná sonda SOHO [8], která byla vypuštěna v roce 1995 a pracuje do dneška. Problém rádiové komunikace se sondou v L1 spočívá v tom, že pozemní velmi směrové antény míří přesně do Slunce, které v oboru rádiových frekvencí velmi šumí a tato interference prakticky komunikaci znemožňuje. SOHO (a podobně další sondy) je proto navedena na eliptickou dráhu v rovině kolmé na spojnici

Slunce - Země, přičemž bod L1 je v ohnisku této dráhy. Perioda oběhu je šest měsíců a umožňuje se sondou komunikovat prakticky nepřetržitě.

3 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. Jmenujme alespoň projekt GALILEO k Jupiteru, první sondy MARINER, Rosetta&Philae nebo projekt STEREO. Na jedné straně jsou z pohledu rádiové komunikace podobné, protože také používají stejné technologie a zařízení DSS, které se však neustále zdokonalují. Na druhé straně nejzajímavější okamžiky nastávají, dojde-li k nějaké nepředvídané události jako výše popsany případ Cassini – Huygens nebo sondy STEREO-B [9]. Sondy se po hybernaci před konjunkcí se Sluncem nepodařilo probudit. Díky špatné orientaci solárních článků se nedobíjela baterie. Postupným odpojováním různých systémů sondy (na slepo) se podařilo snížit spotřebu natolik, že se baterie po téměř dvou letech zotavila a sonda začala vysílat a být ovladatelná. Takových situací je v kosmické komunikaci známa celá řada. Některé případy dávají vyniknout lidské inteligenci i neuvěřitelné náhodě.

4 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>