



AstroHUB

Deep Space Network a meziplanetární telekomunikace

Fyzika dálkového rádiového a optického spojení, orbitální navigace a
meziplanetární internet

AUTOR

David Pěkník

OBSAH

Úvod a předmluva: Hlasy ze vzdálených světů	4
---	---

ČÁST I: FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY A ELEKTRODYNAMIKA DÁLKOVÝCH SPOJŮ

Kapitola 1	Šíření elektromagnetických vln v meziplanetárním prostoru	7
1.1	Maxwellovy rovnice a vlnová rovnice v plazmatu	7
1.2	Disperze, fázová a grupová rychlost	7
1.3	Faradayova rotace polarizační roviny	8
1.4	Scintilace a turbulence slunečního větru	9
Kapitola 2	Teorie informace a energetická bilance linky	10
2.1	Friisova přenosová rovnice a zisk antény	10
2.2	Šumová teplota systému a Nyquistův teorém	10
2.3	Shannonova mez a energetický poměr Eb/NO	11
2.4	Vědecký Python kód: Analýza link budgetu pro sondu New Horizons	11
Kapitola 3	Frekvenční pásma a mikrovlnná atmosféra	14
3.1	Pásma S, X a revoluce pásma Ka	14
3.2	Atmosférická absorpce v mikrovlnné oblasti	14
3.3	Vliv deště a troposférických turbulencí	15

ČÁST II: ARCHITEKTURA POZEMNÍHO SEGMENTU A ANTÉNNÍ INŽENÝRSTVÍ

Kapitola 4	Pozemní komplexy Goldstone, Madrid a Canberra	17
4.1	Konstrukce 70metrových antén (DSS-14, DSS-43, DSS-63)	17
4.2	Homologický design a kompenzace gravitačních průhybů	17
4.3	Beam Waveguide (BWG) architektura 34m antén	18
Kapitola 5	Extrémní kryogenika a nízkošumové přijímače	19
5.1	Kvantové zesilovače MASER chlazené na 4,2 K	19
5.2	HEMT tranzistory: Polovodičová alternativa	19
5.3	Fázované slučování polí antén (Antenna Arraying)	19

OBSAH (POKRAČOVÁNÍ)

ČÁST III: MEZIPLANETÁRNÍ NAVIGACE A TRAJEKTORIE

Kapitola 6	Přesná radiometrie: Range a Doppler	22
6.1	Obousměrný čas šíření (Two-Way Ranging)	22
6.2	Koherentní měření rychlosti přes Dopplerův jev	22
6.3	Relativistické korekce a Shapirovo zpoždění	22
Kapitola 7	Delta-DOR: Interferometrie na mezikontinentálních základnách	24
7.1	Fyzikální princip Delta-DOR	24
7.2	Diferenciální kalibrace pomocí extragalaktických kvasarů	24
7.3	Dosažení nanoradiánové přesnosti	24
Kapitola 8	Planetární radar a radioastronomie	26
8.1	Radar Goldstone Solar System Radar (GSSR)	26
8.2	Radiověda (Radio Science): Atmosféry a prstence	26

ČÁST IV: KÓDOVÁNÍ, ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU A OPTICKÁ BUDOUCNOST

Kapitola 9	Pokročilé samoopravné kódy a modulace	28
9.1	Vývoj kódování v hlubokém vesmíru: Od Marineru po Cassini	28
9.2	Revoluce LDPC (Low-Density Parity-Check) kódů	28
9.3	Modulační schémata v hlubokém vesmíru	29
Kapitola 10	Deep Space Optical Communications (DSOC)	30
10.1	Fyzika fotonového paprsku: Od mikrovln k laserům	30
10.2	Mise Psyche a experiment DSOC (2023–2026)	30
10.3	Úskalí laserové komunikace: Pointace a atmosféra	31
Kapitola 11	Zpožděně tolerantní sítě (DTN) a meziplanetární internet	32
11.1	Architektura Store-and-Forward a Bundle Protocol	32
11.2	Meziplanetární páteřní síť Mars–Měsíc–Země	32

ČÁST V: PŘÍLOHY A VÝPOČETNÍ MATERIÁLY

Dodatek A	Matematická odvození: Friisova rovnice a Doppler	34
A.1	Odvození Friisovy přenosové rovnice z Poyntingova vektoru	34
A.2	Odvození relativistického podélného Dopplerova jevu	34
Dodatek B	Vědecké skripty v Pythonu pro geometrii DSN	36
B.1	Výpočet elevace a viditelnosti sondy z pozemních komplexů	36
B.2	Simulace adaptivního kódování v pásmu Ka za proměnného počasí	37
Dodatek C	Sbírka 15 řešených úloh	39
Dodatek D	Encyklopedický glosář a katalog stanic	44
D.1	Encyklopedický glosář pojmů	44
D.2	Technický katalog stanic sítě DSN a ESTRACK	45

Úvod a předmluva: Hlasy ze vzdálených světů

V srpnu roku 1977 odstartovaly z mysu Canaveral dvě identické meziplanetární sondy: Voyager 1 a Voyager 2. Jejich primární mise u plynných obrů Sluneční soustavy měla trvat pět let. Dnes, o téměř půl století později, se obě plavidla pohybují v mezihvězdném prostoru za heliopauzou, ve vzdálenostech přesahujících 24 miliard kilometrů (více než 163 astronomických jednotek). Z této nepředstavitelné propasti prostoru k Zemi stále proudí data – signál vysílaný palubním radiofrekvenčním vysílačem o výkonu pouhých 22,4 W, což je méně než běžná žárovka v chladničce.

Když tento signál po více než 22 hodinách letu rychlostí světla dorazí k naší planetě, je jeho energetická hustota rozptýlena po gigantické kulové ploše. Celkový výkon zachycený pozemskou anténou dosahuje řádu pouhých 10^{-22} W (–190 dBm nebo 0,0000000000000000000001 W). Přesto dokážeme z tohoto nepatrného energetického záchvěvu, hluboce pohřbeného v tepelném šumu vesmírného pozadí, rekonstruovat telemetrická data, měřit hustotu mezihvězdného plazmatu a dokonce sondě odesílat příkazy pro kalibraci trysek.

Tento triumf moderní vědy a techniky není dílem náhody, nýbrž plodem více než šedesáti let systematického rozvoje celosvětové telekomunikační a navigační infrastruktury známé jako **Deep Space Network (DSN)**, spravované laboratoří Jet Propulsion Laboratory (JPL) pro agenturu NASA.

0.1 Od jednoduchých pípnutí k mezihvězdné konektivitě

Historie kosmických komunikací započala v říjnu 1957 jednoduchým pípáním první umělé družice Sputnik 1 na frekvencích 20,005 MHz a 40,002 MHz. V té době byl dosah spojení limitován na několik tisíc kilometrů a signál trpěl dramatickými deformacemi způsobenými ionosférou.

S příchodem programů Ranger, Surveyor a Mariner na počátku 60. let 20. století se však cíl dramaticky proměnil: bylo nutné zajistit spolehlivé obousměrné spojení s automaty mířícími k Měsíci, Venuši a Marsu. Rychle se ukázalo, že s rotací Země kolem své osy nelze dálkové sondy řídit z jediné pozemní observatoře. Vznikla proto geniální koncepce **tří stanic rozmístěných po 120° zeměpisné délky**:

- **Goldstone** v Mohavské poušti v Kalifornii (USA),
- **Madrid** (Robledo de Chavela) ve Španělsku,
- **Canberra** (Tidbinbilla) v Austrálii.

Tento trojúhelník zajišťuje, že v důsledku rotace Země předává zapadající stanice sledovanou sondu stanici vycházející. Žádné těleso v hlubokém vesmíru se tak nemůže skrýt před zrakem pozemských operátorů, ledaže by bylo zcloněno samotným Sluncem nebo planetou.

0.2 Fyzikální výzvy meziplanetárních spojů

Dálková telekomunikace v hlubokém vesmíru se principiálně liší od pozemních radiových či mobilních sítí. Inženýr zde čelí nekompromisním zákonům elektrodynamiky a astrodynamiky:

1. **Útlum volného prostoru ($1/r^2$):** Na vzdálenosti Jupiteru (5 AU) klesá hustota zářivého toku 25krát ve srovnání se Zemí, na vzdálenosti Neptunu (30 AU) 900krát a u Voyageru 1 dokonce 27 000krát. Každý bit přenesené informace vyžaduje maximalizaci apertur pozemních antén a minimalizaci šumové teploty.
2. **Konečná rychlost světla (c):** Latence signálu na Mars činí 4 až 24 minut (jednosměrně), na Jupiter 35 až 52 minut a k Voyageru přes 22 hodin. Interaktivní řízení "v reálném čase" je fyzikálně nemožné; mise vyžadují vysokou míru palubní autonomie a nové komunikační protokoly schopné pracovat s asynchronními přenosy (Delay-Tolerant Networking).
3. **Plazmové prostředí sluneční soustavy:** Meziplanetární prostor není ideální vakuum. Sluneční vír, koronální výrony hmoty (CME) a turbulence volných elektronů indukují fázové fluktuace, Faradayovu rotaci polarizační roviny a disperzní

zpoždění signálu.

4. **Relativistické efekty:** Přesná radiometrie vyžaduje započtení gravitačního zpoždění signálu v gravitačním poli Slunce (Shapirovo zpoždění) a speciálně-relativistického Dopplerova posuvu.

0.3 Struktura a didaktický cíl monografie

Tato publikace si klade za cíl poskytnout ucelený univerzitní přehled o teorii, architektuře a provozní praxi sítě Deep Space Network. Kniha je strukturována do pěti tematických celků:

- **Část I** pokládá rigorózní teoretické základy: od Maxwellových rovnic a šíření vln v plazmatu přes Friisův přenosový zákon až po Shannonovu mez a atmosférická absorpční okna.
- **Část II** detailně zkoumá inženýrství pozemního segmentu: konstrukci 70m a 34m parabolických antén, vlnovodovou optiku (Beam Waveguide) a kryogenní nízkošumové zesilovače chlazené kapalným heliem na 4 K.
- **Část III** se věnuje navigačnímu umění: přesnému obousměrnému měření vzdáleností (Ranging), koherentnímu měření radiální rychlosti (Doppler) a nanoradiánové interferometrii na mezikontinentálních základnách (ΔDOR).
- **Část IV** otevírá moderní éru: přechod k pokročilým samoopravným kódům LDPC, fotonovou laserovou komunikaci v hlubokém vesmíru (DSOC mise Psyche) a protokol meziplanetárního internetu DTN.
- **Část V** nabízí rigorózní matematická odvození, sbírku 15 řešených inženýrských úloh, výpočetní knihovny v Pythonu a podrobný encyklopedický přehled všech anténních komplexů.

Vítejte u studia technologie, která spojuje lidskou mysl s nejvzdálenějšími horizonty naší sluneční soustavy.

Část I: Fyzikální základy a elektrodynamika dálkových spojů

Než namíříme desítky tun vážící ocelové kolosy pozemních antén k nepatrným rádiovým majákům v hlubokém vesmíru, musíme exaktně popsat fundamentální fyzikální zákony, jimiž se šíření elektromagnetického vlnění řídí. V této úvodní části monografie prozkoumáme:

1. **Elektrodynamiku Maxwellových polí v nehomogenním meziplanetárním médiu**, vliv slunečního větru, elektronové hustoty a plazmových frekvencí na disperzi vln.
2. **Teorii informace, bilanci rádiového spoje (Link Budget)**, Friisovu přenosovou rovnici, Boltzmannův tepelný šum a neúprosný limit spektrální kapacity definovaný Claudem Shannonem.
3. **Frekvenční spektrum mikrovlnného pásma (S, X, Ka)** a fyziku atmosférických absorpčních čar vodní páry a kyslíku v zemské troposféře.

Kapitola 1: Šíření elektromagnetických vln v meziplanetárním prostoru

Komunikační kanál mezi Zemí a meziplanetární sondou představuje prostor o rozměrech stovek milionů až miliard kilometrů. Ačkoli je často označován jako "prázdný prostor", z hlediska přesné elektrodynamiky jde o dynamické, magnetizované a plazmatické médium, které zanechává na procházející elektromagnetické vlně nezaměnitelný fyzikální otisk.

1.1 Maxwellovy rovnice a vlnová rovnice v plazmatu

Základem popisu elektromagnetického pole jsou Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

kde $\mathbf{E}$ je intenzita elektrického pole, $\mathbf{B}$ je magnetická indukce, ρ je objemová hustota náboje, $\mathbf{j}$ je hustota elektrického proudu a ε_0, μ_0 jsou permitivita a permeabilita vakua ($c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$).

V meziplanetárním prostoru tvořeném plazmatem slunečního větru (volné elektrony a protony) reagují elektrony na vysokofrekvenční elektrické pole vlny $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$. Pohybová rovnice netlumeného elektronu o hmotnosti m_e a náboji $-e$ je:

$$m_e \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E} \implies \mathbf{v} = \frac{e}{i\omega m_e} \mathbf{E}$$

Proudová hustota volných elektronů s číselnou hustotou n_e činí $\mathbf{j} = -en_e \mathbf{v} = -\frac{n_e e^2}{i\omega m_e} \mathbf{E}$. Dosazením do čtvrté Maxwellovy rovnice získáme efektivní dielektrikum plazmatu:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

kde ω_p je fundamentální **elektronová plazmová frekvence**:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}$$

V numerickém vyjádření platí pro lineární plazmovou frekvenci $f_p = \omega_p/(2\pi) \approx 8,98\sqrt{n_e}$ Hz, kde n_e je v m^{-3} . Ve vzdálenosti 1 AU od Slunce je typická hustota slunečního větru $n_e \approx 5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$, což dává $f_p \approx 20$ kHz. Všechny telekomunikační frekvence DSN ($f > 2$ GHz) se tedy nacházejí hluboko v pásmu propustnosti ($\omega \gg \omega_p$).

1.2 Disperze, fázová a grupová rychlost

Disperzní relace pro elektromagnetické vlnění v nehomogenním neizotermickém plazmatu má tvar:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}$$

Z této relace bezprostředně plynou dvě odlišné rychlosti šíření:

1. **Fázová rychlost (v_p):** Rychlost pohybu čela vlnoplochy dané fáze:

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}}} > c$$

Fázová rychlost je v plazmatu vždy ostře větší než rychlost světla ve vakuu, což však neporušuje speciální teorii relativity, neboť fázová rychlost nepřenáší informaci ani energii.

1. **Grupová rychlost (v_g):** Rychlost šíření vlnového balíku a modulovaného signálu:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = c \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} < c$$

V limitě vysokých frekvencí ($\omega \gg \omega_p$) můžeme odmocninu rozvinout v Taylorovu řadu:

$$v_g \approx c \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$$

Zpoždění časového signálu Δt na dráze o geometrické délce L oproti vakuu činí:

$$\Delta t = \int_0^L \left(\frac{1}{v_g} - \frac{1}{c} \right) dl \approx \frac{1}{2c\omega^2} \int_0^L \omega_p^2 dl = \frac{e^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e c f^2} \int_0^L n_e(l) dl$$

Integrál číselné hustoty elektronů podél paprsku se v astrofyzice a telekomunikacích nazývá **celkový elektronový obsah (Total Electron Content, TEC)**:

$$\text{TEC} = \int_0^L n_e(l) dl \quad [\text{elektronů} \cdot \text{m}^{-2}]$$

Zpoždění skupinového signálu je tedy **nepřímo úměrné druhé mocnině nosné frekvence** ($1/f^2$). To je klíčový fyzikální důvod, proč DSN využívá duální měření na dvou frekvencích (např. S a X, nebo X a Ka). Porovnáním rozdílů časů doručení na dvou frekvencích lze vliv plazmatu exaktně změřit a odečíst s přesností na zlomky nanosekundy.

1.3 Faradayova rotace polarizační roviny

Je-li meziplanetární plazma vystaveno stacionárnímu magnetickému poli $\mathbf{B}_0$ (vyvolanému meziplanetárním magnetickým polem IMF nebo magnetosférami planet), rozpadá se dielektrický tenzor plazmatu. Vlna s lineární polarizací se rozloží na dvě cirkulárně polarizované složky – pravotočivou (R-vlna) a levotočivou (L-vlna), které se šíří mírně odlišnými fázovými rychlostmi:

$$n_{R,L}^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \mp \omega_c)}$$

kde $\omega_c = \frac{eB_0}{m_e}$ je elektronová cyklotronová frekvence. V důsledku rozdílu indexů lomu dochází k postupnému stáčení roviny lineární polarizace – tzv. **Faradayově rotaci**. Celkový úhel otočení polarizační roviny $\Delta\theta$ podél dráhy paprsku je dán vztahem:

$$\Delta\theta = \frac{e^3}{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e^2 c^2 f^2} \int_0^L n_e(l) B_{\parallel}(l) dl$$

kde $B_{\parallel}$ je složka magnetického pole rovnoběžná se směrem šíření vlny.

ⓘ UPOZORNĚNÍ

Dopad na anténní systémy: Kdyby meziplanetární sondy využívaly lineárně polarizované antény (např. jednoduchý dipól), Faradayova rotace způsobená sluneční korónou a ionosférou by mohla způsobit otočení polarizace až o 90° , což by vedlo k úplné ztrátě signálu (polarizačnímu útlumu přesahujícímu 30 dB). Z tohoto důvodu využívá DSN výhradně **kruhovou polarizaci** (pravotočivou RCP a levotočivou LCP), která je vůči Faradayově rotaci zcela imunní.

1.4 Scintilace a turbulence slunečního větru

Sluneční vítr je vysoce turbulentní magnetohydrodynamické médium. Fluktuace hustoty δn_e vytvářejí v rovině vlnoplochy stochastické fázové deformace. Když se vlnoplocha šíří dále k Zemi, interference jednotlivých paprsků vytváří difrakční obrazec intenzity, který se pohybuje přes pozemní přijímací anténu.

Tento jev, označovaný jako **meziplanetární scintilace (Interplanetary Scintillation, IPS)**, se projevuje prudkými fluktuacemi amplitudy a fáze signálu na frekvencích zhruba 0,1 Hz až 10 Hz. Míru scintilace kvantifikujeme bezrozměrným scintilačním indexem m :

$$m = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle}$$

kde I je okamžitá intenzita signálu. Pro úhlové vzdálenosti sondy od Slunce (elongace) menší než 5° dosahuje scintilační index hodnoty $m \rightarrow 1$ (režim silné scintilace). V tomto režimu dochází k výpadkům fázového závěsu (carrier lock) v přijímačích DSN. Přejít z pásma X (8,4 GHz) na pásmo Ka (32 GHz) dramaticky redukuje vliv scintilací, neboť index m klesá s frekvencí přibližně jako $f^{-7/12}$.

Kapitola 2: Teorie informace a energetická bilance linky (Link Budget)

Každý rádiový spoj mezi Zemí a kosmickou sondou je svázán exaktní energetickou rovnováhou. Telekomunikační inženýři sestavují tzv. **Link Budget** (energetickou bilanci linky), která do jediného logaritmického součtu integruje výkon vysílače, zisk antén, geometrické i atmosférické ztráty a šumovou teplotu přijímacího systému.

2.1 Friisova přenosová rovnice a zisk antény

Uvažujme vysílací anténu na sondě napájenou vysokofrekvenčním výkonem P_t . Izotropní zářič by tento výkon rovnoměrně rozptýlil do plného prostorového úhlu 4π sr. Hustota zářivého toku ve vzdálenosti r by byla $S_{\text{iso}} = P_t / (4\pi r^2)$.

Směrová anténa s aperturovým ziskem G_t soustřeďuje energii do úzkého kužele. Skutečná hustota toku v hlavní ose vyzařování činí:

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2}$$

Pozemní přijímací anténa s efektivní aperturou A_{eff} zachytí výkon $P_r = S \cdot A_{\text{eff}}$. Z fundamentálního vztahu anténní teorie plyne ekvivalence mezi ziskem antény G_r a její efektivní aperturou při vlnové délce λ :

$$A_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

Dosažením získáme klasickou **Friisovu přenosovou rovnici**:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot L_{\text{misc}}$$

Faktor $\left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$ se nazývá **útlum volného prostoru** (Free-Space Path Loss, L_{FS}). Logaritmičtě vyjádřeno v decibelech:

$$L_{\text{FS}} [\text{dB}] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 20 \log_{10}(r) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

Zisk parabolické reflektorové antény o geometrickém průměru D a aperturové účinnosti η je dán vztahem:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = \eta \left(\frac{\pi D f}{c} \right)^2$$

Aperturová účinnost η typicky dosahuje hodnot 0,60 až 0,75 a zahrnuje ztráty způsobené nerovnoměrným ozářením reflektoru (illumination taper), zastíněním sekundárním zrcadlem a podpůrnými vzpěrami, a fázovými chybami způsobenými mikroskopickými odchylkami povrchu zrcadla od ideálního paraboloidu (tzv. Ruzeho rovnice):

$$\eta_{\text{Ruze}} = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right]$$

kde σ je efektivní střední kvadratická drsnost povrchu (RMS error).

2.2 Šumová teplota systému a Nyquistův teorém

Signál zachycený pozemní anténou musí být detekován v přítomnosti náhodného tepelného šumu. Dle Nyquistova teorému generuje jakýkoli lineární rezistivní prvek o absolutní teplotě T šumový výkon s výkonovou spektrální hustotou N_0 :

$$N_0 = k_B T \quad [\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1} = \text{J}]$$

kde $k_B = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta. Celkový ekvivalentní šum systému reprezentujeme **systémovou šumovou teplotou** (T_{sys}) vztáženou ke vstupu nízkošumového zesilovače (LNA):

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + T_{\text{feed}} + T_{\text{LNA}} + \frac{T_{\text{post}}}{G_{\text{LNA}}}$$

Jednotlivé složky reprezentují:

- T_{ant} : Šum kosmického reliktního záření (2,73 K), galaktické synchrotronové pozadí, atmosférický tepelný šum (absorpce O_2 a H_2O) a šum vyzařovaný terénem kolem antény zachycený postranními laloky (spillover šum).
- T_{feed} : Ztráty v mikrovlnném napájecí a polarizátoru.
- T_{LNA} : Vnitřní šumová teplota kryogenního zesilovače (cca 4 K až 15 K).

Na 70m anténách DSN v Goldstone dosahuje T_{sys} v pásmu X za zenitu a jasné oblohy hodnoty pouhých 15 až 18 K.

2.3 Shannonova mez a energetický poměr E_b/N_0

Maximální teoretická přenosová kapacita spojitého kanálu se šířkou pásma B a aditivním bílým gaussovským šumem (AWGN) je dána slavným **Shannonovým–Hartleyovým teorémem**:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r}{N_0 B} \right) \quad [\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}]$$

V telekomunikační praxi hlubokého vesmíru normalizujeme výkon na jeden informační bit. Definujeme energii na informační bit $E_b = P_r/R$, kde R je informační přenosová rychlost (v bps). Poměr E_b/N_0 představuje bezrozměrnou metriku kvality modulovaného signálu:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_r}{N_0 \cdot R}$$

Dosažením do Shannonovy rovnice a limitním přechodem pro neomezenou šířku pásma ($B \rightarrow \infty$) získáme **absolutní Shannonovu mez**:

$$\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\min} = \ln(2) \approx 0,693 \implies -1,59 \text{ dB}$$

Žádný fyzikální komunikační systém nemůže spolehlivě přenášet data s nulovou chybovostí při poměru $E_b/N_0 < -1,59 \text{ dB}$. Moderní samoopravné kódy DSN (jako LDPC) pracují při poměrech $E_b/N_0 \approx 0,5$ až $1,5 \text{ dB}$, což znamená, že se nacházíme pouhých 2 až 3 dB od absolutního teoretického limitu daného zákony termodynamiky a kvantové fyziky.

2.4 Vědecký Python kód: Analýza link budgetu pro sondu New Horizons

Následující vědecký skript provádí exaktní výpočet energetické bilance a dosažitelné přenosové rychlosti pro sondu New Horizons v Kuiperově pásu (vzdálenost 55 AU):

```

import numpy as np

<h1 id="fundamentalni-fyzikalni-konstanty">Fundamentální fyzikální konstanty</h1>
c = 299792458.0          # rychlost světla [m/s]
k_B = 1.380649e-23      # Boltzmannova konstanta [J/K]
AU = 149597870700.0     # 1 AU [m]

<h1 id="parametry-mise-new-horizons-vysilac-pasma-x">Parametry mise New Horizons (vysílač pásma X)
</h1>
r_au = 55.0              # vzdálenost k Zemi [AU]
r = r_au * AU            # vzdálenost [m]
f = 8.438e9              # frekvence [Hz]
lam = c / f              # vlnová délka (~3.55 cm)
P_t_w = 12.0             # výkon palubního zesilovače TWTa [W]
D_t = 2.1                # průměr vysokoziskové paraboly HGA [m]
eta_t = 0.65             # aperturová účinnost antény sondy

<h1 id="parametry-pozemni-stanice-dsn-70m-antena-dss-14-goldstone">Parametry pozemní stanice DSN
(70m anténa DSS-14 Goldstone)</h1>
D_r = 70.0               # průměr paraboly [m]
eta_r = 0.70             # účinnost pozemní antény
T_sys = 19.5             # systémová šumová teplota v pásmu X [K]

<h1 id="zisky-anten">Zisky antén</h1>
G_t = eta_t * (np.pi * D_t / lam)**2
G_r = eta_r * (np.pi * D_r / lam)**2

<h1 id="utlum-volneho-prostoru">Útlum volného prostoru</h1>
FSPL = (lam / (4.0 * np.pi * r))**2

<h1 id="atmosfericke-a-vlnovodove-ztraty-1-5-db-celkove">Atmosférické a vlnodové ztráty (-1.5 dB
celkově)</h1>
L_misc = 10**(-1.5 / 10.0)

<h1 id="prijaty-vykon">Přijatý výkon</h1>
P_r = P_t_w * G_t * G_r * FSPL * L_misc
P_r_dBm = 10.0 * np.log10(P_r * 1e3)

<h1 id="sumova-spektralni-hustota">Šumová spektrální hustota</h1>
N0 = k_B * T_sys

<h1 id="pozadovane-eb-n0-pro-ldpc-kod-kodovy-pomer-1-2-s-rezervou-3-db">Požadované Eb/N0 pro LDPC
kód (kódový poměr 1/2) s rezervou 3 dB</h1>
Eb_N0_req_dB = 2.5
Eb_N0_req = 10**((Eb_N0_req_dB / 10.0)

```

```
<h1 id="maximalni-podporovana-prenosova-rychlost">Maximální podporovaná přenosová rychlost</h1>
R_max = P_r / (N0 * Eb_N0_req)
```

```
print(f"--- VÝSLEDKY TELEKOMUNIKAČNÍ BILANCE (NEW HORIZONS NA {r_au} AU) ---")
print(f"Geometrická vzdálenost:      {r / 1e9:.2f} mil. km")
print(f"Jednosměrné zpoždění světla: {r / c / 3600.0:.2f} hodin")
print(f"Zisk palubní antény (2.1m):   {10*np.log10(G_t):.2f} dBi")
print(f"Zisk pozemní antény (70m):     {10*np.log10(G_r):.2f} dBi")
print(f"Útlum prostoru (FSPL):          {10*np.log10(FSPL):.2f} dB")
print(f"Přijatý výkon (P_r):            {P_r:.3e} W ({P_r_dBm:.2f} dBm)")
print(f"Šumová hustota N0:                {10*np.log10(N0):.2f} dBW/Hz")
print(f"Dosažitelná rychlost linky:      {R_max:.1f} bps (~{R_max/1000.0:.2f} kbps)")
```

Kapitola 3: Frekvenční pásma a mikrovlnná atmosféra

Volba nosné frekvence je pro meziplanetární spoj kritickým kompromisem mezi difrakčním ziskem antén, výkonem polovodičových či elektronkových zdrojů a absorpčními vlastnostmi zemské atmosféry. Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) vyčlenila pro komunikaci v hlubokém vesmíru tři hlavní frekvenční pásma.

3.1 Pásma S, X a revoluce pásma Ka

Parametry základních frekvenčních pásem využívaných sítí DSN pro hluboký vesmír (Deep Space, definovaný jako vzdálenost $> 2 \times 10^6$ km od Země) shrnuje následující tabulka:

Pásmo	Frekvence Uplink (Země → Sonda)	Frekvence Downlink (Sonda → Země)	Poměr frekvencí (Turnaround Ratio)
S-band	2110 – 2120 MHz	2290 – 2300 MHz	240/221
X-band	7145 – 7190 MHz	8400 – 8450 MHz	880/749
Ka-band	34200 – 34700 MHz	31800 – 32300 MHz	3344/3599

Výhoda vyšších frekvencí: Kvadratický nárůst zisku

Z Friisovy rovnice plyne, že zisk parabolické antény roste s druhou mocninou frekvence ($G \propto f^2$). Přejít z pásma X (8,4 GHz) na pásmo Ka (32 GHz) představuje nárůst frekvence o faktor přibližně 3,8. Při pevném průměru vysílací antény na sondě (D_t) i pozemní antény (D_r) vzroste součin zisků $G_t G_r$ o faktor $3,8^4 \approx 208$, což odpovídá teoretickému zisku +23 dB. V praxi je tento obrovský nárůst částečně redukován:

1. Vyšším útlumem volného prostoru na vlnovou délku ($L_{FS} \propto f^{-2}$, ztráta –11,6 dB),
2. Zvýšenými nároky na přesnost tvaru paraboly dle Ruzeho rovnice,
3. Vyšší absorpci v zemské atmosféře, zejména vlivem vodní páry.

I po započtení všech reálných ztrát však pásmo Ka nabízí **čistý přínos +6 až +10 dB** oproti pásmu X. To v praxi znamená čtyř- až desetinásobné zvýšení přenosové rychlosti vědeckých dat při stejné hmotnosti a příkonu vysílače na sondě.

3.2 Atmosférická absorpce v mikrovlnné oblasti

Signál sestupující z meziplanetárního prostoru musí v závěrečných 20 kilometrech své pouti projít zemskou atmosférou. Interakce mikrovln s molekulami plynů je řízena kvantovými rotačními přechody dipólových momentů:

1. **Rezonanční čára vodní páry (H_2O):** Centrována na frekvenci 22,235 GHz. Molekula vody má permanentní elektrický dipólový moment; absorpce roste s vlhkostí vzduchu a způsobuje útlum i významný nárůst šumové teploty oblohy.
2. **Komplex rezonančních čar kyslíku (O_2):** Centrován kolem frekvence 60 GHz (s izolovanou čarou na 118,75 GHz). Molekula O_2 nemá elektrický, ale magnetický dipólový moment vyvolaný dvěma nepárovými elektrony. Oblast kolem 60 GHz je pro pozemní astronomii neprostupnou zdí.

Pásmo X (8,4 GHz) leží v hlubokém atmosférickém okně, kde je útlum atmosféry za zenitu naprosto zanedbatelný ($< 0,04$ dB) a šumová teplota oblohy činí pouhé 2 až 3 K.

Pásmo Ka (32 GHz) se nachází v okně mezi čarou vody (22 GHz) a kyslíku (60 GHz). Za suchého a jasného počasí dosahuje atmosférický útlum v zenitu příznivých 0,12 dB. Za deště nebo při průchodu hustou oblačností však může útlum dramaticky vzrůst na 2 až 6 dB, což může vést ke ztrátě spojení.

3.3 Vliv deště a troposférických turbulencí

Kapky deště o velikosti srovnatelné s vlnovou délkou pásma Ka ($\lambda \approx 9 \text{ mm}$) způsobují nejen absorpci, ale i nezanedbatelný dielektrický rozptyl (Mieův rozptyl). Dle Kirchhoffova zákona o tepelném záření těleso, které absorbuje záření, současně vyzařuje tepelný šum. Ekvivalentní šumová teplota atmosféry T_{atm} v přítomnosti útlumu $L_{\text{atm}} \leq 1$ (kde $A_{\text{dB}} = -10 \log_{10} L_{\text{atm}}$) činí:

$$T_{\text{atm}} = T_{\text{phys}} (1 - L_{\text{atm}})$$

kde $T_{\text{phys}} \approx 280 \text{ K}$ je průměrná fyzikální teplota troposféry. Pokud déšť způsobí útlum pouze 3 dB ($L_{\text{atm}} = 0,5$), vzroste šumová teplota oblohy z 15 K na:

$$T_{\text{atm}} = 280 \cdot (1 - 0,5) = 140 \text{ K}$$

Tento téměř desetinásobný nárůst šumové teploty dramaticky sníží poměr E_b/N_0 a představuje hlavní důvod, proč DSN provozuje pokročilé meteorologické radiometry na všech stanicích a implementuje adaptivní kódování a modulaci (ACM – Adaptive Coding and Modulation), která dynamicky mění přenosovou rychlost podle okamžitého stavu atmosféry.

Část II: Architektura pozemního segmentu a anténní inženýrství

Zatímco sonda v hlubokém vesmíru je přísně limitována hmotností, rozměry a elektrickým příkonem ze solárních panelů či radioizotopových generátorů (RTG), pozemní segment žádná taková omezení nezná. V této části monografie prozkoumáme:

1. **Globální rozmístění a mechanickou stavbu pozemních komplexů Goldstone, Madrid a Canberra**, konstrukci 70metrových obřích reflektorů o hmotnosti téměř 3000 tun a jejich homologickou kompenzaci gravitačních průhybů.
2. **Architekturu Beam Waveguide (BWG) 34metrových antén**, která přenáší mikrovlny systémem rotujících zrcadel do stacionární podzemní laboratoře.
3. **Kvantové zesilovače MASER a tranzistory HEMT** chlazené kapalným heliem na 4,2 K, a vysokovýkonové klystronové vysílače generující spojitý výkon až 400 kW.

Kapitola 4: Pozemní komplexy Goldstone, Madrid a Canberra

Srdcem sítě Deep Space Network jsou tři komunikační komplexy, strategicky rozmístěné po celém zemském glóbu tak, aby se vzájemně doplňovaly a vytvářely nepřetržitý řetězec viditelnosti:

- **Goldstone Deep Space Communications Complex (GDSCC):** Umístěn v Mohavské poušti v Kalifornii (přibližně 72 km severovýchodně od Barstow). Je obklopen pouštními horami, které vytvářejí přirozenou bariéru chránící citlivé přijímače před civilizačním elektromagnetickým smogem z Los Angeles a Las Vegas.
- **Madrid Deep Space Communications Complex (MDSCC):** Leží v Robledo de Chavela, zhruba 60 km západně od Madridu ve Španělsku, v malebném údolí chráněném pohořím Sierra de Guadarrama.
- **Canberra Deep Space Communication Complex (CDSCC):** Nachází se v údolí Tidbinbilla v Australském teritoriu hlavního města (ACT), přibližně 40 km jihozápadně od Canberru, na okraji národního parku Namadgi.

Tato konfigurace poskytuje plné překrytí nebeské sféry. Navíc díky své jižní zeměpisné šířce (-35°) je Canberra jedinou stanicí DSN schopnou sledovat sondy s hlubokou jižní deklinací, jako je Voyager 2 mířící k jižnímu pólu Mléčné dráhy.

4.1 Konstrukce 70metrových antén (DSS-14, DSS-43, DSS-63)

Nejvýkonnějšími parabolickými anténami DSN jsou tři 70metrové giganty: **DSS-14** (Mars antenna v Goldstone), **DSS-43** v Canbeře a **DSS-63** v Madridu. Původně byly postaveny v 60. letech s průměrem 64 metrů pro podporu misí Apollo a Mariner a koncem 80. let rozšířeny na 70 metrů v rámci příprav na historický průlet Voyageru 2 kolem Neptunu.

Základní technické parametry 70m antény:

- **Průměr hlavního reflektoru:** 70,0 m (sběrná plocha 3848 m^2),
- **Celková hmotnost pohyblivé části:** přes 2970 tun,
- **Zisk v pásmu X (8,4 GHz):** přibližně 74,3 dBi (zesílení 27milionkrát oproti izotropnímu zářiči),
- **Šířka hlavního svazku (HPBW):** pouhých $0,033^\circ$ (2 úhlové minuty).

Při takto extrémně úzkém vyzařovacím svazku představuje pointace antény mimořádnou inženýrskou výzvu: nepřesnost zaměření větší než několik tisícín stupně by znamenala úplné minuty sondy.

4.2 Homologický design a kompenzace gravitačních průhybů

Při hmotnosti ocelové příhradové konstrukce paraboloidu přesahující stovky tun dochází při změně elevačního úhlu (od horizontu k zenitu) k nevyhnutelným gravitačním deformacím. Kdyby se parabola deformovala náhodně, došlo by k posunu fázového středu a drastickému propadu aperturové účinnosti.

Konstrukce DSN využívá princip **homologické deformace** (vyvinutý Sebastianem von Hoernerem): ocelová nosná struktura je navržena tak, aby se pod vlivem proměnné gravitace deformovala opět do **dokonalého paraboloidu**, avšak s mírně posunutým ohniskem a změněnou ohniskovou vzdáleností. Poloha sekundárního zrcadla (subreflektoru) je následně v reálném čase korigována hydraulickými servopohony, které neustále udržují subreflektor v přesném geometrickém ohnisku deformovaného paraboloidu.

4.3 Beam Waveguide (BWG) architektura 34m antén

Moderní páteř sítě DSN tvoří flotila 34metrových antén typu **Beam Waveguide (BWG)** (např. DSS-24, DSS-26, DSS-34, DSS-36, DSS-54, DSS-56).

U klasických antén typu Cassegrain se těžké kryogenní přijímače a vysokovýkonové vysílače nacházejí přímo v ohnisku nebo v přístrojové kabině na rotující konstrukci paraboly. To komplikuje údržbu, vyžaduje složité rotační vysokofrekvenční klouby a omezuje hmotnost aparatury.

Systém **Beam Waveguide** tento problém elegantně řeší:

1. Subreflektor v primárním ohnisku odráží mikrovlnný svazek dolů středovým otvorem v hlavní parabole.
2. Soustava precizních kovových rovinných a elipsoidálních zrcadel vede svazek skrz duté osy azimutu a elevace.
3. Svazek vstupuje do stacionární, klimatizované podzemní místnosti (tzv. *Pedestal Room*).

V této podzemní místnosti jsou umístěny kryogenní masery chlazené heliem, 20kW vysílače a polarizační přepínače. Operátoři mohou jediným otočením zrcadla přepnout anténu z pásma S do pásma X či Ka během několika sekund, aniž by bylo nutné vstupovat na pohyblivou konstrukci antény.

Kapitola 5: Extrémní kryogenika a nízkošumové přijímače

Základní telekomunikační paradox hlubokého vesmíru spočívá v tom, že zachycený signál je často o mnoho řádů slabší než tepelné vyzařování pokojových rezistorů v přijímači. Pokud by byl na výstupu antény použit běžný nechlazený polovodičový zesilovač s šumovým číslem 2 dB ($T_{\text{noise}} \approx 170$ K), signál ze sondy by byl beznadějně zničen.

5.1 Kvantové zesilovače MASER chlazené na 4,2 K

Pro příjem nejkritičtějších dálkových signálů vyvinula laboratoř JPL speciální kvantové zesilovače typu **MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)** s postupující vlnou (Traveling-Wave Maser, TWM).

Základem maseru je monokrystal syntetického rubínu (Al_2O_3 dopovaný ionty chromu Cr^{3+}) umístěný ve vlnovodu s pomalou vlnou a vystavený silnému homogennímu magnetickému poli supravodivého magnetu. Kvantové hladiny spinů iontů chromu jsou Zeemanovým jevem rozštěpeny na čtyři energetické stavy. Mikrovlnné čerpání (Pump) na vyšší frekvenci vytváří inverzi populací mezi vybranými hladinami.

Když mikrovlnný foton ze sondy vstoupí do rubínového krystalu, vyvolá stimulovanou emisi fotonů o přesně identické frekvenci, fázi a polarizaci. Protože zesílení probíhá na kvantové úrovni bez pohybu volných elektronů, maser negeneruje žádný klasický tepelný šum.

Celý maserový blok je uzavřen v kryostatu s uzavřeným heliovým cyklem Gifford-McMahon, kde je udržována teplota 4,2 K (-269°C). Vnitřní šumová teplota rubínového maseru v pásmu X dosahuje neuvěřitelných $T_{\text{maser}} \approx 2,5$ až 4 K, což se limitně blíží teoretické kvantové mezi šumu ($hf/k_B \approx 0,4$ K).

5.2 HEMT tranzistory: Polovodičová alternativa

Vedle maserů využívá DSN pro širší frekvenční pásma kryogenní polovodičové zesilovače na bázi tranzistorů s vysokou pohyblivostí elektronů – **HEMT (High Electron Mobility Transistor)** z arzenidu galia (GaAs) a fosfidu india (InP).

V HEMT tranzistoru se elektrony pohybují v heteropřechodovém dvourozměrném elektronovém plynu (2DEG), kde nedochází k rozptylu na ionizovaných nečistotách. Při ochlazení na teplotu kapalného helia (12 K) dosahují moderní InP HEMT zesilovače v pásmu Ka šumové teploty pod 15 K. Jejich hlavní výhodou oproti maserům je okamžitá šířka pásma přesahující 500 MHz a nižší provozní náročnost.

5.3 Fázované slučování polí antén (Antenna Arraying)

V situacích, kdy je signál na hranici detekovatelnosti – například při selhání hlavní antény sondy (jako u mise Galileo u Jupiteru v roce 1991), v kritických fázích přistání na Marsu nebo při rekordní vzdálenosti Voyageru 2 – spojuje DSN více antén do jediného **fázovaného interferometrického pole (Antenna Array)**.

Při fázovaném sloučení N identických antén sčítáme signály koherentně v reálném čase. Algoritmus pro každou anténu přesně kompenzuje časové zpoždění signálu způsobené geometrickým rozdílem polohy na Zemi (tzv. Delay Tracking) a fázový posuv (Phase Tracking):

$$s_{\text{sum}}(t) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot s_i(t - \tau_i) e^{-i\phi_i}$$

Zatímco užitečný signál se sčítá koherentně s amplitudou úměrnou N (výkon roste jako N^2), nekorelovaný tepelný šum z jednotlivých přijímačů se sčítá nekoherentně (výkon roste jako N). Výsledný poměr signálu k šumu roste lineárně s počtem antén:

$$\left(\frac{\text{SNR}}{\text{výsledný}} \right) = \sum_{i=1}^N \text{SNR}_i \xrightarrow{\text{pro identické antény}} N \cdot \text{SNR}_1$$

Sloučením jedné 70m antény a tří 34m antén v Canbeře získá DSN dodatečný zisk +3 dB, což odpovídá zdvojnásobení přenosové rychlosti dat z okraje Sluneční soustavy.

Část III: Meziplanetární navigace a trajektorie

Deep Space Network není pouhým gigantickým "telefonním kabelem" do vesmíru; je především nejpřesnějším geodetickým a navigačním přístrojem, jaký lidstvo kdy sestrojilo. Bez DSN by žádná sonda nedokázala zasáhnout gravitační koridor Marsu o šířce několika kilometrů ani provést složitou sérii gravitačních manévřů u měsíců Jupiteru a Saturnu.

V této části monografie podrobně rozebereme:

1. **Přesnou radiometrii:** Obousměrné měření vzdáleností (Range) pomocí kódových posloupností s přesností na centimetry a koherentní Dopplerovskou rychlostí.
2. **Diferenciální jednosměrnou interferometrii (Δ DOR),** která za pomoci kvasarů dosahuje nanoradiánové úhlové přesnosti.
3. **Planetární radar a radiovědu (Radio Science):** Využití výkonových klystronů pro mapování povrchu těles a sondování atmosfér planet.

Kapitola 6: Přesná radiometrie: Range a Doppler

Orbitální navigace v hlubokém vesmíru se opírá o dvě základní pozorovatelné veličiny: **vzdálenost sondy od pozemní stanice (Range, ρ)** a **její radiální rychlost ($\dot{\rho}$)**. Obě veličiny jsou měřeny na základě analýzy rádiového signálu s využitím atomových frekvenčních standardů na vodíkových maserech s relativní stabilitou 10^{-15} .

6.1 Obousměrný čas šíření (Two-Way Ranging)

Přímé měření vzdálenosti je realizováno metodou obousměrného šíření časově modulovaného signálu. Pozemní stanice vyšle signál v čase t_1 , transpondér na palubě sondy signál přijme a okamžitě jej odešle zpět k Zemi, kde je přijat v čase t_2 .

Geometrická vzdálenost sondy v době odrazu je dána vztahem:

$$\rho = \frac{c \cdot (t_2 - t_1 - \tau_{sc})}{2} - \Delta\rho_{trop} - \Delta\rho_{ion} - \Delta\rho_{rel}$$

kde τ_{sc} je známé vnitřní zpoždění elektroniky palubního transpondéru a korekční členy reprezentují zpoždění v troposféře, ionosféře a gravitačním poli (relativistické Shapirovo zpoždění).

Aby bylo možné jednoznačně změřit čas zpoždění v řádu hodin a současně dosáhnout centimetrové přesnosti, využívá DSN modulaci pseudonáhodnými binárními kódy (PN Ranging – posloupnosti s maximální délkou, Goldovy kódy) nebo tónové kódování (Sequential Ranging):

1. **Nízkofrekvenční tóny** (až jednotky Hertz) určují hrubou vzdálenost a eliminují nejednoznačnost počtu celých vlnových délek na dráze mnoha set milionů kilometrů.
2. **Vysokofrekvenční tóny** (typicky kolem 1 MHz) měří jemný fázový posuv s přesností na zlomky nanosekundy, což při rychlosti světla odpovídá přesnosti měření vzdálenosti v řádu **desítek centimetrů na vzdálenost miliardy kilometrů**.

6.2 Koherentní měření rychlosti přes Dopplerův jev

Radiální složka rychlosti sondy vůči zemské stanici se projevuje Dopplerovým frekvenčním posuvem. V **obousměrném koherentním režimu (Two-Way Doppler)** vysílá pozemní stanice nosnou frekvenci f_{up} odvozenou z vodíkového maseru.

Palubní transpondér sondy uzamkne svůj fázový závěs (PLL) na přijatý signál a vygeneruje downlinkovou nosnou frekvenci f_{down} , která je v přesném racionálním poměru $k = f_{down}/f_{up}$ (tzv. *Turnaround Ratio*, např. 880/749 pro pásmo X). Přijímač na Zemi pak porovnává přijatou frekvenci f_r s referenční frekvencí vysílače:

$$\Delta f = f_r - k f_{up} \approx -2k f_{up} \frac{\dot{\rho}}{c}$$

Díky dlouhodobé stabilitě vodíkových maserů dokáže DSN integrovat fázový posuv po dobu desítek sekund a měřit radiální rychlost sondy s přesností **lepších než 0,05 mm · s⁻¹** (padesát mikrometrů za sekundu!).

6.3 Relativistické korekce a Shapirovo zpoždění

Při navigaci v gravitačním poli Slunce nelze vystačit s newtonovskou fyzikou. Dle obecné teorie relativity způsobuje zakřivení prostoročasu hmotou Slunce dodatečné gravitační zpoždění signálu – tzv. **Shapirovo zpoždění**:

$$\Delta t_{\text{Shapiro}} = \frac{2GM_{\odot}}{c^3} (1 + \gamma) \ln \left(\frac{r_e + r_p + R}{r_e + r_p - R} \right)$$

kde $M_{\odot}$ je hmotnost Slunce, r_e a r_p jsou vzdálenosti Země a sondy od Slunce, R je vzdálenost mezi Zemí a sondou a γ je post-newtonovský parametr reprezentující míru zakřivení prostoru jednotkovou hmotností ($\gamma = 1$ v OTR).

Při horní konjunkci sondy (kdy paprsek tečuje sluneční disk) dosahuje Shapirovo zpoždění až 200 mikrosekund, což odpovídá zdánlivému posunu vzdálenosti o 30 kilometrů. Přesná radiometrie DSN u sondy Cassini v roce 2003 umožnila změřit parametr $\gamma = 1 + (2,1 \pm 2,3) \times 10^{-5}$, což představuje jeden z nejpřísnějších experimentálních testů Einsteinovy teorie relativity v historii fyziky.

Kapitola 7: Delta–DOR: Interferometrie na mezikontinentálních základnách

Ačkoli měření vzdálenosti (Range) a radiální rychlosti (Doppler) poskytuje extrémní přesnost podél zorného paprsku (Line-of-Sight), je z principu necitlivé na složku pohybu kolmou k tomuto paprsku (příčná poloha na obloze). Abychom určili trajektorii sondy v plném trojrozměrném prostoru, vyvinula NASA interferometrickou metodu **Delta–DOR** (Δ DOR – **Differential One–Way Ranging**).

7.1 Fyzikální princip Delta–DOR

Metoda Δ DOR využívá principů radioastronomické interferometrie na velmi dlouhých základnách (VLBI). Dvě geograficky vzdálené stanice DSN (např. Goldstone a Madrid, nebo Goldstone a Canberra) sledují současně stejný rádiový signál vysílaný sondou.

Vzdálenost mezi dvěma stanicemi tvoří geodetický vektor základny $\mathbf{B}$ o délce několika tisíc kilometrů. Vlnoplocha ze sondy dorazí k jedné stanici o malý časový okamžik τ_{sc} dříve než ke druhé:

$$c\tau_{sc} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{s}_{sc} + c\Delta\tau_{inst} + c\Delta\tau_{atm}$$

kde $\mathbf{s}_{sc}$ je jednotkový vektor směru k sondě, $\Delta\tau_{inst}$ představuje rozdíl vnitřních časových zpoždění v kabelech a přijímačích obou stanic a $\Delta\tau_{atm}$ je rozdíl zpoždění v troposféře a ionosféře.

Samotné měření τ_{sc} by však nestačilo, protože hodinové chyby atomových hodin a fluktuace atmosféry by degradovaly přesnost na desítky nanosekund.

7.2 Diferenciální kalibrace pomocí extragalaktických kvasarů

Klíčový trik metody Δ DOR spočívá v okamžité diferenciální kalibraci: během několika minut po zaměření sondy operátoři obě antény otočí na blízký **kvasar (astronomický rádiový zdroj)** ležící na obloze v úhlové vzdálenosti pouhých několika stupňů od sondy.

Kvasary jsou aktivní galaktická jádra vzdálená miliardy světelných let. Pro meziplanetární navigaci představují absolutně nehybné referenční body na nebeské sféře (definující mezinárodní nebeský referenční systém ICRF). Stanice změří časové zpoždění signálu kvasaru τ_{qsr} :

$$c\tau_{qsr} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{s}_{qsr} + c\Delta\tau_{inst} + c\Delta\tau_{atm}$$

Odečtením obou měření získáme **diferenciální zpoždění** (Δ DOR):

$$\Delta\tau = \tau_{sc} - \tau_{qsr} = \frac{\mathbf{B}}{c} \cdot (\mathbf{s}_{sc} - \mathbf{s}_{qsr})$$

V tomto diferenciálním rozdílu se vliv hodinových driftů, chyb v geodetických souřadnicích stanic a velká část atmosférických poruch **zcela vyruší**.

7.3 Dosažení nanoradiánové přesnosti

Změřením časového rozdílu $\Delta\tau$ s přesností na desítky pikosekund (10^{-11} s) na základně $B \approx 8000$ km dosahuje DSN úhlové přesnosti na obloze:

$$\Delta\theta = \frac{c \cdot \delta(\Delta\tau)}{B} \approx \frac{3 \times 10^8 \cdot 3 \times 10^{-11}}{8 \times 10^6} \approx 1,1 \times 10^{-9} \text{ rad} \approx 0,2 \text{ mas}$$

Nanoradiánová přesnost (1 nrad) odpovídá situaci, kdy bychom ze vzdálenosti 1000 kilometrů rozlišili minci o průměru 1 milimetru.

V meziplanetárním měřítku to znamená, že polohu sondy u Marsu (ve vzdálenosti 150 milionů km) dokáže DSN určit s příčnou prostorovou chybou **menší než 150 metrů**. Právě tato neuvěřitelná přesnost umožňuje navádět rovery Perseverance a Curiosity do úzkých přistávacích elips v kráterech Jezero a Gale.

Kapitola 8: Planetární radar a radioastronomie

Antény Deep Space Network slouží nejen jako komunikační uzly, nýbrž i jako aktivní vědecké instrumenty nejvyšší světové třídy. Zvláště 70metrová anténa DSS-14 v Goldstone disponuje unikátním radarovým vysílačem, který tvoří páteř planetární radarové astronomie.

8.1 Radar Goldstone Solar System Radar (GSSR)

Systém **GSSR (Goldstone Solar System Radar)** využívá 70m parabolu v kombinaci s masivním klystronovým vysílačem v pásmu X (8560 MHz), který do vesmíru pumpuje spojitý vysokofrekvenční výkon 450 kW.

Při radarovém sondování se uplatňuje radarová rovnice, kde výkon klesá se čtvrtou mocninou vzdálenosti ($P_r \propto r^{-4}$):

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma_{\text{RCS}}}{(4\pi)^3 r^4}$$

kde σ_{RCS} je efektivní radarová odrazná plocha tělesa (Radar Cross Section).

I přes extrémní útlum r^{-4} dokáže GSSR detekovat blízkozemní asteroidy (NEO) o průměru pouhých desítek metrů na vzdálenost milionů kilometrů. Analýzou Dopplerova rozšíření odraženého signálu (způsobeného rotací asteroidu) a zpoždění signálu (Delay-Doppler imaging) vytvářejí astronomové trojrozměrné modely těles s prostorovým rozlišením až 3,75 metru na pixel, což umožňuje odhalit binární asteroidy, balvany na povrchu a přesně určit riziko kolize se Zemí.

8.2 Radiověda (Radio Science): Atmosféry a prstence

Metoda **Radio Science** transformuje samotný komunikační paprsek sondy na vědeckou sondu:

- 1. Atmosférické zákryty (Occultations):** Když sonda zapadá za kotouč planety (např. Marsu či Venuše), prochází rádiový signál jednotlivými vrstvami atmosféry. Lom paprsku vyvolává frekvenční posuv a útlum amplitudy. Z inverzní Abelovy transformace Dopplerovských dat lze rekonstruovat vertikální profil hustoty, teploty a tlaku atmosféry s vertikálním rozlišením stovek metrů.
- 2. Sondování prstenců Saturnu:** Během mise Cassini vysílala sonda koherentní trojfrekvenční signál (S, X, Ka) přímo skrz prstence k anténám DSN. Z diferenciálního rozptylu na jednotlivých frekvencích určili astrofyzici distribuci velikosti ledových částic v prstencích od centimetrů po metry.
- 3. Gravimetrie planet a měsíců:** Nepatrné odchylky v trajektorii sondy měřené Dopplerovským posuvem odhalují lokální gravitační anomálie (tzv. mascony), slapové deformace měsíců a přítomnost podpovrchových oceánů kapalné vody na tělesech jako Europa či Enceladus.

Část IV: Kódování, zpracování signálu a optická budoucnost

S tím, jak se lidstvo chystá na stálou přítomnost na Měsíci a pilotované mise k Marsu, naráží klasická mikrovlnná telekomunikace na své fyzikální limity. V této části monografie prozkoumáme technologie, které definují 21. století v meziplanetárním spojení:

1. **Matematickou teorii moderních samoopravných kódů:** Od historických kódů Reed–Solomon a Viterbiho konvolučních dekodérů až po Turbo kódy a revoluční kódy LDPC (Low-Density Parity-Check), které pracují na pouhý zlomek decibelu od teoretické Shannonovy meze.
2. **Optickou laserovou komunikaci v hlubokém vesmíru (DSOC):** Přenášení gigabitových objemů dat na vlnové délce 1550 nm, technologie fotonového čítače a supravodivých detektorů SNSPD.
3. **Zpožděně tolerantní síť (DTN):** Architekturu meziplanetárního internetu, která nahrazuje křehký pozemský protokol TCP/IP novým protokolem Bundle Protocol schopným překlenout hodiny zpoždění a plánované výpadky spojení.

Kapitola 9: Pokročilé samoopravné kódy a modulace

V prostředí, kde je signál slabší než šumové pozadí ($P_r \ll N_0 B$), není možné přijmout ani jediný bit bez sofistikovaného matematického kódování s dopřednou opravou chyb (Forward Error Correction, FEC). Každý ušetřený decibel v kódovém zisku (Coding Gain) má hodnotu stovek milionů dolarů, neboť odpovídá zdvojnásobení plochy pozemní antény nebo zdvojnásobení výkonu radioizotopového zdroje na sondě.

9.1 Vývoj kódování v hlubokém vesmíru: Od Marineru po Cassini

Historie kosmického kódování dokumentuje dramatické přibližování k Shannonovu limitu:

1. **Biorthogonální kód (32, 6) mise Mariner 6 a 7 (1969):** Přenášel 6 informačních bitů pomocí 32 kódových symbolů. Poskytoval kódový zisk přibližně 2,2 dB oproti nekódovanému přenosu.
2. **Zřetěžený kód Reed–Solomon + Viterbi (mise Voyager a Galileo):** Standard NASA 80. a 90. let. Skládal se z vnějšího algebraického blokového kódu Reed–Solomon (255, 223) přes Galoisovo pole $GF(2^8)$, který exceloval v opravě shluků chyb (burst errors), a vnitřního konvolučního kódu s kódovým poměrem $r = 1/2$ a délkou omezení $K = 7$, dekódovaného Viterbiho algoritmem s měkkým rozhodováním. Tento zřetěžený systém vyžadoval $E_b/N_0 \approx 2,5$ dB pro dosažení bitové chybovosti $BER = 10^{-5}$ (kódový zisk přes 7 dB).
3. **Turbo kódy (mise Mars Reconnaissance Orbiter 2005):** Objeveny Berrouem, Glavieuxem a Thitimajshimou v roce 1993. Využívají paralelní zřetěžení rekurzivních systematických konvolučních kódů oddělených pseudonáhodným prokladačem (interleaverem) a iterativní dekódování s výměnou vnější informace (MAP algoritmus BCJR). MRO díky nim snížil požadované E_b/N_0 na 1,2 dB a posílá z Marsu terabajty snímků v rozlišení 25 cm.

9.2 Revoluce LDPC (Low–Density Parity–Check) kódů

Pro mise 20. a 30. let 21. století (Artemis, Europa Clipper, Roman Space Telescope) přijala mezinárodní poradní skupina CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) standard **LDPC kódů**.

Kódy LDPC, původně navržené Robertem Gallagerem v jeho dizertaci na MIT v roce 1960, jsou lineární blokové kódy definované řídkou kontrolní maticí parity $\mathbf{H}$ o rozměrech $(n - k) \times n$, v níž je naprostá většina prvků rovna nule:

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{c}^T = \mathbf{0} \pmod{2}$$

Strukturu kódu lze reprezentovat bipartitním Tannerovým grafem skládajícím se z n uzlů proměnných (Variable Nodes) a $m = n - k$ uzlů kontrol parity (Check Nodes).

Dekódování probíhá pomocí algoritmu **šíření věrohodností (Belief Propagation)** nebo jeho zjednodušené varianty **Sum–Product**:

1. Uzly proměnných si s uzly kontrol parity iterativně vyměňují logaritmy poměru věrohodností (Log–Likelihood Ratios, LLR).
2. Dekodér využívá měkké informace z demodulátoru o pravděpodobnosti přijetí nuly či jedničky.

Standard CCSDS definuje sadu kvazicyklických LDPC kódů (AR4JA – Accumulate–Repeat–by–4–Jagged–Accumulate) s kódovými poměry $r = 1/2, 2/3, 4/5$ a blokovými délkami $n = 1024, 4096, 16384$ bitů. Tyto kódy dosahují spolehlivého přenosu při $E_b/N_0 \approx 0,6$ až 0,9 dB, což je pouhých 0,7 dB **od teoretické hranice nemožného**.

9.3 Modulační schémata v hlubokém vesmíru

V kanálech s omezeným výkonem volí DSN modulační schémata maximalizující energetickou účinnost:

- **BPSK (Binary Phase Shift Keying):** Fázový posuv nosné vlny o 0° nebo 180° . Nejrobustnější modulace pro extrémně slabé signály (Voyager, New Horizons).
- **QPSK a OQPSK (Offset QPSK):** Čtyřstavová fázová modulace přenášející 2 bity na symbol. Posun kvadrurní složky o půl symbolu eliminuje fázové přechody přes nulu, což zamezuje nelineárnímu zkreslení ve vysokovýkonových saturovaných palubních zesilovačích TWT.
- **GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying):** Modulace s konstantní obálkou a gaussovskou filtrací, která minimalizuje vyzařování do sousedních kanálů a splňuje přísné spektrální masky ITU.

Kapitola 10: Deep Space Optical Communications (DSOC)

Zatímco rádiové frekvence v pásmu Ka (32 GHz) představují vrchol mikrovlnné technologie, optická laserová komunikace otevírá zcela novou dimenzi přenosových kapacit. Přechod z mikrovln na vlnovou délku blízkého infračerveného záření $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ($f \approx 193 \text{ THz}$) znamená nárůst nosné frekvence o čtyři řády (faktor 6000).

10.1 Fyzika fotonového paprsku: Od mikrovln k laserům

Dle fundamentálního difrakčního vztahu je úhlová šířka svazku vyzařovaného aperturou o průměru D přímo úměrná vlnové délce:

$$\theta_{\text{div}} \approx 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Srovnáme dvě antény:

1. **Mikrovlnná parabola pásma Ka** ($D = 3 \text{ m}$, $\lambda = 9 \text{ mm}$):

$$\theta_{\text{Ka}} \approx 1,22 \frac{0,009}{3} \approx 3,66 \times 10^{-3} \text{ rad} \approx 0,21^\circ \approx 755 \text{ úhlových vteřin}$$

Ve vzdálenosti Marsu ($1 \text{ AU} \approx 150 \times 10^6 \text{ km}$) vytvoří tento svazek stopu o průměru přibližně 550000 km (více než průměr oběžné dráhy Měsíce!). Většina energie je beznadějně vyplývána v prázdném prostoru kolem Země.

1. **Laserový teleskop DSOC** ($D = 22 \text{ cm}$, $\lambda = 1550 \text{ nm} = 1,55 \times 10^{-6} \text{ m}$):

$$\theta_{\text{laser}} \approx 1,22 \frac{1,55 \times 10^{-6}}{0,22} \approx 8,6 \times 10^{-6} \text{ rad} \approx 1,77 \text{ úhlové vteřiny}$$

Ve vzdálenosti Marsu vytvoří tento laserový paprsek stopu o průměru pouhých 1300 km. Celý energetický tok je koncentrován do plochy menší než zemský kontinent, což přináší energetické zvýhodnění o více než +40 dB!

10.2 Mise Psyche a experiment DSOC (2023–2026)

Technologii DSOC prakticky demonstrovala mise NASA **Psyche**, vypuštěná v říjnu 2023 k stejnojmennému kovovému asteroidu v hlavním pásu.

Palubní laserový vysílač mise Psyche:

- **Teleskop:** Zrcadlový systém o průměru 22 cm,
- **Laser:** Vlákenný erbový laser s průměrným výkonem pouhých 5 W na vlnové délce 1550 nm,
- **Stabilizace:** Magneticky levitující platforma kompenzující mikrovibrace sondy s přesností na zlomky mikroradiánu.

Pozemní přijímací segment:

- Využívá slavný **Haleův teleskop o průměru 5,08 metru** na observatoři Palomar v Kalifornii.
- V ohnisku teleskopu je umístěn kryogenní detektor **SNSPD (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector)** chlazený na méně než 1 K, schopný registrovat dopad jednotlivých fotonů s časovým rozlišením pod 50 pikosekund a kvantovou účinností přes 80%.

Výsledky experimentu překonaly veškerá očekávání:

- V prosinci 2023 bylo ze vzdálenosti 31 milionů kilometrů (80krát dále než Měsíc) přeneseno 15sekundové video ve vysokém rozlišení Ultra-HD rychlostí 267 Mbps.

- V dubnu 2024 ze vzdálenosti 226 milionů kilometrů (vzdálenost Marsu) udržel systém spojení rychlostí 25 Mbps, což je 10krát až 100krát více než dosavadní mikrovlnné rekordy.

10.3 Úskalí laserové komunikace: Pointace a atmosféra

Laserová komunikace však přináší extrémní inženýrské výzvy:

1. **Bod předstihu (Point-Ahead Angle):** Paprsek je tak úzký (1,7 arcsec), že operátoři nemohou mířit na Zemi v místě, kde ji vidí. Během doby letu světla (např. 15 minut) se Země posune po své oběžné dráze o desítky tisíc kilometrů. Sonda musí mířit do prázdného prostoru v přesně vypočteném úhlu předstihu s přesností na mikroradiány.
2. **Atmosférická turbulence:** Pozemní přijímací teleskopy vyžadují adaptivní optiku s deformovatelnými zrcadly, která kompenzují vlnoplochové deformace zemské atmosféry.
3. **Zatažená obloha:** Na rozdíl od mikrovln nemůže laser proniknout hustou oblačností. Budoucí optická síť DSN proto vyžaduje diverzitní síť optických pozemních stanic umístěných ve vysokohorských pouštních lokalitách (Palomar, Mauna Kea, Chile, Kanárské ostrovy).

Kapitola 11: Zpožděně tolerantní sítě (DTN) a meziplanetární internet

Pozemský internet je vybudován na předpokladu nepřetržitého obousměrného spojení s nízkou latencí (desítky milisekund). Protokol **TCP (Transmission Control Protocol)** vyžaduje pro navázání spojení trojcestný handshaking (SYN, SYN-ACK, ACK) a v případě nepotvrzení paketu během několika stovek milisekund předpokládá přetížení sítě a radikálně omezí přenosovou rychlost.

V hlubokém vesmíru, kde zpoždění dosahuje desítek minut a rotace planet pravidelně přerušuje viditelnost na celé hodiny, pozemský zásobník protokolů TCP/IP naprosto selhává.

11.1 Architektura Store-and-Forward a Bundle Protocol

Pro vyřešení tohoto problému vyvinul Vint Cerf (jeden z otců původního internetu) ve spolupráci s JPL novou síťovou architekturu: **Delay-Tolerant Networking (DTN)**, standardizovanou konsorciem IETF a CCSDS pod označením **Bundle Protocol (RFC 5050 a RFC 9171)**.

Základní principy DTN:

1. **Architektura ulož a předej (Store-and-Forward):** Každý uzel sítě (rover na povrchu Marsu, orbitální družice na oběžné dráze, pozemní stanice DSN) disponuje velkokapacitní perzistentní pamětí (Flash, SSD). Když uzel obdrží datový balík (*Bundle*), uloží jej na disk a čeká na otevření komunikačního okna s dalším uzlem. Data zůstávají bezpečně uložena celé hodiny nebo dny, aniž by došlo k vypršení timeoutu.
2. **Přenos správy (Custody Transfer):** Odesílající uzel nesmaže data ze svého úložiště, dokud nepřijme kryptografické potvrzení, že následující uzel úspěšně převzal odpovědnost (*Custody*) za další doručení.
3. **Nezávislost na fyzické vrstvě:** Bundle Protocol sedí nad transportními vrstvami a dokáže bezproblémově kombinovat mikrovlnné spoje DSN, optické laserové linky i lokální Wi-Fi sítě mezi astronautem a roverem.

11.2 Meziplanetární páteřní síť Mars–Měsíc–Země

DTN transformuje meziplanetární telekomunikace z izolovaných linek "bod-bod" na skutečnou **meziplanetární páteřní síť (Interplanetary Internet)**:

- Rover Perseverance na Marsu nemusí čekat na přímou viditelnost Země na obří 70m anténu. Přes lokální UHF vysílač o nízkém příkonu odešle data družici Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) nebo Odyssey prolétající nad hlavou.
- Družice data zbufferuje a při optimální poloze je odešle v pásmu Ka na Zemi.
- Pozemní stanice DSN v Madridu data přijme a přes pozemní optická vlákna je okamžitě doručí vědeckému týmu do Pasadena.

S programem **Artemis** a plánovanou lunární orbitální stanicí **Gateway** se DTN stává mezinárodním standardem pro veškerou lunární a marsovskou infrastrukturu.

Část V: Přílohy a výpočetní materiály

Tato závěrečná část monografie poskytuje rigorózní matematický, výpočetní a encyklopedický aparát, který slouží studentům a inženýrům k samostatnému řešení úloh z oblasti meziplanetárních telekomunikací a astrodynamiky:

- **Dodatek A: Matematická odvození:** Exaktní odvození Friisovy rovnice z Poyntingova vektoru, vlnové impedance vakua, odvození relativistického Dopplerova posuvu a Shapirova gravitačního zpoždění.
- **Dodatek B: Vědecké skripty v Pythonu:** Implementace nástrojů pro orbitální geometrii DSN s využitím balíčku SPICE (Spiceypy) a simulátor telekomunikační linky s adaptivní modulací.
- **Dodatek C: Sbírka 15 řešených úloh:** Komplexní sbírka úloh pokrývající link budget Voyageru, útlum deštěm v pásmu Ka, rozlišení radarové astronomie a přesnost navigace Delta-DOR.
- **Dodatek D: Encyklopedický glosář a katalog pozemních stanic:** Technický přehled všech anténních systémů sítí DSN (NASA), ESTRACK (ESA) a WACS/CDSN.

Dodatek A: Matematická odvození: Friisova rovnice a relativistický Doppler

Tento dodatek obsahuje exaktní matematická odvození klíčových fyzikálních vztahů využívaných v meziplanetárním telekomunikačním inženýrství.

A.1 Odvození Friisovy přenosové rovnice z Poyntingova vektoru

Uvažujme vysílač o vysokofrekvenčním výkonu P_t , který je bezztrátově přiveden do antény s vyzařovacím diagramem popsaným funkcí zisku $G_t(\theta, \phi)$. Dle Poyntingova teorému je hustota toku zářivé energie $\mathbf{S}$ v homogenním izotropním vakuu dána vektorovým součinem:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

Ve vlnové zóně (Far-Field, Fraunhoferova oblast $r > 2D^2/\lambda$) jsou vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{H}$ vzájemně kolmé a vázané vlnovou impedancí volného prostoru $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 376,73 \Omega$. Časově středovaná velikost Poyntingova vektoru ve vzdálenosti r ve směru maxima vyzařování činí:

$$\langle S \rangle = \frac{|\mathbf{E}|^2}{2Z_0} = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2}$$

Přijímací anténa je charakterizována efektivní zachytnou plochou $A_{\text{eff}}(\theta, \phi)$. Výkon P_r přivedený do přizpůsobené zátěže přijímače je integrálem hustoty toku přes efektivní plochu:

$$P_r = \langle S \rangle \cdot A_{\text{eff}} = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} A_{\text{eff}}$$

Z fundamentálního teorému reciprocity elektromagnetických polí a termodynamické rovnováhy černého tělesa v dutině (odvozeného H. A. Wheelerem) plyne univerzální vztah mezi ziskem G_r a efektivní aperturou A_{eff} pro libovolnou anténu:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

Dosažením zachytné plochy do výrazu pro přijatý výkon získáme kanonický tvar **Friisovy rovnice**:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

kde bezrozměrný člen $L_{\text{FS}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$ reprezentuje geometrický útlum volného prostoru (Free-Space Path Loss).

A.2 Odvození relativistického podélného Dopplerova jevu

Předpokládejme pozorovatele na Zemi a zdroj (sondu) pohybující se radiální rychlostí v podél spojnice ve vztažné soustavě pozorovatele. Nechť zdroj vysílá signál s vlastní periodou T_0 (vlastní frekvence $f_0 = 1/T_0$).

Dle speciální teorie relativity je časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími vlnoplochami v soustavě pozorovatele dilatován Lorentzovým faktorem γ :

$$T' = \gamma T_0 = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

kde $\beta = v/c$.

Během periody T' se zdroj posune o vzdálenost $\Delta x = vT'$. Druhá vlnoplocha proto musí urazit dodatečnou vzdálenost Δx , což zabere čas $\Delta t = \Delta x/c = \beta T'$. Perioda T_r přijímaná pozorovatelem na Zemi je součtem obou časů:

$$T_r = T' + \beta T' = T'(1 + \beta) = T_0 \frac{1 + \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = T_0 \frac{1 + \beta}{\sqrt{(1 - \beta)(1 + \beta)}} = T_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

Inverzí periody získáme přesný relativistický vztah pro přijatou frekvenci:

$$f_r = f_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Pro nerelativistické rychlosti ($\beta \ll 1$) rozvineme odmocninu do Taylorovy řady:

$$\sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} = (1 - \beta)^{1/2} (1 + \beta)^{-1/2} \approx \left(1 - \frac{1}{2}\beta - \frac{1}{8}\beta^2\right) \left(1 - \frac{1}{2}\beta + \frac{3}{8}\beta^2\right) \approx 1 - \beta + \frac{1}{2}\beta^2$$

Frekvenční posuv $\Delta f = f_r - f_0$ pak v prvním řádu odpovídá klasickému Dopplerovu vzorci $\Delta f \approx -f_0 \frac{v}{c}$, zatímco člen druhého řádu $+\frac{1}{2}f_0\beta^2$ reprezentuje relativistický příspěvek dilatace času (transverzální Dopplerův jev), který musí navigační software DSN rutinně kompenzovat.

Dodatek B: Vědecké skripty v Pythonu pro geometrii DSN a orbitální linku

Tento dodatek přináší kompletní, otestované skripty v jazyce Python využívající vědecké knihovny NumPy, SciPy a Astropy pro modelování geometrie sítě DSN a výpočet viditelnosti těles.

B.1 Výpočet elevace a viditelnosti sondy z komplexů Goldstone, Madrid a Canberra

Následující skript využívá knihovnu ``astropy.coordinates`` k výpočtu topocentrických souřadnic (azimut a elevace) meziplanetární sondy v reálném čase z jednotlivých komplexů sítě DSN:

```

import numpy as np
import astropy.units as u
from astropy.time import Time
from astropy.coordinates import EarthLocation, SkyCoord, AltAz

<h1 id="geodeticke-souradnice-komplexu-dsn-wgs84">Geodetické souřadnice komplexů DSN (WGS84)</h1>
dsn_stations = {
    'Goldstone (DSS-14)': EarthLocation(lat=35.4267<em>u.deg, lon=-116.8900</em>u.deg,
height=1036*u.m),
    'Madrid (DSS-63)': EarthLocation(lat=40.4314<em>u.deg, lon=-4.2480</em>u.deg,
height=835*u.m),
    'Canberra (DSS-43)': EarthLocation(lat=-35.4014<em>u.deg, lon=148.9817</em>u.deg,
height=691*u.m)
}

<h1 id="cas-pozorovani-utc">Čas pozorování (UTC)</h1>
obs_time = Time('2026-11-01 12:00:00', scale='utc')

<h1 id="ekvatorialni-souradnice-sondy-napr-mars-perseverance-v-j2000">Ekvatoriální souřadnice sondy (např. Mars / Perseverance v J2000)</h1>
<h1 id="rektascenze-a-deklinace">Rektascenze a Deklinace</h1>
target = SkyCoord(ra=142.55<em>u.deg, dec=15.20</em>u.deg, frame='icrs')

print(f"=====")
print(f"STAV VIDITELNOSTI DSN PRO ČAS: {obs_time.iso} UTC")
print(f"Cíl: RA = {target.ra.to_string(unit=u.hourangle, precision=2)}, Dec = {target.dec.to_string(unit=u.deg, precision=2)}")
print(f"=====")

for name, location in dsn_stations.items():
    altaz_frame = AltAz(obstime=obs_time, location=location)
    target_altaz = target.transform_to(altaz_frame)

    elev = target_altaz.alt.deg
    azim = target_altaz.az.deg
    status = "AKTIVNÍ VIDITELNOST (TRACKING)" if elev >= 10.0 else "POD HORIZONTEM"

    print(f"Stanice: {name:<20} | Elevace: {elev:>6.2f}° | Azimut: {azim:>6.2f}° | {status}")

```

B.2 Simulace adaptivního kódování v pásmu Ka za proměnného počasí

Skript modeluje dynamické přizpůsobení přenosové rychlosti DSN v pásmu Ka při přechodu dešťové fronty:

```

import numpy as np

def calculate_ka_capacity(P_tx_watts, d_km, rain_attenuation_db):
    # Vypočíte kapacitu linky pásma Ka v závislosti na dešťovém útlumu.
    f = 32.0e9          # 32 GHz
    c = 299792458.0
    lam = c / f
    r = d_km * 1000.0

    G_tx = 10**(45.0 / 10.0)    # 3m anténa sondy (~45 dBi)
    G_rx = 10**(78.5 / 10.0)    # 34m BWG anténa DSN (~78.5 dBi)

    # Útlum volného prostoru
    L_fs = (lam / (4.0 * np.pi * r))**2

    # Šumová teplota: jasná obloha 25 K, déšť zvyšuje šum oblohy
    L_rain_lin = 10**(-rain_attenuation_db / 10.0)
    T_sky = 15.0 + 275.0 * (1.0 - L_rain_lin)
    T_sys = T_sky + 18.0      # +18 K LNA a feed

    N0 = 1.380649e-23 * T_sys
    P_rx = P_tx_watts * G_tx * G_rx * L_fs * L_rain_lin

    # Požadavek Eb/N0 = 2.0 dB pro LDPC
    Eb_N0_req = 10**(2.0 / 10.0)
    R_max = P_rx / (N0 * Eb_N0_req)
    return P_rx, T_sys, R_max

dist = 220e6 # 220 mil. km (Mars)
attenuations = [0.1, 0.5, 1.5, 3.0, 6.0] # Jasno až hustý déšť [dB]

print(f'{"Počasí":<12} | {"Útlum [dB]":<10} | {"T_sys [K]":<10} | {"P_rx [dBm]":<12} | {"Max Rychlost":<15}')
print("-" * 68)
for att in attenuations:
    label = "Jasno" if att < 0.3 else ("Oblačno" if att < 1.0 else ("Déšť" if att < 4.0 else "Průtrž"))
    p_rx, t_sys, r_max = calculate_ka_capacity(35.0, dist, att)
    p_rx_dbm = 10.0 * np.log10(p_rx * 1e3)
    print(f'{label:<12} | {att:<10.1f} | {t_sys:<10.1f} | {p_rx_dbm:<12.2f} | {r_max/1e3:>10.2f} kbps')

```

Dodatek C: Sbírka 15 řešených úloh

Tato sbírka obsahuje 15 rigorózně vyřešených úloh z telekomunikačního inženýrství, mikrovlnné elektrodynamiky, teorie informace a meziplanetární navigace sítě Deep Space Network.

Úloha 1: Volný útlum prostoru pro sondu Voyager 1

Zadání: Sonda Voyager 1 se nachází ve vzdálenosti $r = 163 \text{ AU}$ ($24,38 \times 10^9 \text{ km}$). Vypočtete útlum volného prostoru L_{FS} v decibelech pro nosnou frekvenci pásma X $f = 8,446 \text{ GHz}$. **Řešení:** Vlnová délka je $\lambda = c/f = 299792458/(8,446 \times 10^9) \approx 0,03550 \text{ m}$. Útlum volným prostorem:

$$L_{\text{FS}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 = \left(\frac{0,03550}{4\pi \times 24,38 \times 10^{12}} \right)^2 \approx 1,343 \times 10^{-31}$$

V decibelech:

$$L_{\text{FS}} [\text{dB}] = 10 \log_{10}(1,343 \times 10^{-31}) \approx -308,72 \text{ dB}$$

Signál zeslábně o více než 308 decibelů.

Úloha 2: Zisk 70metrové parabolické antény DSN

Zadání: Vypočtete zisk G a šířku hlavního vyzařovacího svazku v polovičním výkonu (HPBW) pro anténu DSS-14 o průměru $D = 70 \text{ m}$ v pásmu X ($f = 8,42 \text{ GHz}$), je-li aperturová účinnost $\eta = 0,70$. **Řešení:** Vlnová délka $\lambda = c/f = 0,03560 \text{ m}$.

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = 0,70 \times \left(\frac{\pi \times 70}{0,03560} \right)^2 \approx 0,70 \times (6177,4)^2 \approx 2,671 \times 10^7$$

V decibelech: $G [\text{dBi}] = 10 \log_{10}(2,671 \times 10^7) \approx 74,27 \text{ dBi}$. Šířka svazku:

$$\text{HPBW} \approx 1,02 \frac{\lambda}{D} \approx 1,02 \frac{0,03560}{70} \approx 5,187 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 0,0297^\circ \approx 1,78 \text{ úhlové minuty}$$

Úloha 3: Výkon signálu zachyceného ze sondy Voyager 1

Zadání: Voyager 1 vysílá výkon $P_t = 22,4 \text{ W}$ přes parabolu o zisku $G_t = 48,2 \text{ dBi}$. Pozemní stanice využívá 70m anténu se ziskem $G_r = 74,3 \text{ dBi}$. Ztráty v atmosféře a pointaci činí $L_{\text{misc}} = -1,2 \text{ dB}$. Určete celkový přijatý výkon P_r v dBm a ve wattech. **Řešení:** Balance v logaritmickém tvaru:

$$P_r [\text{dBW}] = P_t [\text{dBW}] + G_t [\text{dBi}] + G_r [\text{dBi}] + L_{\text{FS}} [\text{dB}] + L_{\text{misc}} [\text{dB}]$$

$P_t [\text{dBW}] = 10 \log_{10}(22,4) \approx +13,50 \text{ dBW}$. Z Úlohy 1 máme $L_{\text{FS}} \approx -308,72 \text{ dB}$.

$$P_r [\text{dBW}] = 13,50 + 48,20 + 74,30 - 308,72 - 1,20 = -173,92 \text{ dBW}$$

Převod na dBm (+30 dB): $P_r = -143,92 \text{ dBm}$ vztaženo k izotropnímu přijímači, po odečtení linkových rezerv $P_r \approx -160,5 \text{ dBm}$ (ve wattech $P_r \approx 4,06 \times 10^{-21} \text{ W}$).

Úloha 4: Šumová spektrální hustota kryogenního systému

Zadání: Přijímací systém 70m antény DSN má za jasného počasí systémovou šumovou teplotu $T_{\text{sys}} = 17,5 \text{ K}$. Vypočtete šumovou výkonovou spektrální hustotu N_0 v W/Hz a dBW/Hz. **Řešení:**

$$N_0 = k_B T_{\text{sys}} = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 17,5 \text{ K} \approx 2,416 \times 10^{-22} \text{ W/Hz}$$

V decibelech:

$$N_0 [\text{dBW/Hz}] = 10 \log_{10}(2,416 \times 10^{-22}) \approx -216,17 \text{ dBW/Hz}$$

Úloha 5: Maximální přenosová rychlost pro Voyager 1

Zadání: Pro signál z Úlohy 3 ($P_r = -173,92 \text{ dBW}$) a šum z Úlohy 4 ($N_0 = -216,17 \text{ dBW/Hz}$) určete maximální přenosovou rychlost R , požaduje-li kód Reed-Solomon + Viterbi poměr $E_b/N_0 = 2,6 \text{ dB}$ a inženýrská rezerva činí $3,0 \text{ dB}$. **Řešení:** Celkový požadovaný poměr: $(E_b/N_0)_{\text{req}} = 2,6 + 3,0 = 5,6 \text{ dB}$. V decibelech platí:

$$R [\text{dB-Hz}] = P_r [\text{dBW}] - N_0 [\text{dBW/Hz}] - (E_b/N_0)_{\text{req}} [\text{dB}].$$

$$R [\text{dB-Hz}] = -173,92 - (-216,17) - 5,60 = 42,25 - 5,60 = 36,65 \text{ dB-Hz}$$

Lineární rychlost: $R = 10^{36,65/10} \approx 4624 \text{ bps}$. (V reálném provozu Voyager 1 vysílá na záložní rychlosti 160 bps pro zajištění extrémní rezervy).

Úloha 6: Shannonova mez kapacity kanálu

Zadání: Kanál DSN má dostupnou šířku pásma $B = 10 \text{ MHz}$. Přijatý signál má výkon $P_r = 10^{-18} \text{ W}$ a šumová teplota je $T_{\text{sys}} = 20 \text{ K}$. Vypočítejte teoretickou maximální Shannonovu kapacitu C . **Řešení:** Šumová hustota:

$$N_0 = k_B T = 1,38 \times 10^{-23} \times 20 = 2,76 \times 10^{-22} \text{ W/Hz. Celkový šumový výkon v pásmu:}$$

$$P_N = N_0 B = 2,76 \times 10^{-22} \times 10^7 = 2,76 \times 10^{-15} \text{ W. Poměr SNR} = P_r/P_N = 10^{-18}/(2,76 \times 10^{-15}) \approx 3,62 \times 10^{-4}.$$

Jelikož $\text{SNR} \ll 1$, využijeme aproximaci $\ln(1+x) \approx x$:

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) = \frac{B}{\ln 2} \ln(1 + \text{SNR}) \approx \frac{B \cdot \text{SNR}}{\ln 2} = \frac{P_r}{N_0 \ln 2}$$

$$C \approx \frac{10^{-18}}{2,76 \times 10^{-22} \times 0,69315} \approx 5227 \text{ bit/s} \approx 5,23 \text{ kbps}$$

Úloha 7: Plazmové zpoždění signálu v meziplanetárním prostoru

Zadání: Signál v pásmu S ($f_S = 2,3 \text{ GHz}$) a v pásmu X ($f_X = 8,4 \text{ GHz}$) prochází slunečním větrem s celkovým elektronovým obsahem $\text{TEC} = 10^{18} \text{ m}^{-2}$. Vypočítejte časové zpoždění Δt pro obě frekvence a jejich rozdíl $\delta(\Delta t)$. **Řešení:** Vzorec pro zpoždění: $\Delta t = \frac{e^2 \text{TEC}}{8\pi^2 \epsilon_0 m_e c f^2} = \frac{40,31 \times \text{TEC}}{c f^2}$. Pro pásmo S ($f_S = 2,3 \times 10^9 \text{ Hz}$):

$$\Delta t_S = \frac{40,31 \times 10^{18}}{3 \times 10^8 \times (2,3 \times 10^9)^2} \approx \frac{40,31 \times 10^{18}}{1,587 \times 10^{27}} \approx 25,4 \text{ ns}$$

Pro pásmo X ($f_X = 8,4 \times 10^9 \text{ Hz}$):

$$\Delta t_X = \frac{40,31 \times 10^{18}}{3 \times 10^8 \times (8,4 \times 10^9)^2} \approx 1,9 \text{ ns}$$

Diferenciální zpoždění činí $\delta(\Delta t) = 25,4 - 1,9 = 23,5 \text{ ns}$. Změřením tohoto rozdílu určí DSN hodnotu TEC a eliminuje chybu z měření vzdálenosti (odpovídající 7 metrům).

Úloha 8: Přesnost měření rychlosti přes Dopplerův posuv

Zadání: Stabilita vodíkového maseru DSN umožňuje změřit frekvenční posuv v pásmu X ($f = 8,4 \text{ GHz}$) s přesností $\delta f = 0,001 \text{ Hz}$ při integrační době 60 sekund. Jaké chybě v radiální rychlosti sondy δv to odpovídá v obousměrném koherentním režimu? **Řešení:** Vztah pro obousměrný Dopplerův posuv: $\Delta f = -2f \frac{v}{c}$. Chyba v určení rychlosti:

$$\delta v = \frac{c \cdot \delta f}{2f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 0,001 \text{ Hz}}{2 \times 8,4 \times 10^9 \text{ Hz}} = \frac{3 \times 10^5}{1,68 \times 10^{10}} \approx 1,79 \times 10^{-5} \text{ m/s} \approx 0,018 \text{ mm/s}$$

DSN měří radiální rychlost sondy s přesností na 18 mikrometrů za sekundu.

Úloha 9: Úhlové rozlišení interferometrie Δ DOR

Zadání: Základna mezi stanicemi Goldstone a Madrid činí $B = 8400 \text{ km}$. Korelátor VLBI určí diferenciální zpoždění $\Delta\tau$ s přesností $\delta\tau = 30 \text{ ps}$ ($30 \times 10^{-12} \text{ s}$). Vypočtete úhlovou přesnost $\Delta\theta$ v nanoradiánech a milivteřinách (mas). **Řešení:**

$$\Delta\theta = \frac{c \cdot \delta\tau}{B} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 30 \times 10^{-12} \text{ s}}{8,4 \times 10^6 \text{ m}} = \frac{0,009 \text{ m}}{8,4 \times 10^6 \text{ m}} \approx 1,07 \times 10^{-9} \text{ rad} = 1,07 \text{ nrad}$$

Převod na úhlové milivteřiny: $1 \text{ rad} \approx 206265 \times 10^3 \text{ mas}$.

$$\Delta\theta = 1,07 \times 10^{-9} \times 2,06265 \times 10^8 \approx 0,22 \text{ mas}$$

Úloha 10: Radarová rovnice a odraz od asteroidu

Zadání: Radar GSSR v Goldstone ($P_t = 450 \text{ kW}$, $G = 74 \text{ dBi}$, $f = 8560 \text{ MHz}$) ozařuje blízkozemní asteroid ve vzdálenosti $r = 1,5 \times 10^6 \text{ km}$ ($1,5 \times 10^9 \text{ m}$). Radarový průřez asteroidu je $\sigma_{\text{RCS}} = 0,1 \text{ km}^2 = 10^5 \text{ m}^2$. Vypočtete přijatý odražený výkon P_r . **Řešení:** Vlnová délka $\lambda \approx 0,0350 \text{ m}$. Zisk $G = 10^{7,4} \approx 2,51 \times 10^7$.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} = \frac{450 \times 10^3 \times (2,51 \times 10^7)^2 \times 0,035^2 \times 10^5}{(4\pi)^3 \times (1,5 \times 10^9)^4}$$

Čitatel: $4,5 \times 10^5 \times 6,30 \times 10^{14} \times 1,225 \times 10^{-3} \times 10^5 \approx 3,47 \times 10^{22}$. Jmenovatel: $1984,4 \times 5,06 \times 10^{36} \approx 1,00 \times 10^{40}$.

$$P_r \approx \frac{3,47 \times 10^{22}}{1,00 \times 10^{40}} \approx 3,47 \times 10^{-18} \text{ W} = 3,47 \text{ aW} \approx -144,6 \text{ dBm}$$

Signál je bezpečně detekovatelný nízkošumovým přijímačem DSN.

Úloha 11: Zisk z přechodu na pásmo Ka

Zadání: Sonda má anténu o pevném průměru $D = 2,4 \text{ m}$ a pozemní stanice využívá 34m anténu. Porovnejte ideální difrakční zisk linky v pásmu X (8,4 GHz) a pásmu Ka (32 GHz). **Řešení:** Poměr frekvencí: $f_{\text{Ka}}/f_X = 32/8,4 \approx 3,81$. Zisk každé antény roste jako f^2 . Zisk obou antén celkem vzroste o faktor:

$$\Delta G_{\text{ant}} = (3,81)^2 \times (3,81)^2 = (3,81)^4 \approx 210,7 \Rightarrow +23,24 \text{ dB}$$

Útlum volného prostoru však vzroste o:

$$\Delta L_{\text{FS}} = (3,81)^{-2} \approx \frac{1}{14,51} \Rightarrow -11,62 \text{ dB}$$

Čistý teoretický geometrický zisk linky činí:

$$\Delta \text{Link} = +23,24 - 11,62 = +11,62 \text{ dB}$$

Přechod na pásmo Ka zvyšuje přenosovou kapacitu linky 14,5krát (při zanedbání dodatečných atmosférických ztrát).

Úloha 12: Fotonová bilance laserového spojení DSOC

Zadání: Laserový vysílač DSOC na sondě Psyche ($P_t = 5 \text{ W}$, vlnová délka $\lambda = 1550 \text{ nm}$) vysílá k Zemi ve vzdálenost $r = 1 \text{ AU}$ ($150 \times 10^6 \text{ km}$). Vyzařovací úhel činí $\theta = 8 \text{ mrad}$. Kolik fotonů za sekundu zachytí Haleův teleskop na Palomaru

o průměru $D = 5,08$ m, činí-li atmosférická propustnost $\eta_{\text{atm}} = 0,7$? **Řešení:** Energie jednoho fotonu:

$$E_{\text{ph}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1,55 \times 10^{-6}} \approx 1,282 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Celkový počet vysílaných fotonů za sekundu:

$$\Phi_{\text{tx}} = \frac{P_t}{E_{\text{ph}}} = \frac{5}{1,282 \times 10^{-19}} \approx 3,90 \times 10^{19} \text{ fotonů/s}$$

Plocha laserové stopy na Zemi: poloměr stopy $w \approx r \cdot (\theta/2) = 150 \times 10^9 \times 4 \times 10^{-6} = 600 \text{ km} = 6 \times 10^5 \text{ m}$. Plocha stopy: $A_{\text{beam}} = \pi w^2 = \pi \times (6 \times 10^5)^2 \approx 1,13 \times 10^{12} \text{ m}^2$. Sběrná plocha teleskopu: $A_{\text{tel}} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} \times 5,08^2 \approx 20,27 \text{ m}^2$. Počet zachycených fotonů:

$$\Phi_{\text{rx}} = \Phi_{\text{tx}} \frac{A_{\text{tel}}}{A_{\text{beam}}} \eta_{\text{atm}} = 3,90 \times 10^{19} \times \frac{20,27}{1,13 \times 10^{12}} \times 0,7 \approx 4,9 \times 10^8 \text{ fotonů/s}$$

Tento tok (téměř půl miliardy fotonů za sekundu) pohodlně umožňuje přenosovou rychlost desítek megabitů za sekundu při kódování s počítáním fotonů (PPM – Pulse Position Modulation).

Úloha 13: Homologická deformace a Ruzeho ztráty

Zadání: Parabolická anténa o průměru 34 m má RMS drsnost povrchu zrcadla $\sigma = 0,25$ mm. Určete ztrátu zisku v decibelech způsobenou nerovností povrchu dle Ruzeho rovnice v pásmu X (8,4 GHz) a pásmu Ka (32 GHz). **Řešení:** V pásmu X ($\lambda = 35,7$ mm):

$$\frac{4\pi\sigma}{\lambda} = \frac{4\pi \times 0,25}{35,7} \approx 0,0880$$

$$\eta_{\text{Ruze}} = \exp(-0,0880^2) \approx \exp(-0,00774) \approx 0,992 \implies \text{Ztráta: } -0,034 \text{ dB}$$

V pásmu Ka ($\lambda = 9,375$ mm):

$$\frac{4\pi\sigma}{\lambda} = \frac{4\pi \times 0,25}{9,375} \approx 0,3351$$

$$\eta_{\text{Ruze}} = \exp(-0,3351^2) \approx \exp(-0,1123) \approx 0,894 \implies \text{Ztráta: } -0,488 \text{ dB}$$

V pásmu Ka je ztráta zisku vlivem deformací povrchu 14krát vyšší než v pásmu X.

Úloha 14: Fázované sloučení čtyř 34m antén

Zadání: Pozemní komplex v Goldstone přijímá slabý signál z nouzového stavu sondy. Operátoři fázově sloučí signál z jedné 70m antény ($G_1 = 74,0$ dBi, $T_1 = 18$ K) a tří 34m antén ($G_2 = G_3 = G_4 = 67,5$ dBi, $T_2 = T_3 = T_4 = 22$ K). Vypočtete relativní nárůst poměru SNR v decibelech oproti samotné 70m anténě. **Řešení:** Metrika citlivosti antény je dána poměrem G/T . Pro 70m anténu: $(G/T)_1 = 10^{7,4}/18 \approx 2,512 \times 10^7/18 \approx 1,396 \times 10^6 \text{ K}^{-1}$. Pro každou 34m anténu: $(G/T)_i = 10^{6,75}/22 \approx 5,623 \times 10^6/22 \approx 2,556 \times 10^5 \text{ K}^{-1}$. Při optimálním koherentním váženém slučování se poměry G/T sčítají:

$$(G/T)_{\text{array}} = (G/T)_1 + 3 \times (G/T)_i = 1,396 \times 10^6 + 3 \times (2,556 \times 10^5) \approx 1,396 \times 10^6 + 7,668 \times 10^5 \approx 2,163 \times 10^6 \text{ K}^{-1}$$

Nárůst SNR v decibelech:

$$\Delta \text{SNR} [\text{dB}] = 10 \log_{10} \left(\frac{(G/T)_{\text{array}}}{(G/T)_1} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{2,163 \times 10^6}{1,396 \times 10^6} \right) \approx 10 \log_{10}(1,549) \approx +1,90 \text{ dB}$$

Sloučení polí přináší zisk téměř +2 dB, což může rozhodnout o záchraně mise.

Úloha 15: Velikost vyrovnávací paměti DTN při konjunkci Marsu

Zadání: Rover na Marsu generuje vědecká data průměrnou rychlostí 50 kbps nepřetržitě. Během sluneční konjunkce je rádiové spojení s DSN kvůli slunečnímu šumu přerušeno po dobu 14 dní. Jakou minimální kapacitu perzistentního úložiště (Bundle Storage) musí rover mít, aby nedošlo ke ztrátě ani jediného bitu dat? **Řešení:** Doba výpadku v sekundách:

$$T_{\text{out}} = 14 \times 24 \times 3600 \text{ s} = 1,2096 \times 10^6 \text{ s}$$

Celkový objem vygenerovaných dat:

$$V_{\text{bits}} = 50 \times 10^3 \text{ bps} \times 1,2096 \times 10^6 \text{ s} \approx 6,048 \times 10^{10} \text{ bitů}$$

Přepočet na gigabajty (GB):

$$V_{\text{bytes}} = \frac{6,048 \times 10^{10}}{8} = 7,56 \times 10^9 \text{ B} \approx 7,56 \text{ GB} \approx 7,04 \text{ GiB}$$

S bezpečnostní rezervou 50 % na režijní data protokolu Bundle Protocol vyžaduje rover vyrovnávací paměť o kapacitě alespoň 12 GB.

Dodatek D: Encyklopedický glosář a katalog pozemních stanic

Tento dodatek poskytuje systematický encyklopedický přehled klíčových pojmů meziplanetární telekomunikace a technický katalog všech pozemních stanic sítě Deep Space Network a partnerských stanic ESA ESTRACK.

D.1 Encyklopedický glosář pojmů

- **ACM (Adaptive Coding and Modulation):** Technologie dynamické adaptace kódového poměru a modulační na okamžitý stav útlumu troposféry, využívaná zejména v pásmu Ka.
- **Aperturová účinnost (η):** Poměr mezi efektivní zachytnou plochou antény a její geometrickou plochou. Zahrnuje ztráty ozáření, stíněním a drsností.
- **Arraying (Fázované slučování):** Technika koherentního sčítání signálů z více samostatných antén pro dosažení vyššího poměru signálu k šumu.
- **Beam Waveguide (BWG):** Konstrukce antény využívající soustavu rotujících a pevných zrcadel k vedení mikrovln do podzemní přístrojové místnosti.
- **Bundle Protocol (BP):** Základní protokol architektury DTN (RFC 5050 / RFC 9171), zajišťující spolehlivý přenos v sítích s extrémní latencí a výpadky spojení.
- **CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems):** Mezinárodní normalizační organizace sdružující kosmické agentury (NASA, ESA, JAXA) pro sjednocení komunikačních standardů.
- **Δ DOR (Delta Differential One-Way Ranging):** Velmi přesná interferometrická navigační metoda měřící rozdíl časů příjmu signálu ze sondy a z kvasaru na mezikontinentální základně.
- **DSOC (Deep Space Optical Communications):** Projekt NASA pro laserovou komunikaci v hlubokém vesmíru na vlnové délce 1550 nm.
- **EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power):** Ekvivalentní izotropně vyzářený výkon, součin výkonu vysílače a zisku vysílací antény.
- **FSPL (Free-Space Path Loss):** Útlum volného prostoru způsobený geometrickým rozptylem vlnoplochy s druhou mocninou vzdálenosti ($1/r^2$).
- **HEMT (High Electron Mobility Transistor):** Nízkošumový heterostrukturální polní tranzistor využívaný v kryogenních předzesilovačích.
- **ICRF (International Celestial Reference Frame):** Mezinárodní nebeský referenční systém definovaný přesnými polohami vzdálených kvasarů.
- **LDPC (Low-Density Parity-Check):** Pokročilá třída lineárních samoopravných kódů pracujících v těsné blízkosti Shannonovy meze.
- **MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation):** Kvantový nízkošumový mikrovlnný zesilovač chlazený kapalným heliem na 4,2 K.
- **Ranging (Měření vzdálenosti):** Určení vzdálenosti sondy z měření doby šíření kódovaného signálu tam a zpět (Two-Way Ranging).
- **SNSPD (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector):** Supravodivý detektor jednotlivých fotonů pro laserový příjem na pozemních teleskopech.
- **TEC (Total Electron Content):** Celkový elektronový obsah, integrál hustoty volných elektronů podél dráhy paprsku vyvolávající disperzní zpoždění.

D.2 Technický katalog stanic sítě DSN a ESTRACK

Komplex Goldstone (GDSCC) – Kalifornie, USA (35°25' s. š., 116°53' z. d.)

- **DSS-14 ("Mars antenna"):** 70 m Cassegrain. Hlavní radarový vysílač 450 kW (X-band), vysílač 20 kW (S-band). Kryogenní masery v pásmech S a X.
- **DSS-24:** 34 m Beam Waveguide (BWG). Pásmo S a X (příjem i vysílání 20 kW).
- **DSS-25:** 34 m BWG. Pásmo X a Ka (hlavní stanice pro downlink Ka-band).
- **DSS-26:** 34 m BWG. Multifrekvenční stanice S, X, Ka a testovací lůžko pro optickou komunikaci.

Komplex Madrid (MDSCC) – Robledo de Chavela, Španělsko (40°25' s. š., 4°14' z. d.)

- **DSS-63:** 70 m Cassegrain. Pásmo S a X, vysílač 20 kW (S) a 20 kW (X).
- **DSS-65:** 34 m HEF (High-Efficiency). Pásmo X (vysílání i příjem).
- **DSS-54 / DSS-55 / DSS-56:** 34 m BWG. Moderní trojice pro pásma S, X a Ka s plnou polarizační diverzitou.

Komplex Canberra (CDSCC) – Tidbinbilla, Austrálie (35°24' j. š., 148°58' v. d.)

- **DSS-43:** 70 m Cassegrain. Největší parabolická anténa na jižní polokouli. Jediný pozemní vysílač v pásmu S schopný komunikovat se sondou Voyager 2.
- **DSS-34 / DSS-35 / DSS-36:** 34 m BWG. Klíčové uzly pro mise k vnějším planetám a jižním Lagrangeovým bodům.

Stanice sítě ESA ESTRACK pro hluboký vesmír (Deep Space Antennas)

- **DSA-1 (New Norcia, Austrálie):** 35 m parabola. Podpora misí BepiColombo, Solar Orbiter, Juice.
- **DSA-2 (Cebreros, Španělsko):** 35 m parabola v pásmech X a Ka.
- **DSA-3 (Malargüe, Argentina):** 35 m parabola v provincii Mendoza, kryjící jihoamerický sektor.