

ROZBOR VYSOKORYCHLOSTNÍHO TELEMETRICKÉHO SPOJE PRO DRUŽICE LEO

Doc. Ing. Miroslav Kasal, CSc.
Ing. František Hruška

Prosinec 2000

OBSAH

- 1 Úvod
- 2 Výchozí technická data
- 3 Základní úvahy
 - 3.1 Orbita
 - 3.2 Dopplerův posuv
- 4 Přenos dat
 - 4.1 Modulace
- 5 Energetická bilance
 - 5.1 Kalkulátor
- 6 Parametry pozemní stanice
 - 6.1 Parametry systému s parabolickým reflektorem o průměru 3 m
 - 6.2 Parametry systému s malou aperturou
- 7 Družice
 - 7.1 Vysílač s přímou modulací FSK
 - 7.2 Vysílač s modulací MSK
 - 7.3 Anténa na družici
8. Závěr
9. Literatura

Příloha: Kalkulátor Excel

1 Úvod

Tato zpráva byla vypracována na základě dohody mezi Ústavem fyziky atmosféry AV ČR a Ústavem radioelektroniky FEI VUT Brno. Jedná se o rozbor telemetrického spoje družice - Země na skloněné dráze LEO s vyšší přenosovou rychlostí a bude sloužit jako výchozí pro návrh palubního vysílače v pásmu S.

2 Výchozí technická data

- telemetrický spoj (downlink) pracující v pásmu S s datovou rychlostí do 100kbit/s a do 1Mbit/s,
- výstupní výkon vysílače 1 až 2 W,
- anténa se všesměrovou nebo polokulovou charakteristikou,
- vnitřní napájecí napětí 6 popř. 5V, měnič pro palubní napětí,
- konstrukce s ohledem na použití na palubě družice (rozsah pracovních teplot -40° až $+60^{\circ}$ C, odolnost proti otřesům, malé rozměry a hmotnost, nízká spotřeba energie, odolnost proti nepřizpůsobení antény),
- telemetrie teploty, výstupního a odraženého výkonu (telemetrické úrovně 0-5V nebo digitální sériový přenos).

3 Základní úvahy

3.1 Orbita

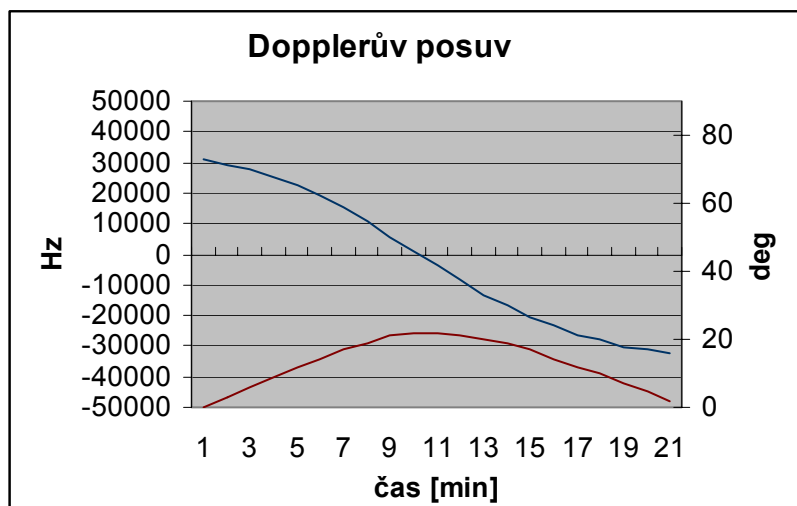
V dalším je uvažována šikmá vzdálenost k družici na skloněné, přibližně kruhové dráze LEO s výškou 1000 – 2000 km. Šikmá vzdálenost k družici se tedy pohybuje v intervalu 1000 – 4980 km.

3.2 Dopplerův posuv

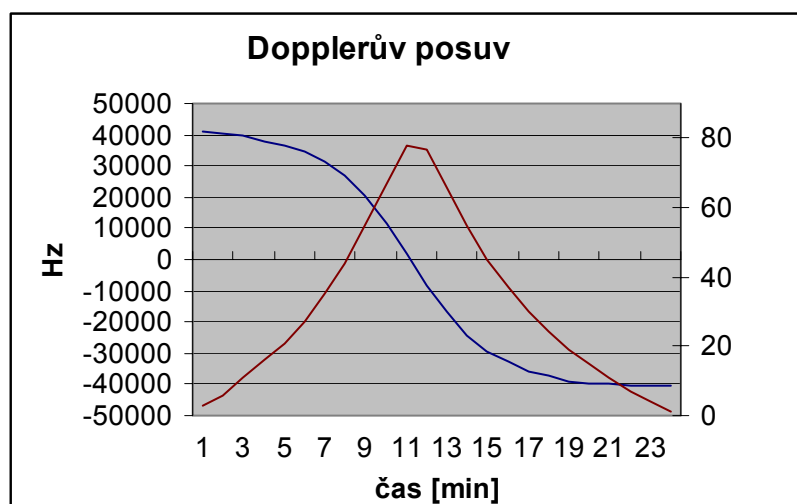
Dopplerův posuv frekvence nosné vlny je v pásmu S pro výše uvedené dráhy značný a je třeba s ním počítat při řešení demodulace přijímaného signálu pozemní stanicí. Jsou v podstatě dva možné způsoby jeho eliminace:

- a) automatickým laděním přijímače odpovídající výpočtu aktuální hodnoty posuvu,
- b) smyčkou AFC v přijímači.

Typické hodnoty Dopplerova posuvu pro dráhu s výškou 1400-1700 km a sklonem dráhy 99° jsou uvedeny na obr. 1a,b.



Obr. 1a. Dopplerův posuv při nízkém přeletu družice na dráze LEO se sklonem 99° a výškou $h_p = 1400$ km, $h_a = 1700$ km. Frekvence nosné vlny je 2200 MHz.

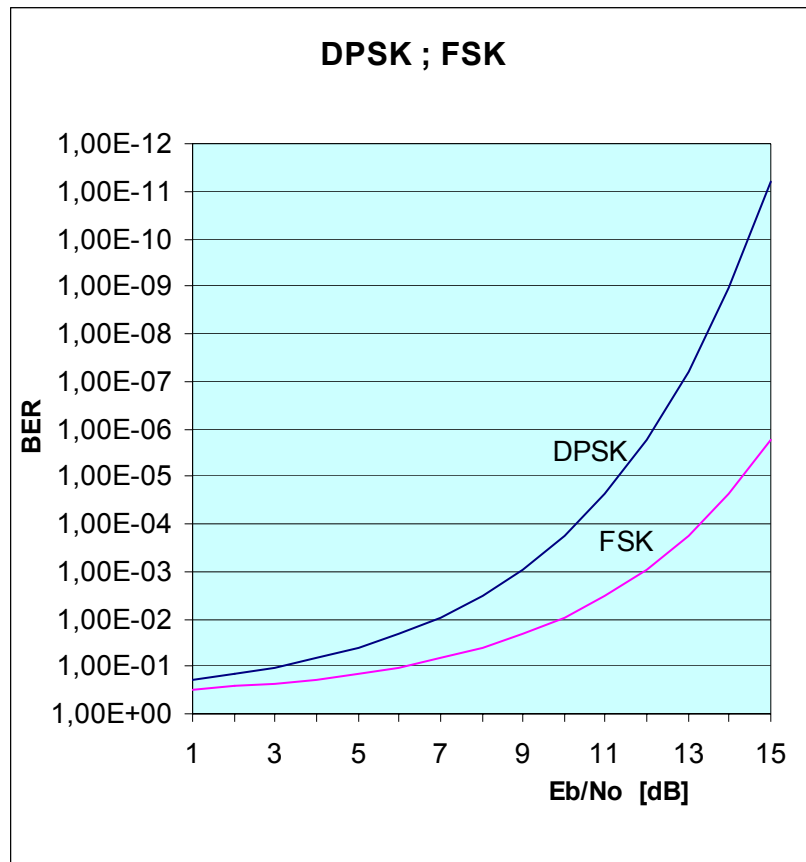


Obr. 1b. Dopplerův posuv při vysokém přeletu družice na dráze LEO se sklonem 99° a výškou $h_p = 1400$ km, $h_a = 1700$ km. Frekvence nosné vlny je 2200 MHz.

4 Přenos dat

4.1 Modulace

Pro telemetrický družicový spoj jsou z hlediska energetické bilance, která je obvykle preferována, vhodné především dvoustavové modulace. V úvahu přicházejí modulace FSK a její modifikace MSK, GMSK. Systém s těmito modulacemi je vhodný pro přenosové rychlosti menší, do 100 kbit/s. Pro přenosové rychlosti 1 až 2 Mbit/s je výhodnější PSK modulace, respektive BPSK, DPSK. V dalším se budeme zabývat vlastnostmi soustavy z hlediska základní chybovosti t.j. bez blokového a FEC kódování. Požadavek na základní chybovost BER je řádu 10^{-6} . Z hlediska výpočtu energetické bilance je rozhodující poměr E_b/N_0 , tedy energie připadající na jeden přenesený bit ku spektrální hustotě výkonu. Pro obě základní modulace byly odvozeny vztahy znázorněné na obr. 2. Z nich vyplývá, že pro $BER = 10^{-6}$ je třeba dosáhnout pro DPSK $E_b/N_0 = 12,3$ dB a pro FSK $E_b/N_0 = 15,5$ dB.



Obr. 2. Chybovost datového spoje s modulacemi FSK a DPSK v závislosti na poměru E_b/N_0 .

Podotkněme však, že tyto vztahy byly odvozeny pro ideální podmínky, kdy šum v přenosovém kanálu je bílý s gaussovským rozdělením amplitud.

5 Energetická bilance

5.1 Kalkulátor

Pro výpočet energetické bilance družicového telemetrického spoje byl navržen tabulkový kalkulátor, který je přílohou této zprávy. Dále jsou uvedeny některé typické výsledky.

Tab. 5.1. Kalkulátor pro výpočet energetické bilance downlinku

Range	km									
Frequency	MHz									
E_b/N_0	dB									
Data Rate	kbit/sec									
G/T ground	dB/K									
Path Loss	dB									
C/N_0	dB									
alpha										
HF bandwidth	kHz									
C/N	dB									
EiRP of Sat.	dBW									
Margin + EiRP	dB; dBW									

Veličiny v silně orámovaných buňkách jsou vstupní (nezávislé) proměnné. Ve slabě popřípadě dvojité orámovaných buňkách jsou vypočítané hodnoty.

Jednotlivé parametry znamenají:

Range:	šikmá vzdálenost mezi pozorovatelem družicí,
Frequency:	frekvence downlinku,
E_b/N_0:	energie připadající na jeden přenášený bit ku spektrální hustotě výkonu šumu,
Data Rate:	přenosová rychlost vlastního spoje,
G/T ground:	činitel kvality pozemského přijímacího systému,
Path Loss:	ztráty šířením elmag. vln,
C/N_0:	poměr výkonu nosné vlny ke spektrální hustotě výkonu šumu,
alpha:	koeficient pro stanovení rf šířky pásma,
HF bandwidth:	šířka pásma rf signálu,
C/N:	poměr výkonu nosné vlny k celkové hodnotě výkonu šumu kanálu,
EiRP of Sat.:	vypočítaný vyzářený výkon vysílače družice,
Margin + EiRP:	vyzářený výkon vysílače družice s definovanou rezervou.

Tab. 5.2. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 9,6 kbit/sec, modulací FSK (MSK) a G/T = 0 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	15,5									
Data Rate	kbit/sec	9,6									
G/T ground	dB/K	0,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	55,3									
alpha		1,0									
HF bandwidth	kHz	19,2									
C/N	dB	12,5									
EiRP of Sat.	dBW		-14,0	-10,5	-8,0	-6,0	-4,4	-3,1	-1,9	-0,9	0,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-11,0	-7,5	-5,0	-3,0	-1,4	-0,1	1,1	2,1	3,0

Tab. 5.3. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 19,2 kbit/sec, modulací FSK (MSK) a G/T = 0 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	15,5									
Data Rate	kbit/sec	19,2									
G/T ground	dB/K	0,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	58,3									
alpha		1,0									
HF bandwidth	kHz	38,4									
C/N	dB	12,5									
EiRP of Sat.	dBW		-11,0	-7,5	-5,0	-3,0	-1,4	-0,1	1,1	2,1	3,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-8,0	-4,5	-2,0	0,0	1,6	2,9	4,1	5,1	6,0

Tab. 5.4. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 38,4 kbit/sec, modulací FSK (MSK) a G/T = 0 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	15,5									
Data Rate	kbit/sec	38,4									
G/T ground	dB/K	0,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	61,3									
alpha		1,0									
HF bandwidth	kHz	76,8									
C/N	dB	12,5									
EiRP of Sat.	dBW		-8,0	-4,4	-1,9	0,0	1,6	2,9	4,1	5,1	6,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-5,0	-1,4	1,1	3,0	4,6	5,9	7,1	8,1	9,0

Tab. 5.5. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 76,8 kbit/sec, modulací FSK (MSK) a G/T = 0 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	15,5									
Data Rate	kbit/sec	76,8									
G/T ground	dB/K	0,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	64,4									
alpha		1,0									
HF bandwidth	kHz	153,6									
C/N	dB	12,5									
EiRP of Sat.	dBW		-5,0	-1,4	1,1	3,0	4,6	5,9	7,1	8,1	9,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-2,0	1,6	4,1	6,0	7,6	8,9	10,1	11,1	12,0

Tab. 5.6. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 76,8 kbit/sec, modulací FSK (MSK) a G/T = 14 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	15,5									
Data Rate	kbit/sec	76,8									
G/T ground	dB/K	14,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	64,4									
alpha		1,0									
HF bandwidth	kHz	153,6									
C/N	dB	12,5									
EiRP of Sat.	dBW		-19,0	-15,4	-12,9	-11,0	-9,4	-8,1	-6,9	-5,9	-5,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-16,0	-12,4	-9,9	-8,0	-6,4	-5,1	-3,9	-2,9	-2,0

Tab. 5.7. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 153,6 kbit/sec, modulací FSK (MSK) a G/T = 14 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	15,5									
Data Rate	kbit/sec	153,6									
G/T ground	dB/K	14,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	67,4									
alpha		1,0									
HF bandwidth	kHz	307,2									
C/N	dB	12,5									
EiRP of Sat.	dBW		-15,9	-12,4	-9,9	-8,0	-6,4	-5,1	-3,9	-2,9	-2,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-12,9	-9,4	-6,9	-5,0	-3,4	-2,1	-0,9	0,1	1,0

Tab. 5.8. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 1 Mbit/sec, modulací BPSK a G/T = 0 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	12,3									
Data Rate	kbit/sec	1000,0									
G/T ground	dB/K	0,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	72,3									
alpha		0,5									
HF bandwidth	kHz	1500,0									
C/N	dB	10,5									
EiRP of Sat.	dBW		3,0	6,5	9,0	10,9	12,5	13,9	15,0	16,1	17,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	6,0	9,5	12,0	13,9	15,5	16,9	18,0	19,1	20,0

Tab. 5.9. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 1 Mbit/sec, modulací BPSK a G/T = 14 dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	12,3									
Data Rate	kbit/sec	1000,0									
G/T ground	dB/K	14,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	72,3									
alpha		0,5									
HF bandwidth	kHz	1500,0									
C/N	dB	10,5									
EiRP of Sat.	dBW		-11,0	-7,5	-5,0	-3,1	-1,5	-0,1	1,0	2,1	3,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-8,0	-4,5	-2,0	-0,1	1,5	2,9	4,0	5,1	6,0

Tab. 5.10. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 2 Mbit/sec, modulací BPSK a $G/T = 14$ dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	12,3									
Data Rate	kbit/sec	2000,0									
G/T ground	dB/K	14,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	75,3									
alpha		0,5									
HF bandwidth	kHz	3000,0									
C/N	dB	10,5									
EiRP of Sat.	dBW		-8,0	-4,5	-2,0	0,0	1,5	2,9	4,0	5,1	6,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-5,0	-1,5	1,0	3,0	4,5	5,9	7,0	8,1	9,0

Tab. 5.11. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 2 Mbit/sec, modulací BPSK a $G/T = 20$ dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	12,3									
Data Rate	kbit/sec	2000,0									
G/T ground	dB/K	20,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	75,3									
alpha		0,5									
HF bandwidth	kHz	3000,0									
C/N	dB	10,5									
EiRP of Sat.	dBW		-14,0	-10,5	-8,0	-6,0	-4,5	-3,1	-2,0	-0,9	0,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-11,0	-7,5	-5,0	-3,0	-1,5	-0,1	1,0	2,1	3,0

Tab. 5.12. Výpočet energetické bilance telemetrického downlinku družice LEO s přenosovou rychlostí 5 Mbit/sec, modulací BPSK a $G/T = 20$ dB/K

Range	km		1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Frequency	MHz	2200									
E_b/N_0	dB	12,3									
Data Rate	kbit/sec	5000,0									
G/T ground	dB/K	20,0									
Path Loss	dB		159,3	162,8	165,3	167,2	168,8	170,2	171,3	172,4	173,3
C/N_0	dB	79,3									
alpha		0,5									
HF bandwidth	kHz	7500,0									
C/N	dB	10,5									
EiRP of Sat.	dBW		-10,0	-6,5	-4,0	-2,1	-0,5	0,9	2,0	3,0	4,0
Margin +EiRP	dB; dBW	3	-7,0	-3,5	-1,0	0,9	2,5	3,9	5,0	6,0	7,0

6 Parametry pozemní stanice

Parametry pozemní stanice musí odpovídat požadovaným parametrům z předchozí kapitoly. Obecně platí, že musí kompenzovat omezený EIRP vysílače a antény umístěné na družici. Hlavním parametrem umožňujícím tuto kompenzaci je zisk přijímací antény pozemní stanice. Na druhé straně je však v případě družic LEO třeba počítat s poměrně rychlým relativním pohybem družice, což klade značné nároky na mechanický systém pohybujiící velkou anténou.

6.1 Parametry systému s parabolickým reflektorem o průměru 3 m

Zisk takové antény v pásmu S (2200 MHz) může dosahovat 34 dBi (vůči isotrovnímu zářiči) při optimálním ozáření ($\eta = 0,6$). Tomu odpovídá šířka hlavního svazku (pro pokles 3 dB) $3,2^\circ$. Polarizaci předpokládáme kruhovou. Šumová teplota antény bude značně záviset na elevačním úhlu, viz Tab.6.1.

Tab. 6.1. Výpočet G/T přijímacího systému s parabolickou anténou o průměru 3 m na frekvenci 2200 MHz.

Elevace	Tsky	Tground	Ta	Tf	Lf	Trx	Tn	G	G/T
deg	K	K	K	K	dB	K	K	dBi	dB/K
0	80	100	180	290	0,5	50	242,0	34	10,2
10	10	50	60				135,0		12,7
20	6	10	16				95,8		14,2
30	4	10	14				94,0		14,3
40	3	10	13				93,1		14,3
50	2,7	10	12,7				92,9		14,3
60	2,5	10	12,5				92,7		14,3
70	2,5	10	12,5				92,7		14,3
80	2,5	10	12,5				92,7		14,3
90	2,5	10	12,5				92,7		14,3

Jednotlivé parametry znamenají:

Tsky:	jasová teplota oblohy,
Tground:	příspěvek k šumové teplotě antény od Země,
Ta:	celková šumová teplota antény,
Tf:	termodynamická teplota napáječe antény,
Lf:	ztráty v napáječi,
Trx:	ekvivalentní šumová teplota vlastního přijímače,
Tn	ekvivalentní šumová teplota systému,
G:	zisk antény vůči isotrovnímu zářiči,
G/T:	činitel kvality přijímacího systému.

6.2 Parametry systému s malou aperturou

V některých případech může být užitečné uvažovat i přijímací systém s malou parabolickou anténou pro přenosy signálů FSK (MSK) s menší přenosovou rychlostí. V tabulce 6.2 jsou uvedeny výpočty parametrů takové stanice s parabolou o průměru

0,6 m. Tento průměr byl vzat do úvahy jako nejmenší možný. Při průměru 1,2 m budou dosažitelné hodnoty G/T o 6 dB lepší. Nespornou výhodou takového systému jsou nesrovnatelně menší nároky na proces sledování družice na dráze LEO a mechanickou konstrukci sledovacího zařízení.

Tab. 6.2. Výpočet G/T přijímacího systému s parabolickou anténou o průměru 0,6 m na frekvenci 2200 MHz.

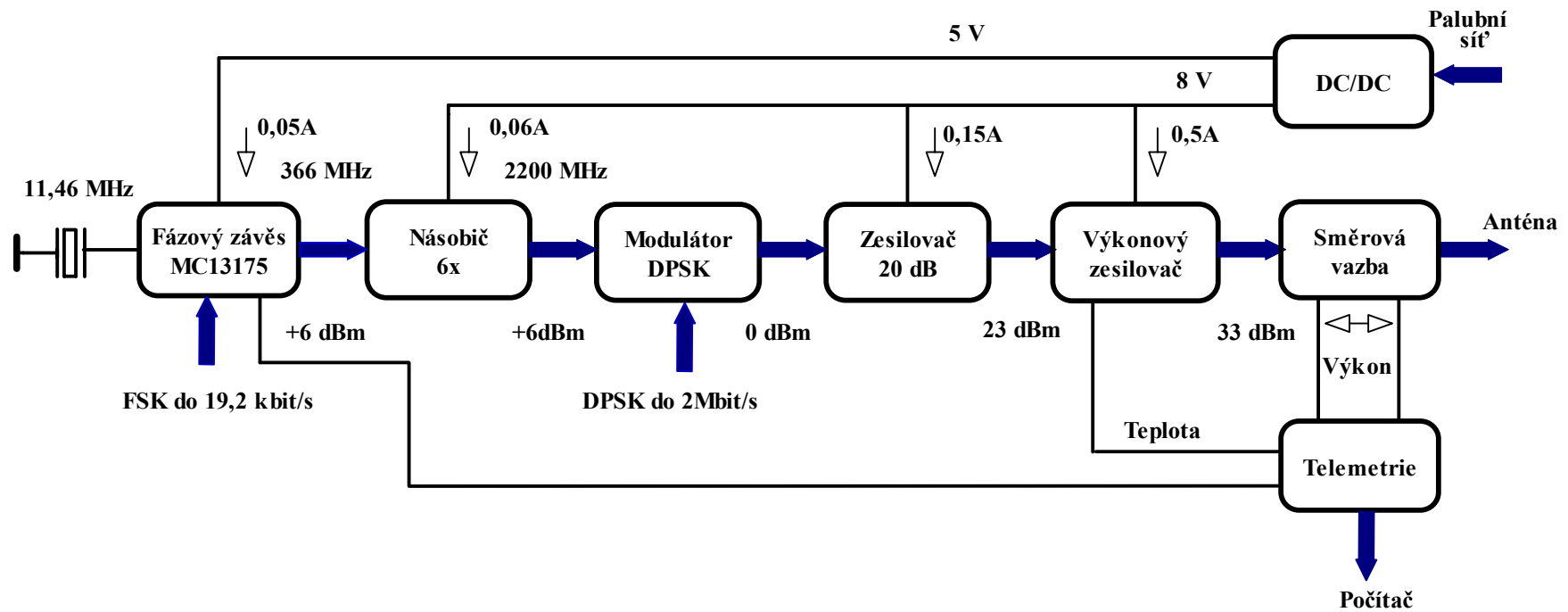
Elevace deg	Tsky K	Tground K	Ta K	Tf K	Lf dB	Trx K	Tn K	G dBi	G/T dB/K
0	80	100	180	290	0,5	50	242,0	20	-3,8
10	10	50	60				135,0		-1,3
20	6	10	16				95,8		0,2
30	4	10	14				94,0		0,3
40	3	10	13				93,1		0,3
50	2,7	10	12,7				92,9		0,3
60	2,5	10	12,5				92,7		0,3
70	2,5	10	12,5				92,7		0,3
80	2,5	10	12,5				92,7		0,3
90	2,5	10	12,5				92,7		0,3

7 Družice

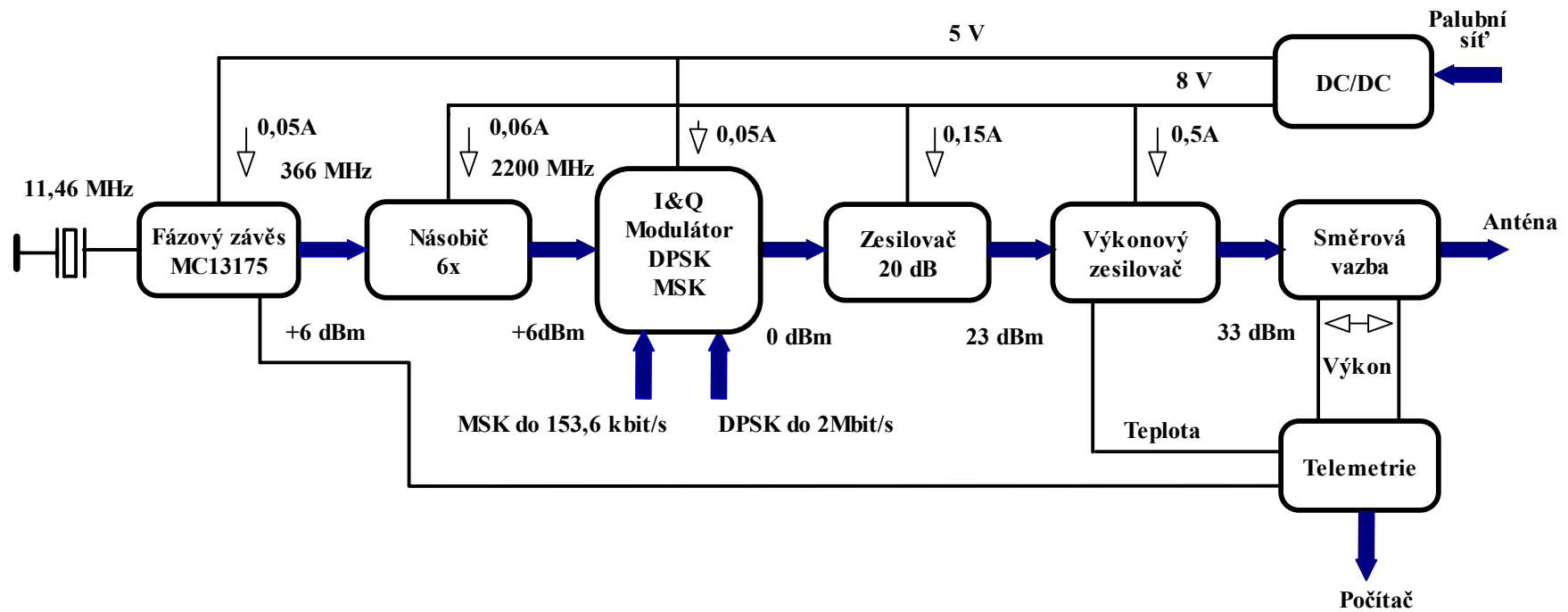
V této kapitole jsou uvedeny základní úvahy o palubním vybavení družice pro telemetrický downlink s parametry odpovídajícími předchozím úvahám. Jsou navrženy dva vysílače, lišící se dosažitelnou přenosovou rychlostí při modulaci MSK. Oba návrhy berou v úvahu požadavky na spolehlivost, minimální spotřebu energie, odvod tepla a další aspekty charakteristické pro satelitní technologie.

7.1 Vysílač s přímou modulací FSK

Blokové schéma je uvedeno na obr. 7.1. Základní oscilátor je přímo modulován digitálním modulačním signálem, který je upraven odpovídajícími filtry tak, aby se modulovaný signál blížil signálu MSK. Fázový závěs s oscilátorem řízeným proudem umožní generovat frekvenci na 32 násobku frekvence krystalového oscilátoru (MC13175 Motorola). Signál se jmenovitou nosnou frekvencí v pásmu S je dále získán vynásobením 6x. Následuje modulátor DPSK (RMS-30 MniCircuits). Modulační signál bude upraven filtrem typu „cosine roll-off“. Modulovaný signál je dále zesílen na úroveň 20 dBm. Zde předpokládáme použití dvou třibodových zesilovačů (Avantek, HP, MiniCircuits). Koncový výkonový zesilovač bude osazen GaAsFETem pracujícím ve třídě B (Mitsubishi, Stanford Microwaves). Na výstupu vysílače je obousměrná směrová vazba pro indikaci výkonu jdoucího do antény i odraženého. Telemetrická jednotka bude dále indikovat teplotu oscilátoru a teplotu koncového stupně. Její konstrukce bude přizpůsobena celkovému řešení telemetrie družice (analogové výstupy nebo sériové číslicové).



Obr. 7.1. Blokové uspořádání vysílače pro pásmo S s přímou modulací FSK.



Obr. 7.2. Blokové schéma vysílače v pásmu S s kvadraturním modulátorem MSK.

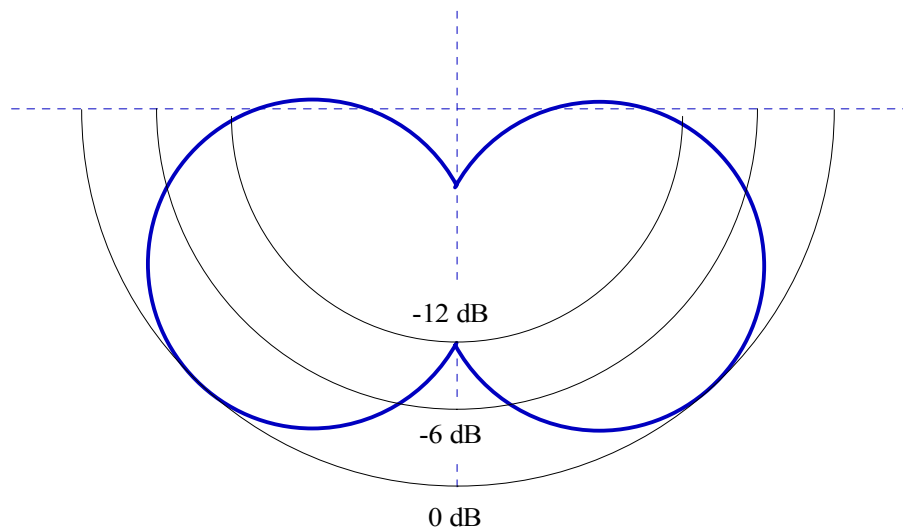
Celkový příkon vysílače lze odhadnout na 6 až 7 W při výstupním výkonu 2 W. Při konstrukčním návrhu je třeba počítat s odvodem tepla o výkonu asi 5 W.

7.2 Vysílač s modulací MSK

Přímá modulace FSK dovoluje dosáhnout parametrů MSK do modulační rychlosti asi 20 kbaud. Pro větší rychlosti je třeba modulaci MSK realizovat v kvadraturním modulátoru (I&Q). Ten lze pak využít ve zjednodušené formě i pro modulaci DPSK jako v předchozím případě. Vysílač s kvadraturním modulátorem je uveden na obr. 7.2. Ostatní parametry vysílače jsou shodné, stejně jako úprava modulačních signálů.

7.3 Anténa na družici

Z kalkulace energetické bilance telemetrického spoje pro družici na uvažované dráze LEO vyplývá, že rozdíl úrovně signálu družice v nadhlavníku a při východu popř. západu družice lze očekávat 14 dB. Vezmeme-li v úvahu ještě snížení poměru G/T při malé elevaci antény pozemní stanice, bude rozdíl ještě větší (až o 4 dB). Vyzařovací charakteristika ideální antény družice by se tedy měla podobat obr. 7.3, kde vertikála směřuje do středu Země a vyzařovací charakteristika je kolem ní rotačně symetrická. Polarizace by v ideálním případě měla být v celé hemisféře kruhová. Při návrhu antény je však třeba vzít do úvahy celou řadu dalších parametrů, z nichž snad nejdůležitější je způsob stabilizace polohy družice.



Obr. 7.3. Optimální vyzařovací charakteristika antény družice.

Z výše uvedených důvodů se nezdá být vhodná původně uvažovaná krátká šroubovicová anténa s axiálním vyzařováním. Důvodem jsou jednak minima vyzařování ve směrech požadovaných maxim a jednak polarizace vlny v těchto směrech, která zdaleka není kruhová. V úvahu by však připadala trojice nebo čtveřice takových antén, orientovaných pod úhlem asi 60° k vertikále, rozmístěných po 120° nebo 90° (v horizontální rovině). Při vhodném napájení se stejným fázovým posuvem ve smyslu kruhové polarizace jednotlivých antén by mohlo být dosaženo velmi dobrých parametrů, za cenu větší

konstrukční složitosti. Takový anténní systém je však třeba modelovat a experimentálně ověřit jeho parametry.

Druhou možností je anténa typu Eggbeater (dvě na sebe kolmé celovlnné smyčky nad odraznou plochou, napájené s fázovým posuvem 90°). V pramenu [8] jsou uvedena experimentální data, kdy při větší vzdálenosti odrazné plochy než $3/8 \lambda$ dochází k většímu vyzařování při menších úhlech (k horizontální rovině) a potlačení vyzařování ve směru vertikály. Je třeba si však uvědomit, že kruhová polarizace je dosažitelná pouze ve směru vertikály a při nižších úhlech se stále více blíží polarizaci lineární. Podobné vlastnosti budou mít i soustavy dvou párů na sebe kolmých skloněných dipólů „Lindenblad anténa“ [9].

8 Závěr

V této práci jsme se věnovali rozboru vysokorychlostního telemetrického spoje „družice – Země“ z hlediska systémových parametrů. Výsledky ukazují, že pro vysoké přenosové rychlosti (1 Mbit/s) jsou nároky na parametry zařízení pozemního i kosmického segmentu značné. Je to dáno samozřejmě především omezeným výkonem vysílače družice, který jsme uvažovali 2 W. Rezerva v kalkulaci energetické bilance (margin) 3 dB je skutečně minimální, uvědomíme-li si, že zahrnuje všechny nedokonalosti systému (nepřesnost směřování pozemní antény, polarizační nepřizpůsobení, útlum v atmosféře apod.), z nichž většina může snadno dosahovat této hodnoty jednotlivě. Zvláštní pozornost je třeba dále věnovat anténě družice. Zde se nevyhneme počítačovému modelování. Pro tyto práce je však třeba znát způsob stabilizace polohy družice včetně předpokládané přesnosti.

9 Literatura

- [1] MARAL, G.- BOUSQUET, M.: Satellite Communication Systems. Second Edition, John Wiley & Sons, New York 1993
- [2] KASAL, M.: The P3D Satellite On-Board Receiving System Analysis. In: Proceedings of 6th national scientific conference RADIOELEKTRONIKA 96, Brno 1996, Vol. 2, pp. 250-253
- [3] ŽALUD, V.: Diskrétní modulace pro pozemskou mobilní rádiovou komunikaci. Sd_lovací technika 10-11/95, s. 433-434 a 481-485
- [4] HRDINA, Z.- VEJRAŽKA, F.: Digitální radiová komunikace. Skriptum ČVUT, 1995
- [5] PHILLIPS, K. P.: An overview of propagation factors influencing the design of mobile satellite communication systems. Electr.& Comm. Eng. J. December 1997, pp. 281-288
- [6] ADAMS, W. S.- RIDER, L.: Circular polar constellations providing continuous single or multiple coverage above a specified latitude. J. Astronautical Sciences, April-June 1987, Vol. 35, (2), pp. 155-192
- [7] KASAL, M.: Družicová komunikace. Sborník přednášek *Rádiové komunikační služby*, Ed. V. Řičný, ÚREL FEI VUT v Brn_ 1997, ss. 101-122
- [8] BROWN, G. R.: The *Eggbeater II* Omni-directional LEO Antenna. The *AMSAT Journal* Vol. 22, No. 5, 1999, pp. 14-16
- [9] SODJA, H.: Lindenblad Serendipity and Enlightenment. The *AMSAT Journal* Vol. 14, No. 6, 1991, pp. 15-18