

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Stanislav Marchevský - Slavomír Pillár - Branislav Hrušovský

Košice, December 2010



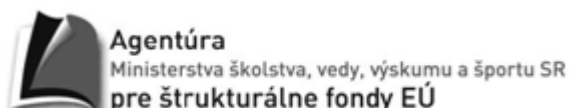
Moderné vzdelávanie pre vedomostnú spoločnosť/

Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Stanislav Marchevský, Slavomír Pillár, Branislav Hrušovský



Táto publikácia vznikla za finančnej podpory z Európskeho sociálneho fondu v rámci Operačného programu **VZDELÁVANIE**.

Prioritná os 1 Reforma vzdelávania a odbornej prípravy

Opatrenie 1.2 Vysoké školy a výskum a vývoj ako motory rozvoja vedomostnej spoločnosti.

Názov projektu: Balík inovatívnych prvkov pre reformu vzdelávania na TUKE

Autori: Prof. Ing. Stanislav Marchevský, PhD., Ing. Slavomír Pillár, PhD.,

Ing. Branislav Hrušovský

ISBN.....

Rukopis neprešiel/prešiel jazykovou úpravou.

Za odbornú a obsahovú stránku zodpovedajú autori.

Obsah

1 Úvod	11
1.1 Aplikácie a služby satelitných sietí	11
1.1.1 Úloha satelitných sietí.....	12
1.1.2 Sieťový softvér a hardvér.....	14
1.1.3 Satelitné sieťové rozhrania.....	14
1.1.4 Sieťové služby.....	15
1.1.5 Aplikácie	15
1.2 ITU-R definícia satelitných služieb.....	16
1.2.1 Pevné satelitné služby (FSS).....	16
1.2.2 Mobilné satelitné služby (MSS).....	16
1.2.3 Vysielania satelitnej služby (BSS).....	16
1.2.4 Ostatné satelitné služby.....	17
1.3 ITU-T definícia sieťových služieb	17
1.3.1 Interaktívne služby	17
1.3.2 Distribučné služby	18
1.4 Internetové služby a aplikácie	19
1.4.1 World Wide Web (WWW)	19
1.4.2 File Transfer Protocol (FTP).....	20
1.4.3 Telnet	20
1.4.4 Elektronická pošta (e-mail).....	21
1.4.5 Skupinové vysielanie (multicast) a distribúcia obsahu	21
1.4.6 Prenos hlasu cez internetový protokol (VoIP).....	21
1.4.7 Systém doménových mien (DNS)	22
1.5 Sieť s prepájaním okruhov	22
1.5.1 Nastavenie pripojenia.....	23
1.5.2 Signalizácia	24
1.5.3 Prenosová hierarchia multiplexu založená na FDM	24
1.5.4 Prenosová hierarchia multiplexu založená na TDM.....	25
1.5.5 Priestorové a časové prepínanie.....	27
1.5.6 Zisk kódovania - forward error correction (FEC).....	28
1.6 Sieť s prepojaním paketov	29
1.6.1 Spojovo – orientovaný prístup.....	30

1.6.2	Nespojovo orientovaný prístup	31
1.6.3	Vzťah medzi prepájaním okruhov a prepájaním paketov	32
1.6.4	Vplyvy paketov na návrh siete	33
1.6.5	Paketová hlavička a payload	33
1.6.6	Zložitosť a rôznorodosť sietí	34
1.6.7	Vykonávanie paketových prenosov	34
1.6.8	Vplyv chýb na bitovej úrovni na paketovú úroveň	34
1.7	OSI/ISO referenčný model	35
1.7.1	Protokolová terminológia	35
1.7.2	Princíp vrstvenia	36
1.7.3	Funkcie siedmich vrstiev	37
1.7.4	Zoslabovanie významu OSI/ISO referenčného modelu	38
1.8	ATM protokolový referenčný model	38
1.8.1	Úzkopásmové ISDN (N-ISDN)	38
1.8.2	Širokopásmové ISDN (B-ISDN)	39
1.8.3	ATM technológia	39
1.8.4	Referenčný model	39
1.8.5	Problémy: nedostatok dostupných služieb a aplikácií	40
1.9	Referenčný model internetových protokolov	40
1.9.1	Sieťová vrstva: IP protokol	41
1.9.2	Sieťové technológie	41
1.9.3	Transportná vrstva: TCP a UDP	41
1.9.4	Aplikačná vrstva	42
1.9.5	Problémy: žiadne QoS a žiadna kontrola zdrojov	42
1.10	Satelitná sieť	42
1.10.1	Prístupová sieť	43
1.10.2	Tranzitná (prenosová) sieť	43
1.10.3	Vysielacia (Broadcast) sieť	43
1.10.4	Vesmírny segment	43
1.10.5	Pozemský segment	45
1.10.6	Satelitná obežná dráha	46
1.10.7	Satelitné frekvenčné pásma vysielania	47
1.11	Vlastnosti satelitných sietí	48
1.11.1	Oneskorenie šírením	49

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

1.11.2	Strata šírením a obmedzený výkon	49
1.11.3	Obežná dráha a obmedzená šírka pásma	50
1.11.4	Prevádzková zložitosť pri LEO satelitných systémoch	50
1.12	Kapacita kanála pri digitálnych prenosoch.....	50
1.12.1	Nyquistova rovnica pre bezšumové kanály (The Nyquist formula for noiseless channels)	50
1.12.2	Shannonova rovnica pre zašumené kanály	51
1.12.3	Hraničná kapacita kanálu	51
1.12.4	Shannonova výkonová hranica (-1.6dB).....	52
1.12.5	Shannonova efektívna šírka pásma pre veľké E_b/N_0	53
1.13	Doplnková literatúra	54
1.14	Cvičenie	54
2	Orbitálne dráhy satelitov	56
2.1	Úvod	56
2.2	Kruhová dráha	57
2.2.1	Základné formulácie	57
2.2.2	Narušenie (perturbation) obežnej roviny	60
2.2.3	Viacnásobná satelitná formácia	64
2.3	Eliptická obežná dráha	66
2.3.1	Orbitálny tvar	66
2.3.2	Pozícia satelitu ako funkcia času	71
2.3.3	Rušenie.....	76
2.3.4	Viacnásobna satelitná formácia	77
2.4	Geostacionárne obežné dráhy.....	79
2.4.1	Stabilita komunikačných liniek.....	79
2.4.2	Pohyb na blízko geostacionárnych dráhach.....	79
2.5	Pohyb udržiavaných satelitov.....	83
2.6	Rozsah rýchlosti a jej variácie	84
2.7	Výpočet azimutu a elevácie	86
2.8	Doplnková literatúra	91
3	Energetická bilancia satelitného spoja.....	92
3.1	Konfigurácia mobilného satelitného komunikačného systému.....	92
3.2	Základné parametre v energetickej bilancii satelitného spoja.....	94
3.2.1	Šum terminálu	94

3.2.2	Šumové číslo	95
3.2.3	Šumová teplota prijímača	99
3.2.4	Účinnosť (G/T)	101
3.3	Závislosť medzi prenášaným a prijímaným výkonom	102
3.4	Pomer signál/šum (C/No) v satelitných komunikačných spojoch.....	106
3.5	Strategické technológie pre mobilné satelitné komunikačné systémy	112
3.5.1	Systémové požiadavky a strategické technológie.....	112
3.5.2	Technológia satelitov	113
3.5.3	Informačné technológie	114
3.5.4	Technológia terminálov	115
3.6	Mobilné satelitné transpondéry	115
3.6.1	C/L transpondéry	116
3.6.2	L/C transpondéry	116
3.7	Frekvenčná interferencia	120
3.7.1	Koordinácia interferencie.....	120
3.7.2	Hodnotenie interferencie.....	120
3.7.3	Metódy na redukciu interferencie	127
3.8	Literatúra	129
4	Charakteristiky satelitného spoja a modulácie pre prenos.....	130
4.1	Charakteristika satelitného spoja.....	131
4.2	Modulačné techniky	132
4.2.1	Fázové kľúčovanie (PSK)	133
4.2.2	Binárne fázové kľúčovanie (BPSK).....	133
4.2.3	Kvadratúrny PSK (QPSK) modulačný systém.....	134
4.2.4	Gaussovo – filtrované minimálne kľúčovanie (GMSK)	135
4.3	Bitová chybovosť (BER): parameter kvality modulačných schém.....	135
4.4	Satelitné sieťovanie na fyzickej vrstve.....	136
4.5	Dopredná chybová korekcia (FEC)	138
4.5.1	Lineárne blokové kódy.....	139
4.5.2	Cyklické kódy	139
4.5.3	Trellisové kódovanie a konvolučné kódy.....	140
4.5.4	Zreťazené kódy	141
4.5.5	Turbo kódy	141
4.5.6	Výkonnosť FEC	142

4.6	Techniky viacnásobného prístupu	143
4.6.1	FDMA	144
4.6.2	TDMA	145
4.6.3	CDMA	146
4.6.4	Porovnanie FDMA, TDMA a CDMA	146
4.7	Vymedzenie šírky pásma.....	146
4.7.1	Pevne pridelený prístup.....	147
4.7.2	Prístup pridelený na požiadanie	147
4.7.3	Náhodný prístup	148
4.8	Problémy v satelitných sieťach.....	148
4.8.1	Jednoskokové pripojenie k satelitu	148
4.8.2	Viacskokové pripojenie k satelitu	149
4.8.3	Medzisatelitné linky (ISL)	150
4.8.4	Odovzdávanie	151
4.8.5	Vnútroanténové a medzianténové odovzdanie	152
4.8.6	Zemské pevné pokrytie verzus satelitné pevné pokrytie	152
4.8.7	Smerovanie cez sústavu satelitov.....	154
4.8.8	Vzájomná spolupráca.....	154
4.8.9	Dostupnosť satelitov a diverzita	155
4.9	Doplnkové čítanie.....	156
4.10	Cvičenie.....	156
5	Antény pre mobilné satelitné komunikačné systémy.....	158
5.1	Úvod do teórie antén	158
5.2	Základné parametre antén.....	159
5.2.1	Zisk	159
5.2.2	Vyžarovací diagram, šírka zväzku a postranné laloky.....	161
5.2.3	Polarizácia a axiálny pomer	164
5.2.4	Polarizačné neprispôsobenie	167
5.3	Základné antény používané v MSKS	169
5.3.1	Anténa s krížovým dipólom.....	169
5.3.2	Skrutkovicová anténa.....	171
5.3.3	Mikropásiková patch anténa	174
5.3.4	Fázovaná anténová sústava	176
5.4	Požiadavky na antény prijímačov z GPS a LEO satelitov	183

5.4.1	Mechanické charakteristiky	183
5.4.1.1	Kompaktnosť a malá hmotnosť	183
5.4.1.2	Inštalácia	184
5.4.2	Elektrické charakteristiky	184
5.4.2.1	Frekvencia a frekvenčné pásmo.....	184
5.4.2.2	Polarizácia, axiálny pomer a postranné laloky	185
5.4.2.3	Zisk a pokrytie lúčom	185
5.4.2.4	Sledovanie satelitu	186
5.5	Návrh antény	187
5.5.1	SuperNEC	187
5.5.2	Hardvérové a softvérové požiadavky.....	187
5.5.3	Vstupné užívateľské rozhranie.....	188
5.5.4	Výstupné užívateľské rozhranie.....	193
5.6	Pravouhlá mikropásiková patch anténa	194
5.6.1	Vlastnosti antény.....	194
5.7	Praktický príklad návrhu antény.....	197
5.8	Simulácia navrhutej antény	199
6	Systém satelitnej polohovej navigácie GPS-NAVSTAR.....	203
6.1	Úvod	203
6.2	Princíp určovania polohy.....	204
6.3	Diferenciálna GPS (DGPS)	206
6.4	Základný princíp prijímačov GPS	207
6.5	Vysokofrekvenčný stupeň	208
6.6	Korelátor GPS a spracovanie signálu pomocou DSP.....	208
6.7	Rozhranie pre obsluhu, klávesnica, displej a napájanie	209
6.8	Používané konštrukčné prvky pre prijímače GPS	209
6.9	Segmentácia systému GPS	210
6.9.1	Rozdelenie do blokov	210
6.9.2	Vesmírny segment	211
6.9.3	Riadiaci segment.....	212
6.9.4	Používateľský segment	212
6.10	GPS satelitné signály	213
6.11	Vyhliadky pre používateľov GPS do budúcnosti	218

6.12	Doplnková literatúra	219
7	Opis satelitného prijímača-Dreambox DM 8000 HD PVR	220
7.1	Hardvérové vyhotovenie	221
7.2	Softvérové vybavenie	222
7.3	Záznam	224
7.4	Emulátory	225
7.5	Zálohovanie a obnova dát.....	225
7.6	Záver.....	225

1 Úvod

Táto kapitola si kladie za cieľ oboznámiť sa so základnými pojmami satelitných sietí, vrátane aplikácií a služieb, prepojovaní paketov a okruhov, širokopásmových sietí, sieťových protokolov a referenčných modelov, vlastnosti satelitných sietí, sieťovanie medzi satelitnými a pozemnými sieťami a konvergencie sieťových technológií a protokolov.

Po prečítaní tejto kapitoly by ste mali byť schopní:

- Pochopiť koncepty satelitných sietí a sieťovanie s pozemnými sieťami.
- Poznať rôzne satelitné služby, sieťové služby a kvalitu služieb (QoS).
- Oceniť rozdiely medzi satelitnými sieťami a pozemnými sieťami.
- Opísať funkcie užívateľských terminálov siete a užívateľských pozemských terminálov satelitnej siete ako aj brány pozemských terminálov.
- Poznať základné princípy protokolov a referenčný model ISO.
- Poznať základný referenčný model ATM.
- Poznať základný internetový protokol TCP / IP.
- Pochopiť základné koncepty multiplexovania a viacnásobného prístupu.
- Pochopiť základné pojmy, vrátane prepínania okruhov, virtuálneho prepojovania okruhov a smerovania.
- Pochopiť evolučný proces a konvergenciu sieťových technológií a protokolov.

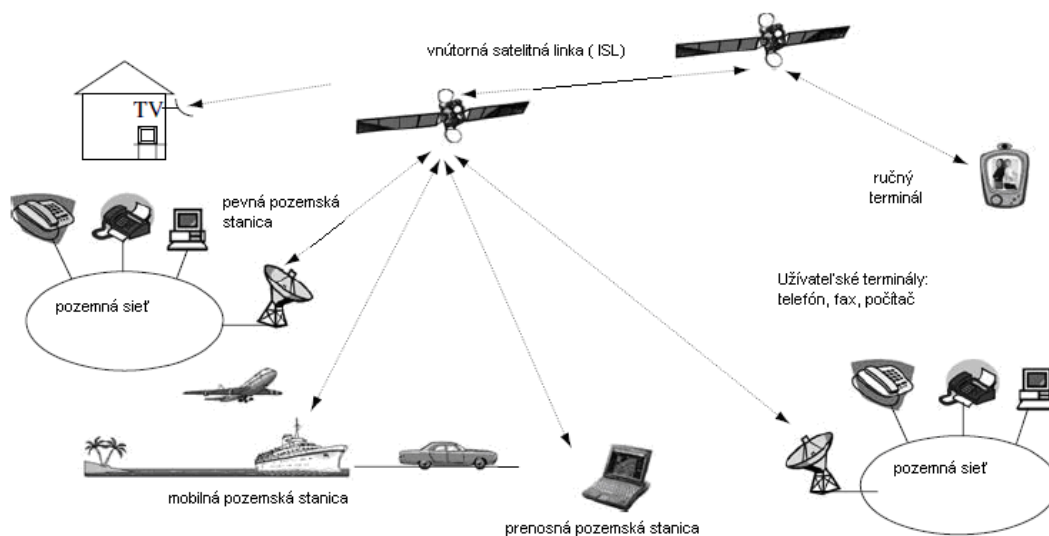
1.1 Aplikácie a služby satelitných sietí

Satelity sú umelé hviezdy na oblohe, a sú často mylne považované za skutočné hviezdy. Pre mnoho ľudí sú plné tajomstiev. Vedci a inžinieri ich prirovnávajú k vtákom - lietajú tam kde ostatným živým tvorom sa môže len zdať. Satelity sledujú krajinu z oblohy, pomáhajú nám nájsť cestu okolo sveta, vysielajú telefónne hovory, e-maily webové stránky, reálne televízne programy cez oblohu. Aktuálne satelity sú veľmi ďaleko, mimo dosahu skutočného vtáka. Satelity vytvarajúce siete a ich vysoká nadmorská výška umožňuje hrať jedinečnú úlohu v globálnej sieťovej infraštruktúry (HND).

Satelitná sieť je rozširujúce sa pole, ktoré sa vyvinulo od významného zrodenia sa prvého telekomunikačného satelitu, od tradičnej telefónie a TV vysielacích služieb pre moderné širokopásmové a internetové siete a digitálne satelitné vysielanie. Významný technologický pokrok v oblasti komunikačných sietí sa zaznamenal v oblasti satelitných sietí. So zväčšovaním šírky pásma a nárokmi na mobilitu sa v blízkej budúcnosti javí satelit ako logická voľba, lebo poskytuje väčšiu šírku pásma s globálnym pokrytím signálu mimo dosahu pozemných sietí a

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

ukazuje veľký prísľub do budúcnosti. S rozvojom sieťových technológií sú satelitné siete čoraz viac a viac integrované do HND. Preto spolupráca satelitných sietí s pozemnými sieťami a protokolmi je dôležitou súčasťou satelitných sietí.



Obr. 1.1 Typické aplikácie a služby satelitnej siete

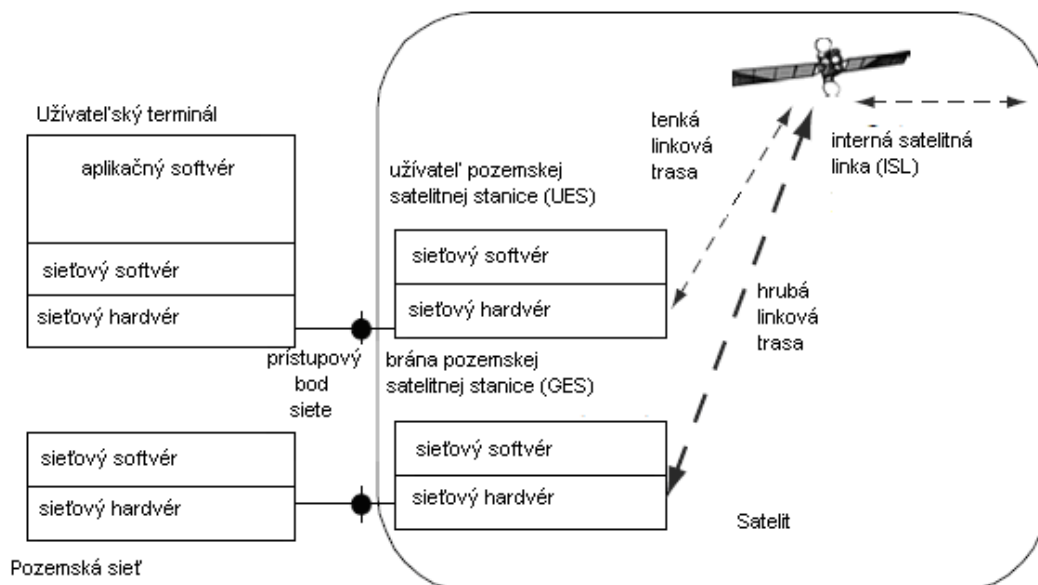
Konečným cieľom satelitnej siete je poskytovať služby a aplikácie. Užívateľský terminál poskytuje služby a aplikácie priamo používateľom. Táto sieť zabezpečuje transportné služby prenosu informácií medzi používateľmi na určitú vzdialenosť. Obrázok 1.1 ilustruje typickú satelitnú konfiguráciu siete skladajúcu sa z pozemných sietí, satelitov s inter-satelitnými spojeniami (ISL), pevnými zemskými stanicami, mobilnými zemskými stanicami, prenosnými a ručnými terminálmi a užívateľskými terminálmi priamo pripojenými k satelitnej linke alebo prostredníctvom pozemných sietí.

1.1.1 Úloha satelitných sietí

V pozemných sieťach je veľa liniek a uzlov potrebných na dosiahnutie veľkých vzdialeností a pokrytie širokého okolia. Sú organizované tak, aby sa dosiahla ekonomická údržba a prevádzka siete. Vlastnosti satelitov ich robia zásadne odlišnými od terestriálnych sietí z hľadiska vzdialenosti, zdieľanej šírky pásma, prenosovej technológie, dizajnu, vývoja, prevádzky, nákladov a potreby používateľov.

Funkčné satelitné siete poskytujú priame spojenie medzi užívateľskými terminálmi, pripájajú terminály k prístupovému bodu pozemnej siete a spájajú pozemné siete. Používateľské terminály poskytujú služby a aplikácie na osoby, ktoré sú často nezávislé od

satelitných sietí, t.j. rovnaký terminál môže byť použitý pre prístup k satelitnej sieti, ako aj k pozemným sieťam. Satelitné terminály, sa tiež nazývajú zemské stanice a sú zemským segmentom satelitných sietí, poskytujú prístupový bod na satelitnú sieť pre používateľské terminály prostredníctvom používateľských zemských staníc (UES) a pozemných sietí cez bránu zemských staníc (GES). Satelit je jadrom satelitných sietí a tiež centrom sietí z hľadiska funkcií a fyzického spojenia.



Obr. 1.2 Ilustruje vzťah medzi používateľom terminálu, pozemnými sieťami a satelitnými sieťami

Typické satelitné siete sa skladajú zo satelitov prepojenými niekoľkými veľkými GES a veľa malými UES. Malé GES sa používajú pre priamy prístup používateľských terminálov a veľké UES pre pripojenie pozemných sietí. Satelity UES a GES definujú hranice satelitnej siete. Podobne ako iné typy sietí, používatelia satelitnej siete vstupujú do siete cez prístupový bod. Pre mobilné a prenosné terminály sú funkcie používateľského terminálu a satelitu UES integrované v samostatnej jednotke, ale pre prenosné terminály sú antény viditeľne odlišné.

Najdôležitejšia úloha satelitných sietí je poskytnúť prístup k používateľským terminálom a prepojenie sietí s pozemnými sieťami tak, aby aplikácie a služby poskytované v pozemných sieťach, ako sú telefóny, televízia, širokopásmový prístup a pripojenie k internetu mohol byť rozšírený do miest, kde káblové a pozemné rádio nie je možné z ekonomického hľadiska inštalovať a udržiavať. Okrem toho môžu satelitné siete priniesť služby a aplikácie pre lode, lietadlá, vozidlá, priestory a miesta mimo dosahu pozemných sietí. Satelity tiež zohrávajú dôležitú úlohu v armáde, meteorológii, globálnych navigačných systémov (GPS), v pozorovaní prostredia, v privátnych dátových a komunikačných službách, v budúcom vývoji nových služieb a aplikácií pre okamžité globálne pokrytie, ako sú širokopásmové siete, a nové generácie mobilných sietí a služieb digitálneho vysielania po celom svete.

1.1.2 Sieťový softvér a hardvér

Pokiaľ ide o implementáciu, používateľský terminál sa skladá zo sieťového hardvéru a softvéru a z aplikačného softvéru. Sieťový softvér a hardvér poskytuje funkcie a mechanizmy odosielania informácií v správnom formáte a používa korektné protokoly na prístupovom bode v sieti. Sieťový softvér a hardvér prijíma tiež informácie od prístupového bodu.

Sieťový hardvér poskytuje prenos signálu, účinnejšie a nákladovo-efektívne využívanie pásma zdrojov a prenosových technológií. Prirodzene, rádiové spojenie slúži na uľahčenie mobility koncových terminálov súvisiace s prístupovou linkou, a vysoko-kapacitné optické vlákno sa používa pre chrbticové spojenie.

S pokrokom digitálneho spracovania signálu (DSP) sú tradičné hardvérové implementácie stále viac a viac nahradzané softvérom pre zvyšovanie pružnosti rekonfigurácie, čo vedie k zníženiu nákladov. Podiel implementácie sa stáva čím ďalej viac a viac softvérovou záležitosťou a menej hardvérovou záležitosťou. Veľa hardvérov v prvých implementáciách sú emulované v softvéri, aj keď hardvér je základom každého systému implementácie.

Napríklad, tradičné telefónne siete sú prevážne tvorené hardvérom, zatiaľ čo moderné telefónne siete, počítačové a dátové siete alebo internet sú prevážne tvorené softvérom.

1.1.3 Satelitné sieťové rozhrania

Typické satelitné siete majú dva typy externých rozhraní: jedno rozhranie je medzi satelitom UES a používateľským terminálom a druhé rozhranie je medzi satelitom GES a pozemnými sieťami. Interne sú tam tri typy rozhrania: medzi UES a satelitnou komunikáciou užitočného zaťaženia systému, medzi GES a satelitnou komunikáciou užitočného zaťaženia systému a medzi satelitmi ako inter-satelitné spojenia (ISL). Všetky využívajúce rádiové linky, okrem ISL, môžu všetci používať tiež optické linky.

Rovnako ako pri fyzických kábloch aj tu je šírka pásma jedným z najdôležitejších obmedzujúcich zdrojov pre doručovanie informácií na satelitných sieťach. Na rozdiel od káblov, šírka pásma nemôže byť vyrobená, tá sa môže len zdieľať a maximálne využívať. Ďalším dôležitým zdrojom je prenosový výkon. Tento výkon je obmedzený pre používateľov vyžadujúcich mobilitu alebo terminály inštalované vo vzdialených miestach, ktoré sú založené na batériach, dodávke energií a tiež pre komunikáciu systémov na palubách satelitov, ktoré sa spoliehajú na batérie a solárnu energiu. Šírka pásma a vysielačový výkon v rámci prenosových podmienok a životného prostredia spoločne stanovuje kapacitu satelitných sietí.

Satelitná sieť zdieľa veľa základných pojmov so všeobecnými sieťami. Pokiaľ ide o topológiu, môže byť nakonfigurovaná do hviezdy alebo do zmiešanej topológie. Pokiaľ ide o prenosové technológie tie možno nastaviť pre pripojenia bod-bod, bod-viaceré body alebo

viaceré body-viaceré body. Pokiaľ ide o rozhranie, môžeme ľahko mapovať satelitnú sieť vo všeobecnej sieti pojmy ako je používateľské rozhranie siete (UNI) a rozhranie sieťových uzlov (NNI).

Keď musia byť spojené dve siete je potrebné sieť-sieť rozhranie, čo je rozhranie sieťového uzla v jednej sieti so sieťovým uzlom v inej sieti. Majú podobné funkcie ako NNI. Preto môže byť NNI použité tiež na označovanie sieť-sieť rozhrania.

1.1.4 Sieťové služby

UES a GES poskytujú sieťové služby. V tradičných sieťach, sú služby rozdelené do dvoch kategórií: teleslužby a nositeľia služieb. Teleslužby sú špičkové služby, ktoré môžu byť použité priamo používateľom ako napríklad telefón, fax, poštové služby, video a dátové služby. Kvalita služieb (QoS) na tejto úrovni je orientovaná používateľsky t.j. QoS označuje vnímanie kvality používateľom, ako napríklad priemerné cieľové skóre (MOS). Nositeľ služby je nižšia úroveň služby poskytovaná sieťou na podporu teleslužieb. QoS na tejto úrovni je ako v centralizovanej sieti, tj. oneskorenie prenosu, degradácia signálu, chyby prenosu a prenosová rýchlosť.

Existujú metódy na mapovanie medzi týmito dvoma úrovňami služieb. Táto sieť potrebuje alokáciu zdrojov s cieľom splniť požiadavky QoS a optimalizovať výkon siete.

Siete QoS a užívateľ QoS si odporujú v cieľoch objektívneho nastavenia prevádzkového zaťaženia, tj. my môžeme zvýšiť QoS tým, že znížime prevádzkové zaťaženie v sieti alebo zvýšime sieťové zdroje, avšak to môže znížiť využívanie sietí operátormi sietí. Prevádzkovatelia sietí môžu tiež zvýšiť využitie siete zvýšeným prevádzkovým zaťažením, ale toto môže mať vplyv na QoS používateľa.

Optimalizáciu využitia siete s daným zaťažením siete za podmienok splnenia požiadaviek QoS používateľa závisí od schopností prevádzkových inžinierov.

1.1.5 Aplikácie

Aplikácie sú kombinácie jednej alebo viacerých sieťových služieb. Napríklad, tele-vzdelávanie a aplikácie telemedicíny, sú založené na kombinácii hlasových, video a dátových služieb. Kombinácia hlasu, videa a dát sú tiež označované ako multimediálne služby. Niektoré aplikácie môžu byť použité v rámci siete služieb pre vytvorenie nových aplikácií.

Služby sú základnými komponentami poskytované sieťou. Aplikácie sú postavené z týchto základných komponentov. Často sú termíny aplikácií a služieb v literatúre zamieňané. Niekedy je užitočné ich odlišovať.

1.2 ITU-R definícia satelitných služieb

Satelitné aplikácie sú založené na základných satelitných službách. Vzhľadom na vlastnosti rádiovkej komunikácie, satelitné služby sú obmedzené na frekvenčné pásma, ktoré máme k dispozícii. Rôzne satelitné služby boli definované podľa ITU rádiokomunikačného normalizačného úradu (ITU-R) na účely pridelenia šírky pásma, plánovania a riadenia pevných satelitných služieb (FSS), mobilných satelitných služieb (MSS) a vysielacej satelitnej služby (BSS).

1.2.1 Pevné satelitné služby (FSS)

FSS je definovaná ako služba rádiovkej komunikácie medzi danou pozíciou na zemskom povrchu a jednou alebo viacerými satelitmi. Tieto stanice na zemskom povrchu sú nazývané zemské stanice FSS. Stanica nachádzajúca sa na palube satelitu, pozostávajúca predovšetkým zo satelitných transpondérov a súvisiacich antén, sa nazýva kozmická stanica FSS. Samozrejme, že nové generácie satelitov majú integrované sofistikované komunikačné systémy vrátane prepínania na palube. Komunikácia medzi pozemnými stanicami je cez jeden satelit alebo viaceré satelity prepojené prostredníctvom ISL. Je tiež možné mať dva prepojené satelity prostredníctvom spoločnej zemskej stanice bez ISL. FSS zahŕňa spojenie linky a súvislosť medzi pevnou pozemskou stanicou a satelitnými vysielacími službami (BSS) a mobilnými satelitnými službami (MSS). FSS podporuje všetky typy telekomunikačných a dátových sieťových služieb, ako je telefonovanie, fax, dáta, video, TV, internet a rádio.

1.2.2 Mobilné satelitné služby (MSS)

MSS je definovaná ako služba rádiovkej komunikácie medzi pohyblivou pozemskou stanicou a jednou alebo viacerými satelitmi. To zahŕňa námorné, letecké a pozemné MSS. Vzhľadom na požiadavky na mobilitu majú krajiny často malé mobilné terminály a niektoré terminály sú dokonca iba ručné zariadenia.

1.2.3 Vysielania satelitnej služby (BSS)

BSS je rádiokomunikačná služba, v ktorej sú signály vysielané alebo prenášané prostredníctvom satelitov a sú určené pre priamy príjem širokou verejnosťou prostredníctvom televízie iba cez anténu (TVRO). Satelity realizované pre BSS sú často označované ako priame vysielanie zo satelitov (DBS). Priamy príjem zahŕňa individuálny priamy prístup do domu (DTH)

a spoločnú televíznu anténu (CATV). Nová generácia BSS môže mať tiež spätný kanál cez satelit.

1.2.4 Ostatné satelitné služby

Niektoré iné satelitné služby sú určené pre špecifické aplikácie, ako je armáda, rádio určenia, navigácia, meteorológia, prieskumy zeme a prieskum vesmíru. Skupina priestorových staníc a pozemných staníc pracuje spoločne a rádiová komunikácia sa nazýva satelitný systém. Pre väčšie pohodlie sa niekedy satelitný systém alebo jeho časť sa nazýva tiež satelitná sieť. V rámci sieťových protokolov vidíme, že satelitný systém nesmie podporovať všetky vrstvy funkcií protokolu (fyzickej vrstvy, linkovej vrstvy, alebo sieťovej vrstvy).

1.3 ITU-T definícia sieťových služieb

Počas procesu rozvoja širokopásmových komunikačných sieťových štandardov, ITU telekomunikačný normalizačný úrad (ITU-T) definuje telekomunikačné služby poskytované používateľom siete. Sú to dve hlavné triedy služieb: interaktívne a distribučné služby, ktoré sa ďalej delia na podtriedy.

1.3.1 Interaktívne služby

Interaktívne služby ponúkajú používateľovi možnosť komunikovať s iným používateľom v reálnom čase pomocou konverzácie a správ alebo pomocou interakcií s informačnými servermi v počítačoch. Tu môžeme vidieť, že rôzne služby môžu mať rôzne požiadavky na šírku pásma a QoS od sietí na podporu týchto služieb.

Podtriedy interaktívnych služieb sú definované nasledovne:

- **Konverzačné služby:** konverzačné služby všeobecne poskytujú prostriedky pre obojsmernú komunikáciu v reálnom čase, koniec-koniec informácie sa dopravujú od používateľa k používateľovi alebo medzi používateľom a hosťiteľom (napr. pre spracovanie dát). Tok informácií od používateľa môže byť obojsmerný symetrický, obojsmerný asymetrický a v niektorých špecifických prípadoch (napr. ako je videodohľad), môže byť tok informácií jednosmerný. Tieto informácie sú generované zaslaním používateľa alebo používateľov, a je venovaná jednej alebo viacerým komunikačným partnerom na prijímacej strane. Príklady širokopásmových služieb sú konverzačné telefónie, videotelefonovanie a videokonferencie.

- **Zasielanie správ:** služby zasielania správ ponúkajú komunikáciu medzi jednotlivými používateľmi prostredníctvom ukladania a prepínania dát do pamäťovej jednotky poštovej schránky alebo funkcie spracovanie správ (napr. informácie editácie, spracovanie a konverzia). Príklady širokopásmového pripojenia služieb prenosu správ sú spracované služby a poštové služby pre pohyblivé obrazy (filmy), vysoké rozlíšenie snímok a zvukových informácií.
- **Vyhľadávacie služby:** používateľ vyhľadávacích služieb má možnosť získať informácie uložené v informačnom stredisku aj pre verejné použitie. Táto informácia bude používateľovi zaslaná prostredníctvom dopytu. Informácie možno získať na individuálnom základe. Okrem toho čas, v ktorom sa informačná sekvencia začína je pod kontrolou používateľa. Sú to napríklad širokopásmové vyhľadávacie služby pre fotografie a filmy vo vysokom rozlíšení, audioinformácie a archívne informácie.

1.3.2 Distribučné služby

Tento tradičný model vysielania služieb a videa na požiadanie šíri informácie pre veľký počet používateľov. Požiadavky na šírku pásma a QoS, sú úplne odlišné ako na interaktívne služby.

Distribučné služby sú ďalej rozdelené do nasledujúcich podtried:

- **Distribučné služby bez používateľmi individuálne ovládanej prezentácie:** k týmto službám patrí televízne vysielanie. Poskytuje nepretržitý tok informácií, ktorý je distribuovaný z centrálného zdroja pre neobmedzený počet oprávnených prijímačov pripojených k sieti. Používateľ môže mať prístup k tomuto toku informácií bez toho, aby bol schopný určiť, v ktorom okamžiku rozdelenia reťazca informácií bude pripojený. Používateľ nemôže kontrolovať začatie a poradie prezentácií vysielaných informácií. V závislosti od časového pripojenia k používateľskému prístupu nebudú informácie predložené od začiatku. Napríklad sú to sú vysielacie služby pre televízne a rozhlasové programy.
- **Distribučné služby s používateľmi individuálne ovládanej prezentácie:** služby tejto triedy tiež šíria informácie z centrálného zdroja pre veľký počet používateľov. Avšak, informácie sú poskytované ako sekvencie informačných entít (napr. rámy) s cyklickým opakovaním. Takže, používateľ má možnosť individuálneho prístupu k cyklickým distribuovaným informáciám a môže riadiť začiatok a poradie vysielania. Vzhľadom na cyklické opakovanie, budú informačné entity vybrané, aby používateľovi mohli byť predložené od začiatku. Jedným z príkladov takejto služby je video na požiadanie.

1.4 Internetové služby a aplikácie

Podobne ako počítače bol v posledných rokoch internet premiestňovaný a svoje využitie našiel vo výskumných ústavov, univerzitách a veľkých organizáciach ale aj obyčajných rodinných domoch a v malých podnikoch. Internet bol pôvodne navrhnutý tak, aby prepojoval rôzne typy sietí, vrátane LAN, MAN a WAN. Tieto siete spojili rôzne typy počítačov, aby spoločne zdieľali zdroje, ako je pamäť, výkon procesora, grafické zariadenia a tlačiarne. Môžu byť použité tiež pre výmenu dát a pre používateľský prístup k dátam na niektorom z počítačov v rámci internetu.

Dnes je internet schopný podporovať nielen dáta, ale aj obraz, hlas a video. Internet môže podporovať rôzne sieťové služby a aplikácie, ako sú IP telefónia, videokonferencia, tele-vzdelávanie a telemedicína.

Požiadavky na nové služby a aplikácie jednoznačne zmenili pôvodné ciele na internete. Preto sa internet vyvíja smerom k novej generácii, na podporu nie sú použité iba statické služby počítačovej siete ale aj služby v reálnom čase-používateľa vrátane telefónie. Nakoniec to povedie ku konvergencii internetu a telekomunikačných sietí pre budúcu infraštruktúru globálnej siete, kde satelit bude hrať dôležitú súčasť.

1.4.1 World Wide Web (WWW)

WWW umožňuje širokú škálu internetových služieb a aplikácií vrátane e-obchodu, e-biznisu a e-vládnutia. To tiež umožňuje virtuálne stretnutie s novým štýlom práce, komunikácie, voľného času a života. WWW je aplikácia postavená na vrchole internetu, ale nie je na internete sama. Je vidieť, že v základnom princípe internetu nebolo v posledných 40 rokoch veľa zmien, ale internet významne zmenili, najmä v koncových, používateľských softvéroch, službách, v aplikáciách a v rozhraniach človek-počítač (HCI).

WWW je distribuovaný, hypermediálne-založený internetový informačný systém vrátane prehliadača pre používateľov, vyžadava si informácie, servery poskytujú informácie na internete, transportujú požiadavky od používateľov k serverom a informácie zo serverov k používateľom.

Hypertext Transfer Protocol (HTTP) bol vytvorený v roku 1990, v CERNe, v Európskom laboratóriu časticovej fyziky v Ženeve, vo Švajčiarsku, ako prostriedok pre rýchle a lacné zdieľanie vedeckých údajov na medzinárodnej úrovni. Na dosiahnutie cieľa sa vytvoril hypertextový značkovací jazyk (HTML), čo je podmnožina všeobecného značkovacieho jazyka (GML) a používa sa na to, aby sa odkaz na webovej stránke ukazoval aj na iných stránkach alebo súboroch v akomkoľvek serveri pripojeného k sieti. Tento nelineárny, nehierarchický spôsob prístupu k informáciám bol prelomový v zdieľaní informácií. Rýchlo sa stal hlavným

zdrojom prevádzky na internete. Existuje široká škála typov informácií (text, grafika, zvuky, videá, atď). Je možné použiť pre prístup k webu informácie od takmer každého serveru pripojeného k internetu vo svete.

Základné prvky pre prístup na WWW, sú:

- HTTP: protokol je používaný pre dopravu WWW webových stránok.
- URL (Uniform Resource Locator): definuje formát, ktorý rieši jedinečné umiestnenie webovej stránky, zisťuje IP adresu počítača, číslo portu v počítači a systéme a umiestňuje stránky v systéme súborov.
- HTML: programovacie 'značky' sú pridané do textových dokumentov, ktoré sú zasa pridané do hypertextového dokumentu.

V pôvodnom WWW, URL identifikoval statický súbor. Teraz to môžu byť dynamické webové stránky vytvorené podľa informácií poskytnutých používateľom, alebo to môžu byť tiež aktívne webové stránky, čo je časť programovacieho kódu, aby sa po kliknutí stiahol a spustil na počítači používateľa prehliadač.

1.4.2 File Transfer Protocol (FTP)

FTP je protokol aplikačnej vrstvy, ktorý poskytuje služby prenosu súborov medzi lokálnym počítačom a vzdialeným počítačom. FTP je špecifická metóda pripojenia k ďalším internetovým stránkam pre prijímanie a odosielanie súborov. FTP bol vyvinutý v počiatkoch internetu na kopírovanie súborov z počítača na počítač pomocou príkazového riadka. S príchodom WWW prehliadača už ale nepotrebujeme poznať FTP príkazy a kopírovať ich do iného počítača, lebo webové prehliadače majú tieto príkazy už integrované vo funkciách prehliadača.

1.4.3 Telnet

Toto je jedna z prvých internetových služieb poskytujúca text-založená na prístupe k vzdialenému počítaču. Telnet môžeme použiť na lokálnom počítači pre prihlásenie sa na vzdialený počítač cez Internet. Normálne je potrebné vedieť účet na vzdialeného hostiteľa, ktorý používateľ musí zadať do systému. Po pripojení sa medzi lokálnym počítačom a vzdialeným

počítačom nastavenie umožňuje používateľom prístup k vzdialenému počítaču, ako keby sa jednalo o lokálny počítač. Takýto jav nazývame lokálna transparentnosť, tj používateľ nemôže spoznať rozdiel medzi odpoveďou od lokálneho počítača alebo od vzdialeného počítača. To nazývané tiež časom transparentnosti vtedy ak odpoveď je taká rýchla, že používateľ nemôže poznať rozdiel medzi miestnymi počítačmi a vzdialenými počítačmi prostredníctvom odpovede času. Transparentnosť je dôležitým prvkom v distribuovaných informačných systémoch.

1.4.4 Elektronická pošta (e-mail)

E-mail je poštový systém, ktorý je ale oveľa rýchlejší a lacnejší a predstavuje prenos informácií bez dokladov alebo iných materiálov, napr si môžeme objednať pizzu cez internet, ale nemôžeme ju prijať pomocou internetu. Na začiatku e-mailu boli povolené iba textové správy, ktoré boli odoslané od jedného používateľa k inému cez internet. E-mail môže byť taktiež automaticky odoslaný na číselné adresy. Elektronická pošta sa rozrástla v priebehu posledných 20 rokov používaným technických nástrojov, skúmaním vedcov, obchodných nástrojov ako obyčajné faxy a listy. Každý deň, milióny a milióny e-mailov sú odosielané prostredníctvom intranetových systémov a internetu. Môžeme tiež použiť e-mailový adresár a poslať e-mail skupine ľudí. Ak je e-mail zaslaný z emailového adresára, systém rozdeľuje e-mail pre jednotlivé skupiny alebo používateľov. Taktiež je možné posilať veľké prílohy (súbory) ako je hudba, alebo videoklip. Úspešnosť e-mailových systémov taktiež spôsobuje problémy pre internet, vo forme vírusov, nevyžiadanej pošty, ktorá sa šíri prostredníctvom emailu, internetu a ohrozuje takto veľa počítačov.

1.4.5 Skupinové vysielanie (multicast) a distribúcia obsahu

To umožňuje distribúciu informácie do viacerých prijímačov prostredníctvom internetu alebo intranetu. Príklad aplikácie je distribúcia obsahu nových služieb, informácie o stave zásob, športové, obchodné informácie, zábava, technológie, počasie a ďalšie. Taktiež umožňuje videovysielanie a hlasové vysielanie v reálnom čase cez internet. Toto predstavuje rozšírenie pôvodného návrhu internetu.

1.4.6 Prenos hlasu cez internetový protokol (VoIP)

VoIP je jedným z dôležitých služieb v rámci rozvoja. Tento typ služby pracuje v reálnom čase a je vhodný pre tradičné telekomunikačné siete. V tomto sa líši od pôvodných internetových služieb. Má úplne odlišné charakteristiky prevádzky, QoS požiadavky, šírku pásma a sieťové prostriedky.

Digitalizované toky hlasu sú rozčlenené do hlasových rámcov. Tieto rámce sú zapúzdrené do hlasových paketov pomocou real-time Transport Protocol (RTP), ktorý umožňuje ďalšie informácie pre služby v čase vrátane časových značiek (stamps). Real-time transport Control Protocol (RTCP) je určený na prepravu kontrolných a signalizačných informácií použitých pre službu VoIP.

RTP pakety sú uvádzané užívateľským datagramovým protokolom (UDP), ktorý sa uskutočňuje prostredníctvom internetu a IP paketov. QoS VoIP závisí od aktuálneho stavu siete z hľadiska preťaženia, prenosu chyby, premenlivého oneskorenia (jitter) a oneskorenia (delay). Záleží tiež od kvality a dostupnej šírky pásma siete, chybovosti a prenosovej rýchlosti.

Hoci RTP a RTCP boli pôvodne navrhnuté pre podporu telefónie a hlasových služieb, nie sú obmedzené len na tieto služby, preto môžu podporovať v reálnom čase multimediálne služby vrátane video služby. Využitím časovej značky generovanej pri odosielateľovi, prijímač je schopný synchronizovať rôzne druhy médií a reprodukovat informácie v reálnom čase.

1.4.7 Systém doménových mien (DNS)

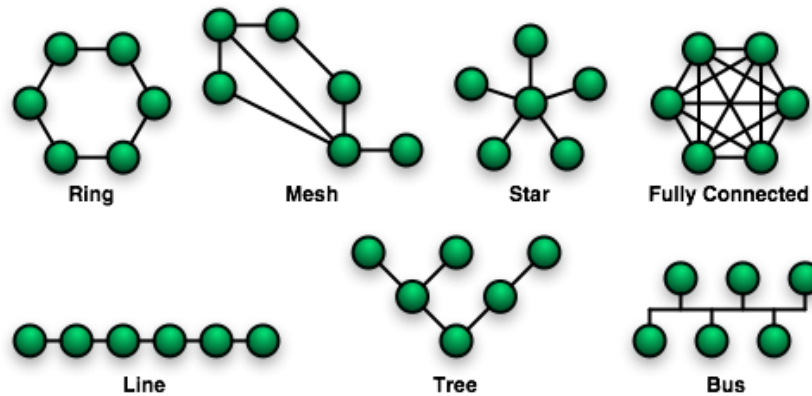
DNS je príkladom služby aplikačnej vrstvy. Nie je bežne používaný používateľmi, ale predstavuje službu, ktorú používajú ostatné internetové aplikácie. Je to internetová služba, ktorá prekladá názvy domén na IP adresy, pretože názvy domén tvorené abecednými znakmi sú jednoduchšie zapamätateľné. Internet je však založený na základe IP adresy. Zakaždým, keď použijete názov domény, služba DNS musí preložiť meno na zodpovedajúcu IP adresu. Napríklad názov domény `www.surrey.ac.uk` sa bude prekladať na IP adresu: `131.227.102.18`. Táto IP adresa môže byť tiež použitá priamo aj v číselnom tvare.

DNS je v skutočnosti distribuovaný systém na internete. Ak jeden DNS server nevie, ako preložiť konkrétny názov domény, požiada druhý DNS server dovedy, kým nie je vrátená správna IP adresa.

DNS je organizovaná ako hierarchická distribuovaná databáza, ktorá obsahuje mapovanie doménových mien pre rôzne druhy informácií vrátane adresy IP. Preto DNS môže byť tiež použitý na objavovanie iných informácií uložených v databáze.

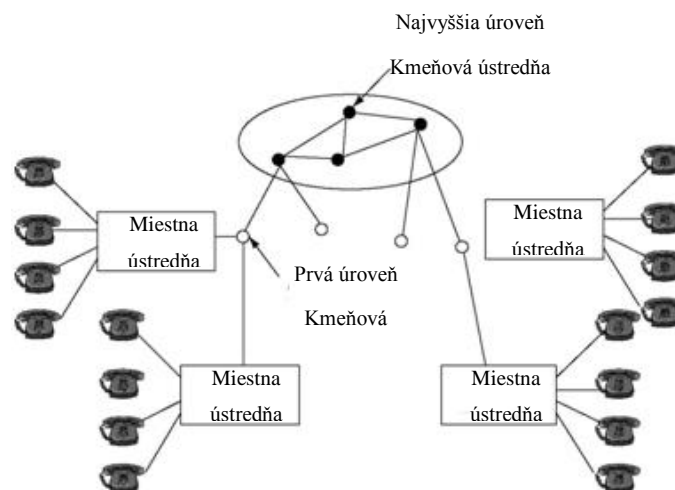
1.5 Sieť s prepájaním okruhov

Pojem siete s prepájaním okruhov pochádza zo začiatkov analógovej telefónnej siete. Sieť môže mať rôznu topológiu ako je napr. hviezda, strom, kruh na rôznych úrovniach na dosiahnutie potrebného pokrytia a škálovateľnosti. Obrázok 1.3 znázorňuje typické topológie sietí.



Obr. 1.3 Typická topológia sietí – kruh, hviezda, zbernica, strom ...

Príklad telefónnych sietí je na obrázku 1.4. Na úrovni miestnej ústredni (LEX) možno pripojiť niekoľko telefónov hviezdicovou topológiou (úplná sieťová topológia nie je prispôsobiteľná).



Obr. 1.4 Príklad telefónnych sietí

Každá kmeňová ústredňa (TEX) spája niekoľko miestnych ústrední a tie tvoria prvú úroveň hierarchie. V závislosti od rozsahu siete, môže byť v hierarchii niekoľko úrovní. Na najvyššej úrovni je počet ústrední malý, preto sa používa sieťová topológia, pridaním redundancie sa efektívnejšie využijú sieťové okruhy. Všetky telefóny majú vyhradené spojenie na miestnu ústredňu. Spojenie je nastavené tak, že keď požiada používateľ o vytočenie telefónneho čísla, vyšle signál do siete pre vytvorenie spojenia.

1.5.1 Nastavenie pripojenia

Ak chceme uskutočniť spojenie, všetky okruhy musia byť pripojené, spájajúce dve telefónne sady spoločne. Ak sú dva telefóny pripojené súčasne k rovnakej miestnej ústredni (LEX), môže LEX nastaviť spojenie priamo. V opačnom prípade sú potrebné kroky na vyššej úrovni, kmeňová ústredňa (TEX) vytvorí v sieti s prepájaním okruhov prepojenie k vzdialenej LEX a následne do cieľového telefónu. Každá TEX takto zabezpečuje smerovanie a signalizáciu. Každý telefón má danú jedinečnú adresu alebo číslo pre identifikáciu, ktoré je pripojené k LEX (miestna ústredňa). Sieť vie, ktoré TEX (kmeňové ústredne) a LEX (miestne ústredne) sú pripojené. Signál vypnutého telefónu a vytáčaného telefónneho čísla poskytujú signalizačné informácie pre sieť, aby mohla nájsť optimálnu cestu k vytvoreniu spojenia dvoch telefónov určených telefónnym číslom volajúceho a telefónnym číslom volaného. Ak je pripojenie úspešné, môže prebiehať komunikácia a spojenie je prerušené ak sa ukončí komunikácia. Ak sa pripojenie nepodarí, alebo je blokované kvôli nedostatku okruhov v sieti, musíme to skúsiť znova. V tomto prípade si môžeme predstaviť, že vzhľadom k širokému pokrytiu satelitných systémov, je možné mať satelity ako LEX (miestna ústredňa) pre priame spojenie telefónov, alebo sa správať ako spoj na pripojenie LEX na TEX, alebo na spojenie TEX dohromady. Úloha satelitu v sieti má významný vplyv na zložitosť, a náklady satelitných systémov a priame spojenie vyžaduje rôzne prenosové rýchlosti. Satelity môžu byť použité pre priame spojenie bez prísnej hierarchie pre potrebnú škálovateľnosť v pozemných sieťach.

1.5.2 Signalizácia

Súčasne generácie prepínačov sa môžu zaoberať len jednoduchou signalizáciou. Signalizačná informácia bola obmedzená na minimum a signál používa rovnaký kanál ako kanál pre hlas. Moderné prepínače sú schopné sa vysporiadať s veľkým množstvom kanálov, a preto je signalizácia. Spínače samy o sebe majú rovnaký výkon spracovania ako počítače, sú veľmi flexibilné a sú schopné vysporiadať sa s dátovými signálmi. To vedie k oddeleniu prenosu signálu a používateľskej prevádzky k rozvoju signalizácia so spoločným kanálom (CCS). V systémoch CSS sú signály prenášané rovnakým kanálom cez dátovú sieť, signál sa oddelil od hlasovej prevádzky. Kombináciou flexibilných počítačových spínačov a CCS umožňuje lepšiu kontrolu a správu telefónnej siete a umožňuje nové služby, ako je presmerovanie hovorov, spätné volanie a čakanie hovoru. Signalizácia medzi sieťovými zariadeniami môže byť veľmi rýchla, ale reakcie ľudí sú stále rovnaké. Výpočtový výkon zariadení sa môže výrazne zvýšiť, ale nezvýši sa schopnosť reakcie ľudí.

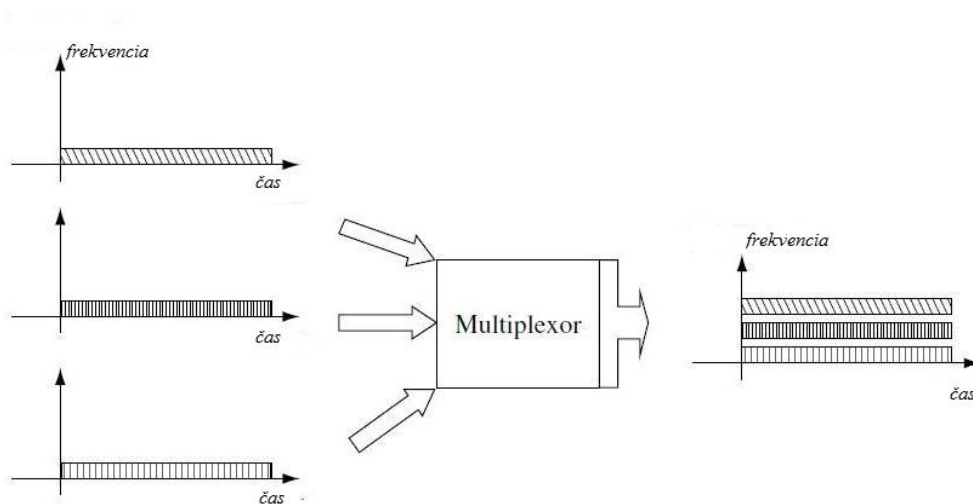
1.5.3 Prenosová hierarchia multiplexu založená na FDM

Frekvenčne delený multiplex (FDM) je technika zdieľania šírky pásma medzi rôzne pripojenia v oblasti frekvencií. Všetky prenosové systémy sú navrhované na prenos signálov v

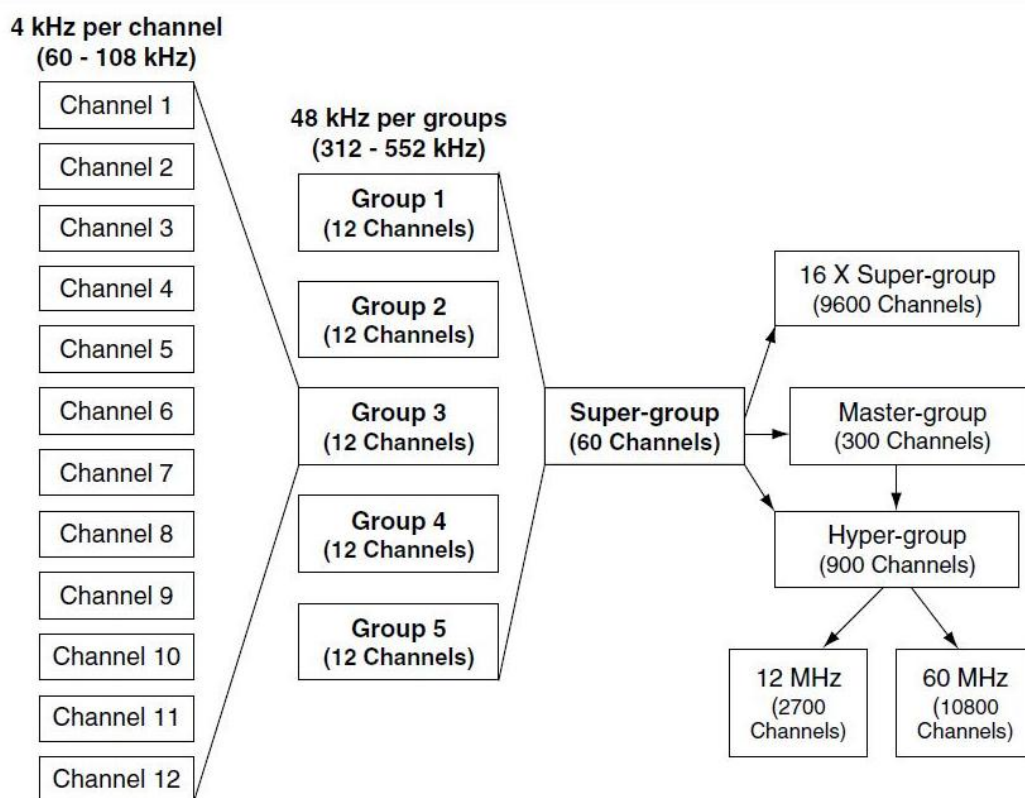
rámci obmedzenia šírky pásma merané v hertzoch (Hz). Systém môže prideliť časť pásma tzv. kanál pre pripojenie k podpore sieťových služieb, ako je telefonovanie, skôr než pridelí fyzicky kábel na pripojenie. Toto účinne zvyšuje kapacitu. Ak je šírka pásma rozdelená na kanály, každý kanál môže podporovať spojenie. Preto možno spojenia z mnohých fyzických liniek multiplexovať do jedného fyzického spojenia s viacerými kanálmi. Podobne, multiplexované pripojenie v jednom fyzickom pripojení môže byť de-multiplexed do mnohých fyzických pripojení. Obrázok 1.5 zobrazuje pojem multiplexovania v oblasti frekvencie. Uvedený kanál možno použiť na prenos digitálnych aj analógových signálov. Avšak analógový prenos je výhodnejší pre spracovanie vo frekvenčnej oblasti. Tradičný telefónny kanál vysiela zvuk pri šírke pásma 3,1 kHz (0,3 – 3,4 kHz). To je prenášané vo forme jedného postranného pásma (SSB), signál s potlačením 4 kHz. Prostredníctvom multiplexovania, môže 12 alebo 16 kanálov tvoriť jednu skupinu. Päť skupín tvorí super-group, super-group tvorí master-group, alebo hyper-group a super-group a master-group. Obrázok 1.6 znázorňuje hierarchiu analógového vysielania.

1.5.4 Prenosová hierarchia multiplexu založená na TDM

Digitálne signály môžu byť spracované pohodlne v časovej oblasti. Časovo delený multiplex (TDM) je technika na zdieľanie šírky pásma v časovej oblasti. Časový úsek tzv. rámec môže byť rozdelený do časových slotov. Každý časový slot má pridelené spojenie. Rámec môže podporovať rovnaký počet spojov ako je počet slotov. Napríklad základné digitálne pripojenie pre telefonovanie je 64 kbit/s. Každý byte zaberie 125 mikrosekúnd k prenosu. Ak je prenosová rýchlosť veľmi vysoká, možno každý bajt prenášať 125 mikrosekúnd, a potom časový rámec dĺžky 125 mikrosekúnd môže byť rozdelený do viacerých časových úsekov podporujúci spojenie pre každý slot.

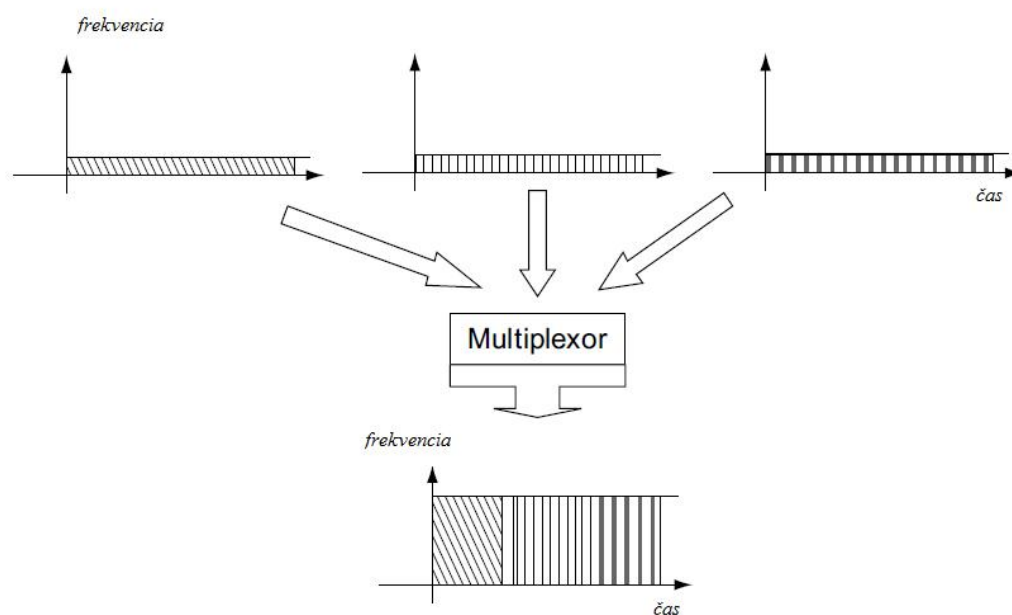


Obr. 1.5 Multiplexovanie v oblasti frekvencie

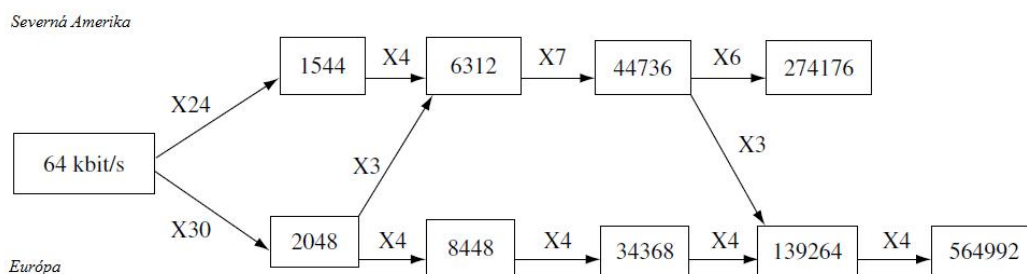


Obr. 1.6 Hierarchia analógového vysielania

Niekoľko pomalých bitových tokov môže byť multiplexovaných do jedného vysokorýchlostného dátového toku. Obr. 1.7 zobrazuje pojem multiplexovania v časovej oblasti.



Obr. 1.7 Hierarchia multiplexovania v časovej oblasti

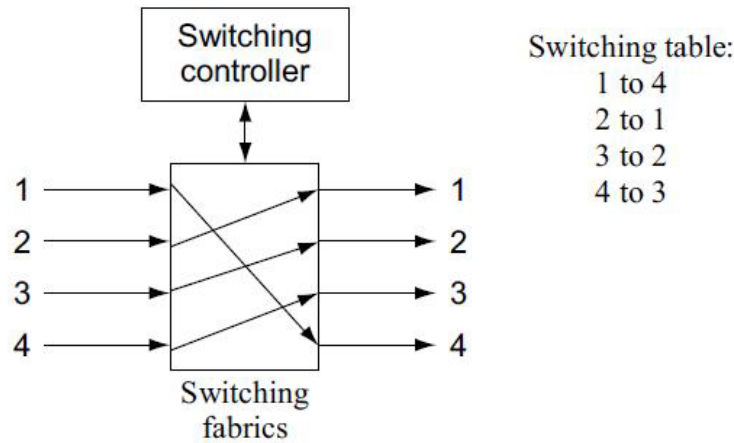


Obr. 1.8 Hierarchia digitálneho prenosu

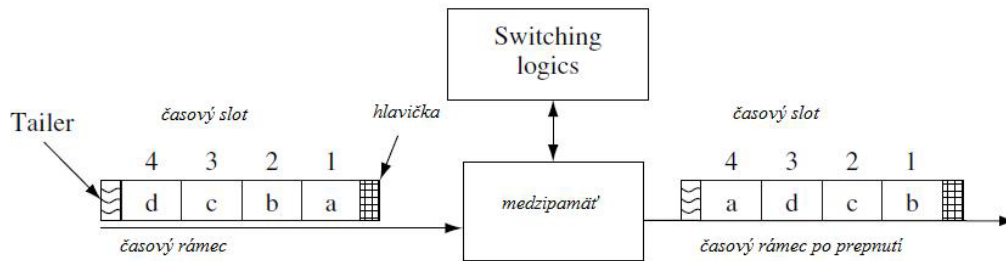
Digitálne toky vo zväzkoch (trunks) a prístupové linky sú organizované do štandardnej digitálnej digitálneho signálovej hierarchie (DSH) v Severnej Amerike: DS1, DS2, DS3, DS4 a vyššie úrovne začínajú od 1,544 Mbit/s, v Európe sú organizované do E1, E2, E3, E4 a vyššie úrovne začínajú od 2,048 Mbit/s. Dve hierarchie môžu na spolupracovať len na určitých úrovniach, avšak základná prenosová rýchlosť 64 kbit/s potrebná pre prenos jedného telefónneho kanála je rovnaká. Dodatočné bity, alebo bajty sú pridané do dátového multiplexu pre účely signalizácie a synchronizácie, ktoré sú tiež rôzne medzi systémami používanými v Severnej Amerike a v Európe. Obr. 1.8 zobrazuje hierarchie digitálneho prenosu.

1.5.5 Priestorové a časové prepínanie

V telefónnych sieťach a vysielacích sieťach je využitie každého kanála zvyčajne niekoľko minút, alebo hodín. Požiadavky na šírku pásma sú tiež definované. Napríklad, dobre definované sú kanály pre telefónne služby a služby televízneho vysielania. Ak prepínač nemá v medzipamäti žiadne informácie, miesto, pokiaľ ide o šírku pásma či časové úseky musí byť rezervované tak, aby tok informácií prešiel cez spínače, ako je uvedené na obrázku 1.9. To znamená, že prepínač môže vykonávať len priestorové prepínanie. Ak prepínač má vo vyrovnávacej pamäti rámce časových slotov, výstupný slot obsahuje rámec ako je znázornené na obrázku 1.10. To znamená, že prepínač môže vykonať časové prepínanie.



Obr. 1.9 Priestorové prepínanie



Obr. 1.10 Časové prepínanie

Prepínače môžu použiť kombináciu priestorového prepínania a časového prepínania, ako je priestorovo – časové prepínanie a časovo – priestorové prepínanie.

1.5.6 Zisk kódovania - forward error correction (FEC)

V satelitných sieťach, je prenos zo satelitu na Zem zvyčajne obmedzený. Ak by bol zhoršený, môže vzniknúť šírenie strát a zníženie výkonu. Preto je dôležité zaviesť opravy chýb kódovania, tj. pridávať ďalšie informácie tak, aby bolo možné niektoré chyby opraviť v prijímači. Táto technika sa nazýva priama korekcia chyby (Forward Error Corection (FEC)), pretože sa ďalšie informácie a spracovanie uskutočňuje skôr, ako nastane akákoľvek chyba. V závislosti od modulácii systémov, pravdepodobnosť chyby bitového toku (Bit Error Probability (BEP)) je vyjadrená ako funkcia E_b/N_0 ktorá súvisí s výrazom E_c/N_0 :

$$E_b / N_0 = E_c / N_0 - 10 \log \rho \quad (1.1)$$

E_b je energia na bit, bez kódovania, E_c je energia na bit s kódovaním, N_0 je spektrálna hustota čumu (W/Hz) a $\rho = n/(n+r)$ je hodnota kódu (kde r je počet bitov pridanej pre n bitov informácií). Z toho vyplýva, že môžeme používať menej energie na zlepšenie BEP za cenu dodatočných bitov (teda šírky pásma). Hodnota $(10\log\rho)$ sa nazýva zisk kódovania. K dispozícii je tiež kompromis medzi výkonom a šírkou pásma pre danú BEP.

Pomocou $C = E_c R_c$, počítame

$$E_b / N_0 = (C / R_c) / N_0 = (C / N_0) / R_c \quad (1.2)$$

kde C je výkon nosnej a R_c je prenosová rýchlosť kanála.

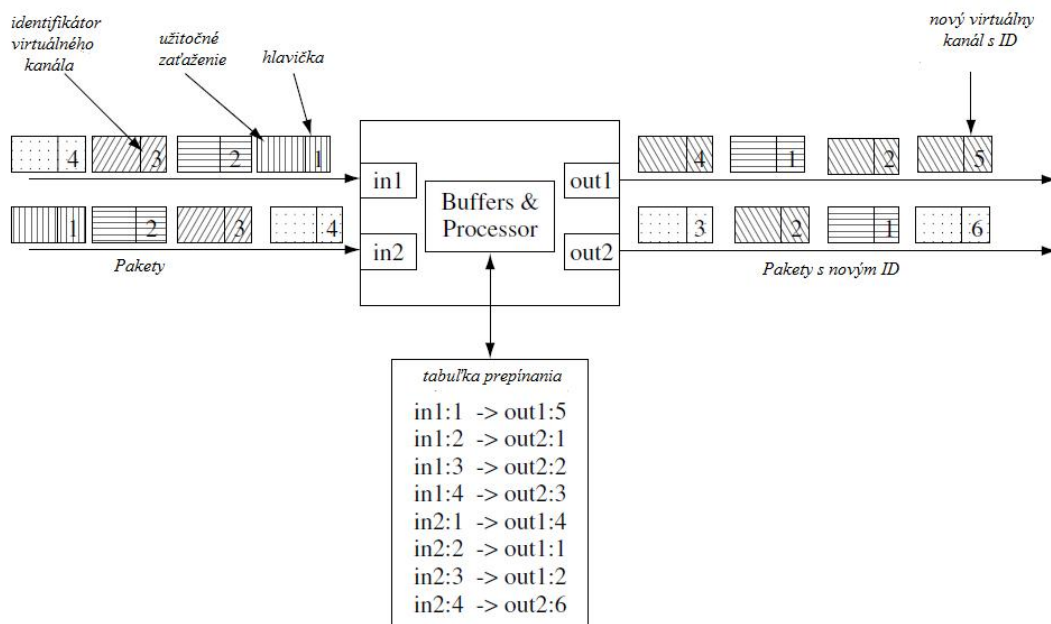
1.6 Sieť s prepojaním paketov

Pojem prepojenie paketov bol vyvinutý pre počítačové siete, pretože tok bitov alebo bajtov nemal veľký význam pre počítače. Počítač potrebuje poznať začiatok prenosu dát a aj koniec prenosu dát. V dátovej sieti, je dôležité, aby bolo možné zistiť, kde začína prenos údajov a kde prenos končí. Údaje, spolu s identifikátormi na začiatku a na konci sa nazývajú rámec. Okrem toho sa pridávajú, adresy, rámce kontroly a ďalšie informácie tak, aby vysielajúci počítač vedel nariadiť prijímajúcemu počítaču, čo má robiť na základe protokolu po prijatí rámca. Výmena spojenia medzi dvoma počítačmi, je definovaná protokolom linkovej vrstvy. Rámec je špeciálny paket na odkazy. Preto rámec súvisí s prepojením na vrstvu funkcie. K rámcu sa vytvorí paket tak, že počítaču môžu byť doplnené aj informácie aby využili na smerovanie paketu zo zdroja na miesto určenia v sieti. Preto paket súvisí s funkciou vrstvy siete. Počítačové siete boli navrhnuté na prenos správ alebo dát. Začiatok a koniec údajov, správnosť prenosu a mechanizmov na zisťovanie a obnovenie chyby sú veľmi dôležité údaje. Ak je komunikačný kanál ideálny, môže byť celá správa prenesená ako celok, ale v reálnom svete je tento predpoklad splniteľný veľmi ťažko. Preto je praktické rozdeliť správy do menších celkov pomocou paketov na prenos. Ak sa vyskytne nejaká chyba v správe, je lepšie riešiť len chybný paket ako celú správu. S paketmi, nebudeme potrebovať deliť šírku pásma zdrojových údajov do úzkeho kanála alebo malých časových úsekov aby sme splnili požiadavky služby. Môžeme použiť kompletnú šírku pásma a prenášať pakety vysokou rýchlosťou. Ak budeme potrebovať väčšiu šírku pásma, môžeme jednoducho použiť viac a väčšie pakety na posielanie dát. Pri použití menšej šírky pásma, použijeme menej a menšie pakety. Pakety zabezpečia flexibilitu pre pridelovanie šírky pásma zdrojom, najmä pokiaľ nemáme poznatky na požiadavku šírky pásma niektorých nových multimediálnych služieb. Význam širokopásmového pripojenia je definovaný ITU-T ako systém prenosu schopný vysporiadať sa s prenosovou rýchlosťou vyššou než základné úrovne, ktoré sú 1,544 Mbit/s pre Severnú Ameriku a 2,048 Mbit/s pre Európu.

Existujú dva prístupy pre site sprepojovaním paketov. Jeden je používaný v tradičnej telefónnej sieti a druhý je používaný v počítačových a dátových sieťach.

1.6.1 Spojovo – orientovaný prístup

V sieti s prepojením paketov, každé fyzické spojenie má omnoho väčšiu šírku pásma, ktorá je schopná podporovať vysokorychlostné dátové prenosy. Ak chceme rozdeliť túto šírku pásma pre viac pripojení použijeme pojem virtuálny kanál. Hlavička paketu nesie identifikačné číslo, ktoré identifikuje rôzne logické spojenia v rámci rovnakého fyzického spojenia. Po prijatí paketu, prepínač paketov môže poslať paket ďalej pomocou iného virtuálneho kanála až kým paket nedosiahne svoje miesto určenia. Pre prepínanie, sieť sa musí nastaviť už pred prenášaním paketu. To znamená, že spínacia tabuľka musí byť nastavená v prepínači pre prepojenie prichádzajúcich virtuálnych kanálov a odchádzajúcich virtuálnych kanálov. Ak sú známe požiadavky na pripojenie, môže sieť rezervovať zdroje pre virtuálne spojenie v termínoch paketov a ich užitečnej zmaže. Tento prístup sa nazýva virtuálny kanál. Podobne ako pri telefónnej sieti, virtuálny kanál, je založený na spojovo orientovanom prístupe, teda spojenie je potrebné vytvoriť ešte pred komunikáciou. Všetky pakety sa riadia podľa rovnakého spojenia od zdroja k cieľu. Spojenie sa nazýva virtuálne spojenie. Pri prepínaní okruhov, sú fyzické cesty nastavené tak, aby bol prechod zabezpečený od vstupných kanálov na výstupné kanály. Vo virtuálnom prepínaní kanálov sú kanály označené logickými číslami, teda zmenou logického číselného identifikátora sa virtuálne prepájajú pakety do iného logického kanála. Virtuálne prepínanie kanálov sa tiež nazýva virtuálne prepínanie okruhov. Obr. 1.11 znázorňuje koncepciu virtuálneho prepínanie kanálov.



Obr. 1.11 Virtuálne prepínanie kanálov

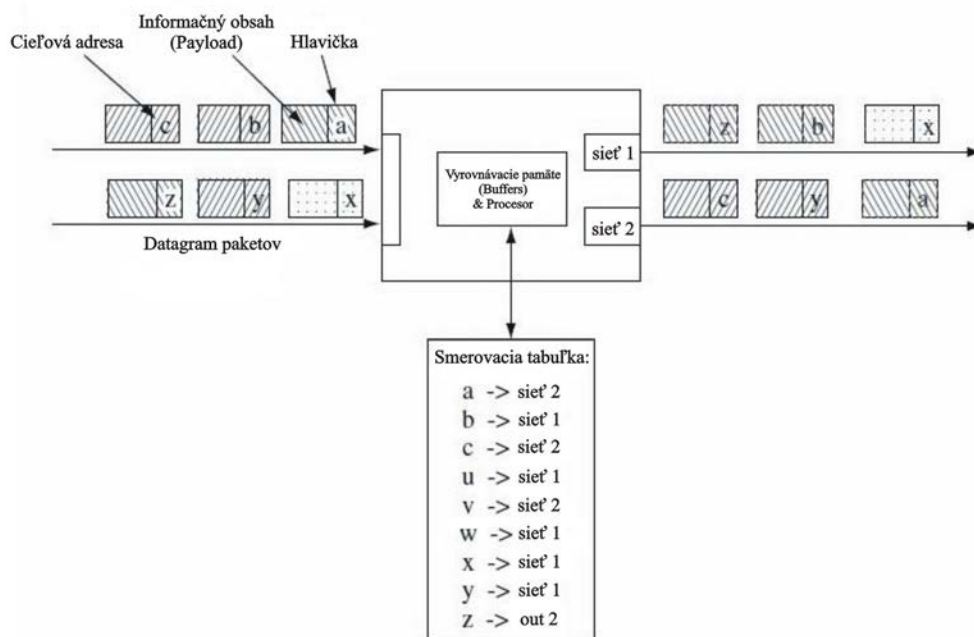
Uzol siete sa nazýva paketový prepínač a funguje ako tradičné prepojenie okruhov, ale dáva flexibilitu pre pridelovanie rôzneho množstva zdrojov virtuálneho spojenia. Preto je to veľmi užitočná koncepcia pre širokopásmové siete a používa sa v Asynchronous Transfer Mode (ATM) sieti. Identifikátory virtuálneho spojenia sú významné len pre každý prepínač a pre identifikáciu logických kanálov. Tento druh siete je veľmi podobný našej telefónnej a železničnej telefónnej sieti. Zdroje môžu byť vyhradené pre zabezpečenie QoS počas fázy nastavenia spojenia. Sieť blokuje žiadosti o pripojenie, ak nie je dostatok prostriedkov na poskytnutie ďalšieho spojenia.

1.6.2 Nespojovo orientovaný prístup

V počítačovej a dátovej sieti prenos informácií často trvá veľmi krátku dobu, v porovnaní s telefónnym spojením. To sa stáva neefektívnym pre prenos každého paketu v počítačových a dátových sieťach.

Prekonať problém s prístupom virtuálneho kanála, je požitie nespojovo orientovaného prístupu pre prenos paketov zo zdrojov do cieľových miest bez prednastavenia spojenia. Takýto paket sa nazýva datagramový prístup, pretože sa skladá zo zdrojovej a cieľovej adresy skôr ako keby identifikátory spojenia povoľovali sieťovým uzlom (tiež nazývane smerovače), aby smerovali pakety od zdroja k miestu určenia. Obrázok 1.12 znázorňuje koncepciu nespojovo-orientovaného prístupu.

V nespojovo-orientovanej sieti, hlavička paketu nesie cieľovú adresu, ktorú využije sieť na smerovanie paketu od zdroja k miestu určenia, a tiež zdrojovú adresu pre odpoveď od cieľového počítača. Prepínač sieťových paketov sa nazýva smerovač, aby sa odlišil od spojovo orientovaného prepínača, alebo od tradičného kanálového prepínača.



Obr.1.12 Datagram smerovacej koncepcie

Smerovač (router) má smerovaciu tabuľku obsahujúcu informácie o mieste určenia a nasledujúcom uzle, vedúcom k cieľu s minimálnymi nákladmi.

Nespojovo orientovaný prístup má schopnosť poslať jednotlivé pakety po rôznych cestách v prípadoch preťaženia alebo výpadku na trase vedúcej k cieľu. Tento druh siete je celkom podobný poštovému doručovaniu a diaľničným sieťam vo Veľkej Británii. Nie je tu žiadna možnosť vytvoriť rezerváciu, teda nie je tu žiadna záruka QoS. Keď sú dopravné podmienky dobré, jedna cesta autom môže poskytnúť dobrý odhad cestovného času. Na druhej strane, môže zabráť oveľa viac času na dosiahnutie cieľa a niekedy to môže trvať príliš dlho, aby to bolo užitočné. Avšak, je tam možnosť zmeniť jeho trasu po štarte cesty, aby sa vyhlo všetkým zápcham alebo uzáverám na trase. Internet je príkladom tohto druhu siete, teda informačná diaľnica je vhodné pomenovanie pre informačnú infraštruktúru, ktorá je dnes široko používaná.

1.6.3 Vzťah medzi prepájaním okruhov a prepájaním paketov

Prepájanie okruhov sa viac približuje k prenosovým technológiám než prepájanie paketov. Poskytuje fyzický prenos signálov nesúcich informácie v sieťach. Signály môžu byť analógové a digitálne. Pre analógové signály poskytuje šírku pásma zdrojov z hľadiska Hz, kHz, MHz spracovaných vo frekvenčnej oblasti ako FDM ; a pre digitálne signály poskytuje šírku pásma zdrojov z hľadiska bit/s, kbit/s alebo Mbit/s spracovaných v časovej oblasti ako TDM. Je tiež možné vziať do úvahy časové a frekvenčné oblasti ako CDMA. Na tejto úrovni sa prepínače

zaoberajú tokmi bitov a bajtov digitálnych signálov pohybujúcich sa v okruhoch alebo analógovými signálmi s definovanou šírkou pásma. V signáli nie je žiadna štruktúra.

Pakety poskytujú úroveň abstrakcie na bitovej alebo bajtovej úrovni tým, že poskytujú štruktúry k bitovým tokom. Každý balíček pozostáva z hlavičky a payloadu. Hlavička nesie informácie, ktoré sú používané sieťou na spravovacie, signalizačné, prepínacie a kontrolné účely. Payload nesie informácie, ktoré sú prijaté a spracované užívateľskými terminálmi.

Na okruhu je možné prenášať pakety. S paketmi je možné napodobniť (emulovať) okruh spojitým tokom paketov. Toto umožňuje internetové fungovanie medzi okruhovými sieťami a paketovými sieťami. Napodobňovaný okruh sa nazýva virtuálny okruh. Môžeme vidieť, že virtuálny okruh, rámec a paket sú rôzne úrovne abstrakcie od fyzických prenosov k funkciám sieťovej vrstvy.

1.6.4 Vplyvy paketov na návrh siete

Paket je vrstva funkcií uvedených do sietí. Oddeluje používateľské služby a aplikácie od prenosových technológií. Paket poskytuje flexibilitu pre prenos hlasu, videa a dát bez účasti prenosových technológií a média. Sieť sa zaoberá paketmi, skôr než rôznymi službami a aplikáciami. Pakety môžu byť prenášané každou sieťovou technológiou vrátane satelitu.

Zavedenie paketov do siete prináša obrovské výhody pre rozvoj nových služieb a aplikácií a pre objavovanie nových sieťových technológií, a tiež prináša veľkú výzvu pre vývojárov siete.

Aký veľký by mal byť paket? Mal by existovať kompromis medzi požiadavkami z aplikácií a služieb a možnosťami prenosových technológií. Ak je príliš malý, nemusí byť schopný splniť požiadavky, ale keď je príliš veľký, nemusí byť plne využitý a môže tiež spôsobiť problémy pri prenose. Veľké pakety majú väčšiu pravdepodobnosť získania bitových chýb ako tie malé, ako prenosové kanály nie sú nikdy dokonalé v bežnom živote. Veľkým paketom zaberá dlhý čas prenášanie a spracovávanie a taktiež potrebujú veľa pamäťového miesta vo vyrovnávací pamäti (buffer). Služby v reálnom čase nemusia byť schopné tolerovať dlhé oneskorenia, teda sa uprednostňujú malé pakety.

1.6.5 Paketová hlavička a payload

Koľko bitov by sa malo použiť pre paketovú hlavičku a koľko pre payload? S veľkou hlavičkou je možné niesť väčšie kontrolné a signálne informácie. Taktiež umožňuje použiť viac bitov pre adresy pre koncové systémy, ale môže byť veľmi neefektívna, ak služby potrebujú iba veľmi malý payload. Existujú aj špeciálne prípady pre veľké hlavičky, napr., veľké hlavičky môžu byť potrebné pre bezpečný prenos transakcií kreditnou kartou.

1.6.6 Zložitosť a rôznorodosť sietí

Zložitosť je daň za veľký rozsah služieb, aplikácií a rôznych prenosových technológií. Veľa rôznych sietí bolo vyvinutých na podporu širokého rozsahu služieb a aplikácií a na lepšie využitie šírky pásma zdrojov na základe technológií prepájania paketov. Systémy nemusia spolu fungovať, ak sú vyvinuté s rôznymi špecifikáciami paketov. Preto tieto otázky je potrebné riešiť v oveľa širšej komunite, aby systémy spolupracovali na celom svete. To je často dosahované vyvíjaním všeobecných spoločných medzinárodných štandardov.

1.6.7 Vykonávanie paketových prenosov

Na bitovej alebo bajtovej úrovni sú prenosové chyby prekonávané zvýšením prenosovej energie alebo šírkou pásma použitím lepšieho kanálového kódovania a modulačných techník. V reálnych systémoch nie je možné úplne eliminovať bitové chyby. Chyby na bitovej úrovni sa budú šíriť do paketovej úrovne. Mechanizmy opakovaného prenosu sú používané na obnovenie chybných/stratených paketov, teda kontrolujú chyby na paketovej úrovni. Z tohto dôvodu, sa paketové prenosy môžu stať spoľahlivými dokonca aj keď bitové prenosy sú nespoľahlivé. Avšak, táto schopnosť obnovenia chybných paketov stojí ďalší prenosový čas a priestor vyrovnávacej pamäte. Tiež sa spolieha na efektívne schémy detekcie chýb a potvrdenie paketov na overenie úspešného prenosu. Pre retransmisnú schému, účinnosť využitia kanála sa môže vypočítať ako:

$$\eta = t_i / (t_i + 2t_p + t_r) \quad (1.3)$$

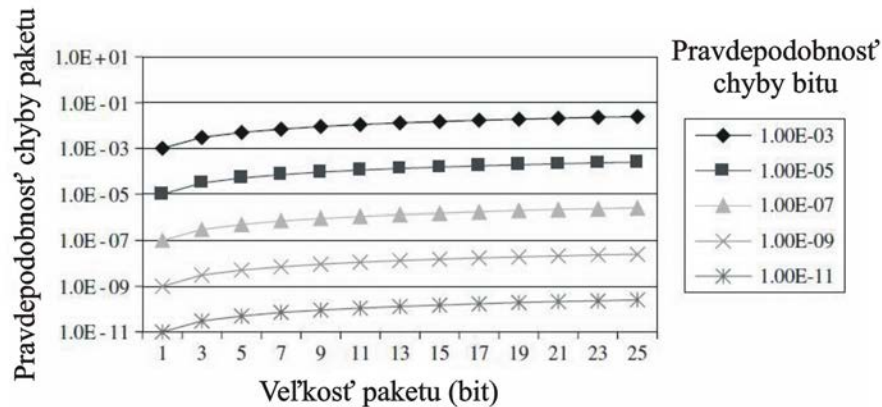
kde t_i je čas pre prenos paketu do kanálov, t_p je čas šírenia paketu cez kanál do prijímača a t_r je spracovávací čas potvrdenia paketu prijímačom. Môžeme vidieť, že veľké paketové prenosové časy alebo malé časy šírenia a paketové spravovacie časy sú dobré pre vykonávanie paketového prenosu.

1.6.8 Vplyv chýb na bitovej úrovni na paketovú úroveň

Môžeme si rýchlo uvedomiť, že veľký paket môže tiež viesť k vysokej pravdepodobnosti paketovej chyby. Ak P_b je pravdepodobnosť bitovej chyby, pravdepodobnosť paketovej chyby P_p z n - bitov môže byť vypočítaná ako:

$$P_p = 1 - (1 - P_b)^n \quad (1.4)$$

Obr. 1.13 ukazuje pravdepodobnosti paketových chýb dané pravdepodobnosťami bitových chýb a veľkosťami paketov.



Obr.1.13 Pravdepodobnosť paketovej chyby pre dané pravdepodobnosti bitových chýb a veľkosti paketu

1.7 OSI/ISO referenčný model

Protokoly sú dôležité na komunikáciu medzi entitami. Je tu veľa dostupných možností na nastavenie protokolov. Pre globálnu komunikáciu je dôležité, aby boli protokoly medzinárodne akceptovateľné. Je zrejmé, že Medzinárodná organizácia pre normalizáciu ISO (International Standards Organisation) zohrala veľmi dôležitú úlohu pri stanovení a štandardizácii referenčného modelu tak, aby všetky implementácie v nadväznosti na referenčný model boli schopné vzájomného prepojenia a vzájomnej komunikácie.

Ako každý medzinárodný protokol, je ľahké dohodnúť sa v zásade ako definovať referenčný model, ale vždy je ťažké sa zosúladiť v detailoch ako, koľko vrstiev by mal model mať, koľko bajtov by mal mať paket, koľko hlavičiek by mal paket mať, aby pojal viac funkcií, ale aby boli minimalizované náklady, či poskytovať službu podľa stavu aktuálneho siete (best effort) alebo garantované služby, či už poskytovať spojovo orientované služby alebo nespojovo orientované služby atď.. Sú tu nekonečné možné varianty a dohody, kompromisy s veľa technologickými výbermi a politickými úvahami.

1.7.1 Protokolová terminológia

Protokol tvoria pravidlá a konvencie používané v konverzácii na základe dohody medzi komunikujúcimi stranami. Referenčný model poskytuje všetky úlohy tak, že všetky strany budú schopné navzájom spolu medzi sebou komunikovať, ak sa budú dodržiavať úlohy definované v referenčnom modeli pri ich implementácii.

Na zníženie konštrukčnej zložitosti, všetky funkcie systémov a protokolov sú rozdelené do vrstiev a každá vrstva je navrhnutá na poskytnutie istých zaručených služieb do vyššej vrstvy, ochraňujúc tieto vrstvy od detailov, ako sú služby aktuálne implementované.

Každá vrstva má prepojenie s jednoduchými operáciami, ktoré možno použiť pre prístup k ponúkaním službám. Architektúra sieťového protokolu je séria vrstiev a protokolov.

Protokolový zásobník je zoznam protokolov (jeden protokol na jednu vrstvu). Jednotka (entita) je aktívny prvok v každej vrstve, taká ako používateľské terminály, prepínače a smerovače. Partnerské entity sú entity v rovnakej vrstve, schopné komunikácie s rovnakými protokolmi.

Základné protokolové funkcie zahŕňajú segmentáciu a zmontovanie, zapuzdrenie, kontrolu spojenia, nariadené doručovanie, sledovanie prenosu, kontrolu chýb a smerovanie a multiplexovanie.

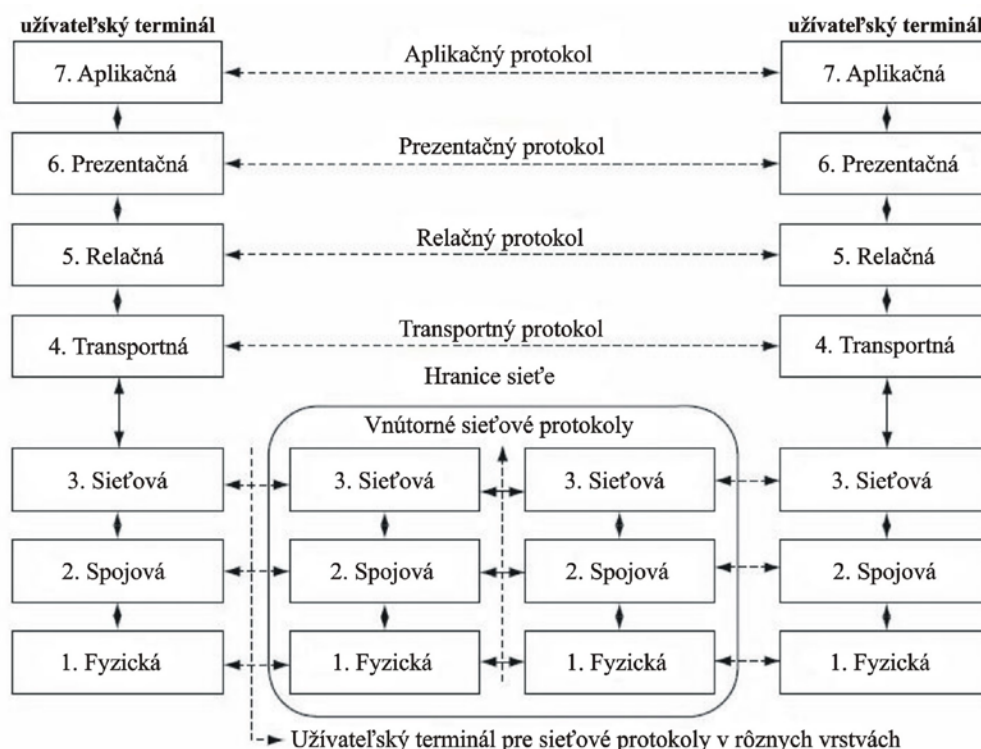
Protokoly sú potrebné na umožnenie komunikujúcim stranám aby rozumeli jedna druhej navzájom a dali zmysel prijatým informáciám. Medzinárodné štandardy sú dôležité na dosiahnutie globálnej akceptácie. Protokoly opísané v štandardoch sú často v kontexte s referenčnými modelmi, pretože už bolo vyvinutých veľa rôznych štandardov.

1.7.2 Princíp vrstvenia

Princíp vrstvenia je dôležitý pojem pre sieťové protokoly a referenčné modely. V roku 1980, ISO odvodila sedemvrstvový referenčný model znázornený na obr.1.14 , nazvaný OSI (Open Systems Interconnection) referenčný model, ktorý je založený na jasných a jednoduchých princípoch.

Jedná sa o prvý kompletný referenčný model vyvinutý ako medzinárodný štandard. Princípy, ktoré boli zavedené na dosiahnutie siedmich vrstiev môžu byť zhrnuté ako:

- Vrstva definuje úroveň abstrakcie, ktorá by mala byť odlišná od akejkoľvek inej vrstvy.
- Každá vrstva vykonáva presne stanovené funkcie.
- Funkcia každej vrstvy by mala viesť k medzinárodne štandardizovaným protokolom.
- Hranica vrstvy by mala byť zvolená tak, aby sa minimalizoval informačný prietok cez rozhranie.
- Počet vrstiev by mal byť dostatočne veľký, ale nie príliš obrovský.



Obr.1.14 OSI/ISO sedemvrstvový referenčný model

1.7.3 Funkcie siedmich vrstiev

Nižšie sú uvedené stručné popisy funkcií každej vrstvy.

- *Vrstva 1 – fyzická vrstva (bitový tok)* špecifikuje mechanické, elektrické a metodické rozhrania a fyzické prenosové médium. V satelitných sieťach, rádiových linkách sú fyzické prenosové média; modulácia a kanálové kódovanie umožňuje bitový tok preniesť v určených signáloch a pridelených frekvenčných pásmach.
- *Vrstva 2 – spojová (dátová) vrstva* – poskytuje spoj, ktorý sa javí bez nezistených prenosových chýb do sieťovej vrstvy. Vysielacie média majú ďalšie problémy v spojovej (dátovej) vrstve, t.j. ako kontrolovať prístup k zdieľanému médiu. Špeciálna podvrstva nazvaná MAC (Medium Access Control) systémov, ako sú Aloha, FDMA, TDMA, CDMA, DAMA sa zaoberá týmto problémom.
- *Vrstva 3 – sieťová vrstva* – smeruje pakety od zdroja k cieľu. Funkcie zahŕňajú sieťové adresovanie, kontrolu preťaženia, účtovanie, rozobratie a zmontovanie, vyrovnávanie sa s rôznorodými sieťovými protokolmi a technológiami. Vo vysielacích sieťach, smerovací problém je jednoduchý: smerovací protokol je často tenký, alebo dokonca neexistuje.
- *Vrstva 4 – transportná vrstva* – poskytuje spoľahlivú službu doručovania dát pre užívateľov vyššej vrstvy. Je to najvyššia vrstva služieb spojených s poskytovateľom

komunikačných služieb. Najvyššie vrstvy sú služby používateľských dát. Má funkcie nariadeného doručovania, kontroly chýb, riadenia toku a kontrola preťaženia.

- *Vrstva 5 – relačná vrstva* – poskytuje prostriedky pre spolupracujúce prezentačné entity na organizovanie a synchronizovanie ich dialógu a na riadenie výmeny dát.
- *Vrstva 6 – prezentačná vrstva* – týka sa transformácie dát, formátovania dát a dátovej skladby.
- *Vrstva 7 – aplikačná vrstva* – je najvyššia vrstva ISO architektúry. Poskytuje služby pre aplikačné procesy.

1.7.4 Zoslabovanie významu OSI/ISO referenčného modelu

Dnes môžeme vidieť vývoj mnohých druhov nových aplikácií, služieb, sietí a prenosových médií. Nikto neočakával taký rýchly rozvoj Internetu a nových služieb a aplikácií. Nové technológie a nové vývojové trendy služieb a aplikácií zmenili podmienky optimalizačných bodov funkcií vrstiev ako jeden z dôvodov vedúcich k zoslabeniu medzinárodných štandardov.

Existuje aj mnoho ďalších dôvodov, vrátane technických, politických a ekonomických dôvodov, alebo príliš komplikovaných, aby boli použité v praktickom svete. Referenčný model nie je veľmi používaný v dnešných sieťach. Avšak, princípy vrstvomého protokolu sú stále široko využívané v sieťovom protokolovom návrhu a implementácii. Je to klasický a pravý referenčný model, ktorý sa vždy všetky moderné protokoly snažia používať ako referenčný na prerokovanie a popísanie ich protokolov a hodnotia ich na základe vykonanej analýzy, simulácie a experimentu.

1.8 ATM protokolový referenčný model

Asynchrónny prenosový model ATM je založený na technikách rýchleho prepínania paketov pre integráciu telekomunikačných a počítačových sietí. V minulosti, telefónne siete a dátové siete boli vyvinuté nezávisle. Vývoj integrovaných služieb digitálnych sietí ISDN, štandardov ITU-T bol prvým pokusom o integrovanie telefónnych a dátových sietí.

1.8.1 Úzkopásmové ISDN (N-ISDN)

N-ISDN poskytuje dva 64 kbit/s digitálne kanály, ktoré nahrádzajú analógové telefónne služby plus 16 kbit/s dátový kanál pre signalizačné a dátové služby z domovov k miestnym ústrediam. ISDN nadväzuje na koncept okruhových sietí veľmi úzko, uvažuje o hlavných službách, telefónii a vysokorýchlostnom prenose dát, nepotrebuje viac ako 64 kbit/s. Základné hodnoty multiplexov prvého rádu sú 1,5 Mbit/s pre Severnú Ameriku a 2 Mbit/s pre Európu.

1.8.2 Širokopásmové ISDN (B-ISDN)

ATM je ďalšie úsilie od ITU-T na vyvinutie širokopásmových integrovaných služieb digitálnej siete (B-ISDN) v nadväznosti na vývoj ISDN, ktorý je nazvaný úzkopásmový ISDN (N-ISDN) na odlíšenie od B-ISDN.

Ako náhle štandardizácia N-ISDN bola kompletná, zistilo sa, že N-ISDN založené na okruhovými sieťach nemôže vyhovieť narastajúcim požiadavkám nových služieb a aplikácií a dátových sietí.

Štandardizačný proces B-ISDN viedol k vývoju ATM založenom na koncepcii prepájania paketov. To poskytuje flexibilitu pridelovania šírky pásma používateľským službám a aplikáciám od desiatok kbit/s pre telefónne služby k stovkám Mbit/s pre vysokorychlostné dáta a televíziu s vysokým rozlíšením.

ITU-T odporučilo, že ATM je cieľovým riešením pre širokopásmové ISDN. Je to prvýkrát v histórii, že štandard bol vytvorený pred vývojom.

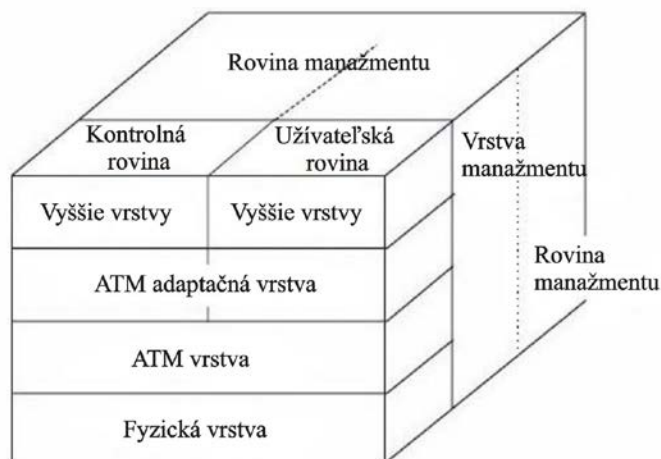
1.8.3 ATM technológia

Základná technológia ATM je veľmi jednoduchá. Je založená na pevnej veľkosti paketu 53 bajtov, z ktorých 5 bajtov sú pre hlavičku a 48 pre payload. ATM paket sa nazýva bunka vzhľadom na malú a fixnú veľkosť. Je založený na metóde virtuálneho kanálového prepínania poskytujúcej spojovo-orientovaný servis a umožňuje dojednanie šírky pásma zdrojov a QoS pre rôzne aplikácie. Taktiež poskytuje kontrolné a riadiace funkcie na riadenie systémov, dopravy a služieb pre generovanie príjmov zo sieťových operácií.

1.8.4 Referenčný model

Referenčný model zahŕňa tri roviny: používateľ, kontrola a riadenie. Všetky transportné aspekty sú vo forme ATM, ako je znázornené na obrázku 1.15 zahrnuté:

- Fyzická vrstva poskytuje fyzické média-súvisiace prenosy ako sú optické, elektrické a mikrovlnne;
- ATM vrstva definuje ATM bunky s súvisiace ATM funkcie; a
- ATM adaptačná vrstva prispôsobuje protokoly vyšších vrstiev, vrátane služieb a aplikácií a rozdeľuje dáta do malých segmentov tak, že môžu byť vhodné pre transport do ATM buniek.



Obr.1.15 B-ISDN ATM referenčný model

1.8.5 Problémy: nedostatok dostupných služieb a aplikácií

ATM bola ovplyvnená vývojom optických vlákien, ktoré poskytujú veľmi veľkú šírku pásma a veľmi málo prenosových chýb. Avšak, také prenosové podmienky sú takmer nemožné v satelitných prenosových systémoch.

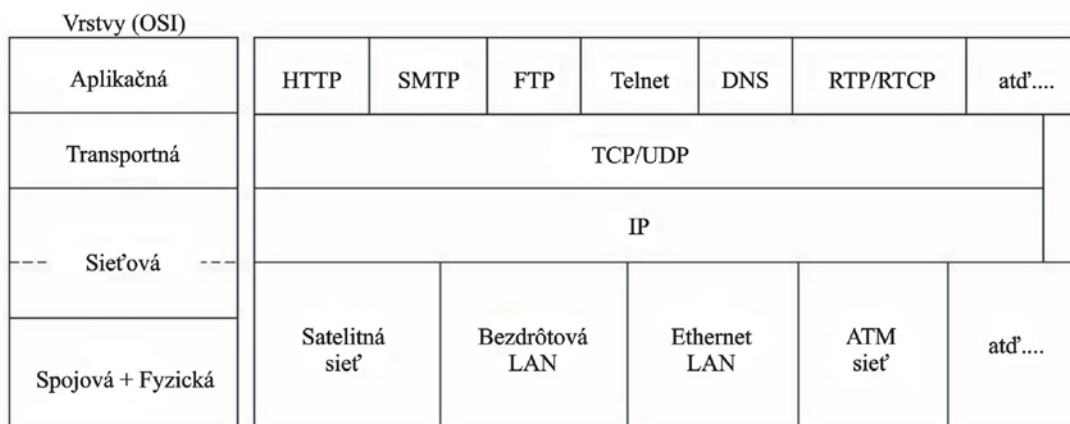
Služby a aplikácie sú považované za súčasť funkcií v používateľských termináloch, skôr než ako súčasť siete. Siete sú navrhnuté tak, aby boli schopné plniť všetky požiadavky služieb a aplikácií. Avšak, vyššie vrstvy neboli nikdy definované a tak málo služieb a aplikácií bolo vyvinutých na ATM sieti. ATM sa snažila o vzájomné prepojenie so všetkými rôznymi druhmi sietí vrátane niektorých starších sietí spolu s riadiacimi a kontrolnými funkciami, ATM sa tak stáva veľmi komplikovanou a drahou na implementáciu.

1.9 Referenčný model internetových protokolov

Pôvodne, internetové protokoly neboli vyvinuté žiadnou medzinárodnou štandardizačnou organizáciou. Boli vyvinuté ministerstvom obrany DoD (Department of Defense), výskumný projekt na spojenie množstva rôznych sietí navrhnutých rôznymi predajcami do siete sietí – Internet. Bolo to už od začiatku úspešné, pretože to prinieslo niekoľko základných služieb, ktoré každý potreboval (prenos súborov, elektronická pošta, telnet pre vzdialené prihlásenie) cez veľmi veľký počet rôznych systémov.

Hlavná časť referenčného modelu internetového protokolu je sada TCP (Transmission Control Protocol) a internetový protokol IP (Internet protocol) známy ako TCP/IP protokol. Niekoľko počítačov v malom oddelení môže použiť TCP/IP (spolu s ostatnými protokolmi) na jednej LAN, alebo niekoľko prepojených sietí LAN. Internetové protokoly dovoľujú výstavbu veľmi veľkých sietí s menším centrálnym riadením.

Ako všetky ostatné komunikačné protokoly, TCP/IP je zložený z rôznych vrstiev, ale je oveľa jednoduchší ako ATM. Obrázok 1.16 znázorňuje internetový referenčný model.



Obr.1.16 Internetový referenčný model

1.9.1 Sieťová vrstva: IP protokol

Sieťová vrstva je internetový protokol IP založený na datagramovom prístupe, preukazujúca iba najvýkonnejšiu službu bez akejkoľvek záruky kvality služby. IP je zodpovedná za pohyb paketov od uzla k uzlu. IP posieľa vpred každý paket na základe štvor -bajtovej cieľovej adresy (IP adresy). Internetové orgány priradujú rozsah čísel rôznym organizáciám. Organizácie priradujú skupinám ich čísla na oddelenia.

1.9.2 Sieťové technológie

Sieťové technológie, vrátane satelitných sietí, sietí LAN, ATM, atď., nie sú súčasťou protokolov. Oni prenášajú IP pakety z jedného konca siete na druhý koniec. Zdrojový host posieľa IP pakety a cieľový host prijíma pakety. Sieťové uzly smerujú IP pakety k ďalším smerovačom alebo bránam, kým môžu smerovať pakety priamo k cieľovým hostom.

1.9.3 Transportná vrstva: TCP a UDP

Prenosový kontrolný protokol TCP a užívateľský datagramový protokol UDP sú protokoly transportnej vrstvy internetového protokolového referenčného modelu. Poskytujú porty alebo zásuvky pre služby a aplikácie v používateľských termináloch na odosielanie a príjem dát cez internet.

TCP je zodpovedné za overovanie správneho doručenia dát medzi klientom a serverom. Dáta môžu byť stratené pri prenose cez sieť. TCP pridáva podporu na detekciu chýb alebo stratených dát a spúšťa opakovaný prenos pokiaľ nie sú dáta správne a kompletne prijaté. Preto TCP poskytuje spoľahlivé služby, hoci sieť naspodku môže byť nespoľahlivá, t.j., prevádzkovanie internetových protokolov nevyžaduje spoľahlivý prenos paketov, ale spoľahlivý prenos môže znížiť počet opakovaných prenosov a tým zvýšiť výkon.

UDP poskytuje najvýkonnejšiu službu bez snahy obnovenia každej chyby alebo straty. Preto je to tiež protokol poskytujúci nespoľahlivý prenos užívateľských dát. Avšak, toto je veľmi užitočné pre aplikácie v reálnom čase, pretože opakované prenosy paketov môžu spôsobiť viac problémov ako stratené pakety.

1.9.4 Aplikačná vrstva

Protokoly aplikačnej vrstvy sú navrhnuté ako funkcie používateľských terminálov alebo servera. Klasické internetové protokoly aplikačnej vrstvy zahŕňajú HTTP pre WWW, FTP pre prenos súborov, SMTP pre email, telnet pre vzdialené prihlásenie, DNS pre službu doménových mien a ďalšie, vrátane protokolu v reálnom čase RTP kontrolného protokolu v reálnom čase RTCP pre služby v reálnom čase a ďalšie pre dynamické a aktívne webové služby. Všetky tieto by mali byť nezávislé od sietí.

1.9.5 Problémy: žiadne QoS a žiadna kontrola zdrojov

Väčšinu funkcií internetu určujú vysoko vrstvomé protokoly. Aktuálny internetový protokol verzie 4 (IPv4) poskytuje iba najvýkonnejšie služby, teda nepodporuje žiadne kontrolné funkcie a nemôže poskytnúť žiadnu kvalitu služieb QoS (Quality of Services). Problémy sú riešené v nasledujúcej generácii internetového protokolu verzie 6 (IPv6).

1.10 Satelitná sieť

Existujú dva typy prenosových technológií: vysielanie a bod-bod prenosy. Satelitné siete podporujú obidva spôsoby prenosu – vysielanie aj bod-bod spojenia. Satelitné siete sú užitočné hlavne tam, kde vlastnosti vysielania a širokého pokrytia sú veľmi dôležité. Satelitné pokrytie hrá dôležitú úlohu v poskytovaní globálneho pokrytia. Existujú tri typy úloh, ktoré satelity môžu hrať v komunikačných sieťach: prístupová sieť, tranzitná (prenosová) sieť a vysielacia sieť.

1.10.1 Prístupová sieť

Prístupová sieť poskytuje prístup pre užívateľské terminály alebo súkromné siete. V historických telefónnych sieťach poskytovali pripojenie z telefónnych alebo súkromných pobočkových ústrední (PBX) do telefónnych sietí. Užívateľské terminály sa spájali so satelitným terminálom na zemi a takýmto spôsobom pristupovali priamo do prístupovej satelitnej linky. V dnešnej dobe, navyše ku klasickej telefónej prístupovej sieti, prístupové siete môžu byť ISDN prístup, B-ISDN prístup alebo prístup do Internetu.

1.10.2 Tranzitná (prenosová) sieť

Tranzitná sieť poskytuje spojenie medzi sieťami alebo sieťovými prepínačmi. Zvyčajne má obrovskú kapacitu pre poskytovanie veľkého počtu spojení pre sieťový prenos. Používatelia do nej nemajú priamy prístup a z toho dôvodu sú často neviditeľné bežným používateľom aj keď používatelia môžu spozorovať rozdiely v oneskorení šírenia alebo kvality spojenia cez satelitnú sieť. Príklad tranzitnej satelitnej siete zahŕňa prepojenie medzinárodnej telefónnej siete, ISDN, B-SDN a chrbticovej siete Internetu. Rozdelenie šírky pásma je často dopredu naplánované použitím metódy viacnásobného prístupu s pevným pridelením (fixed assignment multiple access (FAMA)).

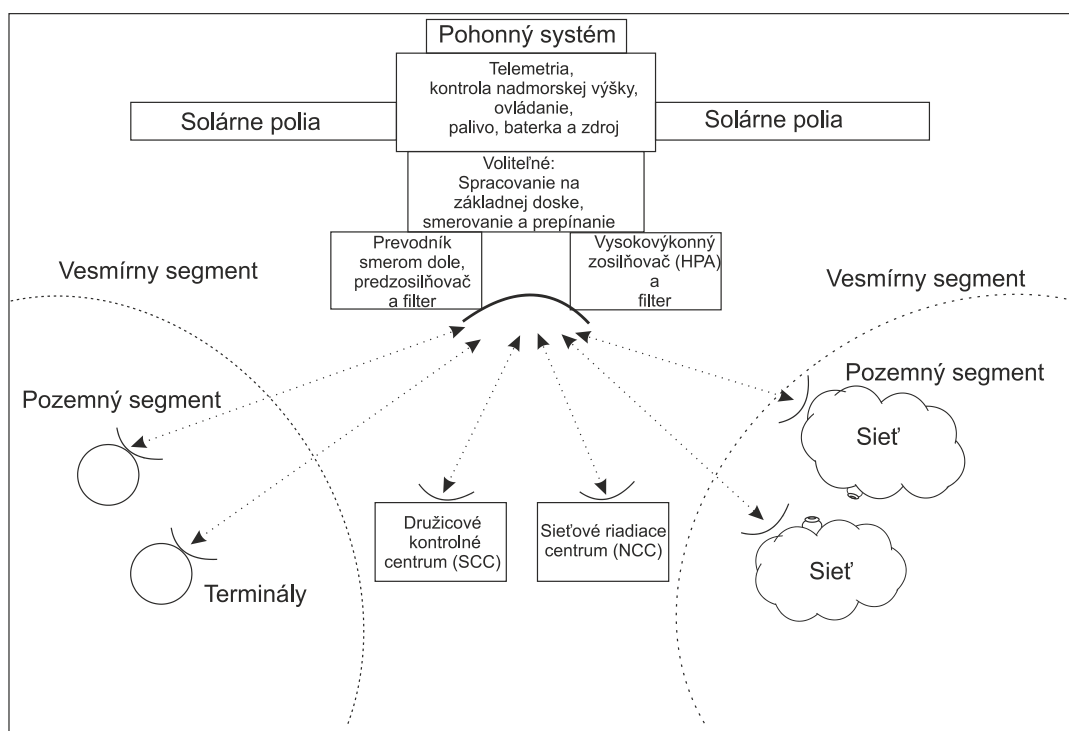
1.10.3 Vysielacia (Broadcast) sieť

Satelit podporuje obe služby – telekomunikačné aj vysielacie. Satelit môže poskytnúť veľmi dobré a efektívne vysielacie služby, ktoré môžu zahŕňať vysielanie digitálneho zvuku a videa (DVB-S) a DVB so spätnými kanálmi cez satelit (DVB-RCS).

1.10.4 Vesmírny segment

Hlavné komponenty komunikačného satelitného systému pozostávajú z vesmírneho segmentu: satelitu a pozemného segmentu: pozemných staníc. Dizajn satelitných sietí je závislý od prevádzkových požiadaviek, obežnej dráhy, pokrytia a rozsahu frekvenčného pásma. (obr.1.17). Satelit je jadro satelitných sietí, pozostávajúci z komunikačného subsystému a platformy. Platforma poskytuje štruktúralnú podporu a zdroj energie pre komunikačné podsystémy a taktiež poskytuje kontrolu nadmorskej výšky, kontrolu obežnej dráhy, kontrolu teploty, sledovanie, telemetriu a diaľkové ovládanie (TT&T – telemetry and telecommand) a takýmto spôsobom zabezpečuje normálny chod satelitného systému.

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY



Obr. 1.17 Ilustrácia vesmírneho a pozemného segmentu

Telekomunikačné subsystémy pozostávajú z transpondérov (transpondérov-TRANSMission resPONDER=TRANSPONDER) a antény. Antény spojené s transpondérom sú navrhnuté tak, aby boli schopné pokryť satelitnú sieť. Moderné satelity môžu obsahovať jednotku spracovania (onboard processing – OBP) a prepínania (onboard switching – OBS). Existujú rôzne typy transpondérov:

- Transparentné transpondéry poskytujú funkciu prepájania rádiových signálov. Prijímajú prenosy od pozemných staníc a preposielajú ich naspäť na pozemnú stanicu po zosilnení a frekvenčnom preklade. Satelity s transparentným transpónderom sú nazývané transparentné satelity.
- OBP transpóder poskytuje prídavné funkcie ako napríklad spracovanie digitálneho signálu (DSP – digital signal processing), regeneráciu a spracovanie signálu v základnom pásme predtým než odošlú signál zo satelitu na pozemnú stanicu. Satelity s OBP transpódermi sú nazývané OBP satelity.
- OBS transpóder má oproti OBP transpóderom ďalšiu prídavnú funkciu, poskytuje prepínacie funkcie. Satelity s OBS transpóderom sa nazývajú OBS satelity. S nárastom vývoja Internetu, narastá aj satelitov so zabudovanými smerovačmi.

Okrem toho, riadiace centrum satelitu (satellite control centre – SCC) a riadiace sieťové centrum (network control center – NCC) alebo sieťové centrum vedenia (management centre – NMC) sú časti vesmírneho segmentu, hoci sa fyzicky nachádzajú na zemi:

- Satelitné kontrolné centrum (satellite control centre – SCC) je na zemi umiestnený systém zodpovedný za prevádzku satelitu. Monitoruje stav rôznych satelitných subsystémov pomocou telemetrického spojenia, kontroluje satelit na jej nominálnej obežnej dráhe prostredníctvom spojenia riadenia na diaľku. Na túto komunikáciu so satelitom využíva vyhradenú linku, ktorá sa líši od komunikačnej linky. Zvyčajne pozostáva z jednej pozemnej stanici a GEO alebo non-GEO systémov, prijímajúcich telemetriu od satelitov a naopak vysielajúcich príkazov na diaľku. Niekedy sa zvykne vybudovať záložné centrum v inej lokalite, čím sa zvýši spoľahlivosť a dostupnosť.
- Sieťové riadiace centrum (network control centre – NCC) alebo sieťové centrum vedenia (network management centre – NMC): Toto centrum má odlišné funkcie od SCC. Jeho hlavnými funkciami sú riadenie sieťovej premávky a pridelovanie zdrojov na satelite takým spôsobom, aby sa čo najefektívnejšie využívala satelitná sieť na komunikáciu.

1.10.5 Pozemský segment

Pozemná stanica je časťou satelitnej siete. Poskytuje funkcie prenášania signálov z a do satelitov. Taktiež poskytuje rozhrania do terestriálnych sietí alebo priamo k používateľovi. Pozemné stanice môžu pozostávať z nasledujúcich častí:

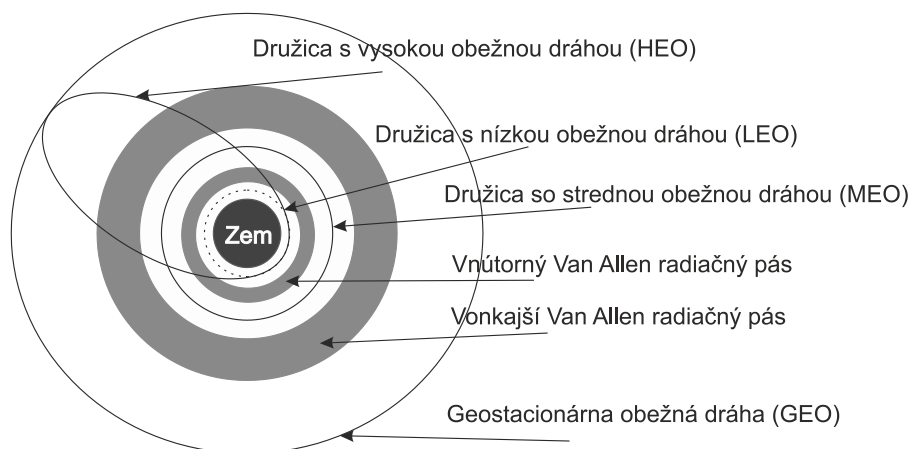
- Vysielacie a prijímacie antény sú najviac viditeľné časti pozemnej stanice. Sú rôznej veľkosti, typicko rádovo od 0.5 metra do 16 metroch a viac.
- Nízkošumový zosilňovač prijímacieho systému s meraním šumovej teploty od približne 30K až niekoľko sto K.
- Vysoko výkonný zosilňovač (HPA – high performance amplifier) vysielača s výkonom od niekoľkých wattov až po niekoľko tisíc kilowattov závisiacich od kapacity.
- Modulácia, demodulácia a frekvenčný preklad.
- Spracovanie signálu.
- Rozhrania do terestriálnych sietí alebo ku koncovým terminálom.

1.10.6 Satelitná obežná dráha

Obežné dráhy sú jedny z najdôležitejších vecí pre satelity vo vesmíre, keďže satelity sa musia nachádzať na správnej obežnej dráhe aby poskytovali pokrytie daným obsluhovaným oblastiam. Je niekoľko spôsobov triedenia obežných dráh (obr. 1.18). Na základe nadmorskej výšky môžeme satelity deliť nasledovne:

- Satelit s nízkou obežnou dráhou (LEO – low earth orbit) sa nachádza v nadmorskej výške v rozsahu menšom ako 5000 km. Satelity tohoto typu sú nazývané LEO satelity. Doba obehu LEO satelitu trvá približne 2-4 hodiny.
- Satelit so strednou obežnou dráhou (MEO-media earth orbit) sa nachádza v nadmorskej výške v rozsahu medzi 5000 až 20 000 km. Satelity tohoto typu sú nazývané MEO satelity. Doba obehu MEO satelitov je 4 až 12 hodín.
- Satelity s vysokou obežnou dráhou (HEO – Highly elliptical earth orbit) sa nachádzajú v nadmorskej výške nad 20 000 km. Satelity tohoto typu sa nazývajú HEO satelity. Doba obehu HEO satelitu je viac ako 12 hodín.

Treba brať do úvahy, že priestor obklopujúci zem nie je prázdny, aj keď tak vyzerá. Väčšinou sú tam dva typy obmedzení vonkajšieho prostredia, ktoré treba brať do úvahy pri voľbe nadmorskej výšky:



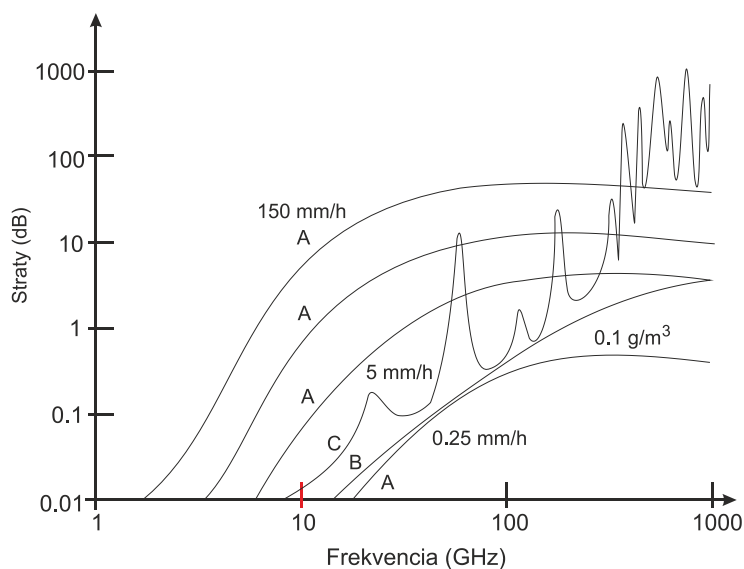
Obr. 1.18 Satelitná obežná dráha

- Van Allenove vyžarovacie pásy, kde sa ukladajú energetické častice ako sú napríklad protóny a elektróny sú udržiavané magnetickým poľom zeme. Tieto častice môžu spôsobiť škodu na elektronických a elektrických komponentoch satelitu.
- Pásky vesmírneho odpadu, kde sa nachádzajú trosky kozmických lodí, ktoré tam boli ponechané po ich životnosti. Tieto častice sa stávajú zvyšujúcou hrozbou pre medzinárodné spoločenstvo, pretože môžu spôsobovať problémy pre satelitné siete a vesmírne misie v budúcnosti.

1.10.7 Satelitné frekvenčné pásma vysielania

Frekvenčná šírka pásma je ďalším dôležitým prostriedkom satelitných sietí, ale taktiež nedostatkovým zdrojom. Rádiové frekvenčné spektrum sa šíri od 3 kHz do 300 GHz a prenosy nad 60 GHz sú zväčša nepraktické kvôli ich vysokej spotrebe energie a nákladov na zariadenia. Časť tejto šírky pásma je dnes použitá pre terestriálne mobilné prenosy ako napríklad GSM, 3G a bezdrôtové LAN siete.

Naviac obmedzujúcimi činiteľmi pre ďalšie vhodné frekvenčné pásma pre účely satelitnej komunikácie predstavuje ovplyvňovanie prostredia pre šírenie rádiových signálov je hlavne dažď, sneh, plyn a iné faktory ale aj limitovaný elektrický výkon satelitu zo solárnych panelov a batérií. Obr. 1.19 zobrazuje útlm rôznych frekvenčných pásiem v dôsledku snehu, hmly alebo plynu. Kapacita spojenia je obmedzovaná šírkou pásma a prenosovým výkonom používaným pre vysielanie. Frekvenčné šírky pásma sú alokované inštitúciou ITU. Existuje niekoľko pásiem pre satelitné komunikácie. Historicky, šírky pásma okolo 6 GHz pre spoj vo vzostupnom smere (uplink) a 4 GHz pre zostupný smer boli spárované v C pásme. Mnohé FSS dodnes používajú tieto pásma. Armádne a vládne systémy používajú pásmo okolo 8/7 GHz v takzvanom X pásme. Existujú taktiež systémy, ktoré operujú okolo 14/12 GHz v takzvanom Ku pásme. Nová generácia satelitov sa snaží využívať Ka pásmo pre rozšírenie svojej šírky pásma kvôli vysokej koncentrácii v Ku pásme. Tabuľka 1.2 poskytuje príklady využívania frekvenčných pásem.



Obr. 1.19 Útlm rôznych frekvenčných pásiem kvôli A: dažď, B: hmla a C: plyn

Tab. 1.1 Charakteristické frekvenčné pásma satelitnej komunikácie

Pomenovanie	Frekvenčné pásma (GHz)
UHF	0.3 – 1.12

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

L band	1.12 – 2.6
S pásmo	2.6 – 3.95
C pásmo	3.95 – 8.2
X pásmo	8.2 – 12.4
Ku pásmo	12.4 – 18
K pásmo	18.0 – 26.5
Ka pásmo	26.5 – 40

1.11 Vlastnosti satelitných sietí

Väčšina dnes používaných komunikačných satelitov sú rádiové frekvenčné opakovače (RF – radio frequency repeaters) alebo takzvané „oblúkové prenosové“ (bent pipe) satelity. Regeneratívny (smart) satelit, minimálne regeneruje prijatý digitálny signál. Taktiež môže dekodovať a prekódovať bitový tok. Okrem toho môže mať schopnosť prepájať a zabezpečovať medzisatelitné spojenie (inter satellite links-ISL).

Rádiové spojenie (microwave LOS) poskytuje vysielanie bitov a bajtov v reálnom čase na fyzickej vrstve vrstvového referenčného modelu. Existujú tri hlavné technické problémy v satelitných spojeniach, v dôsledku vzdialenosti, v ktorej sa satelit nachádza od pozemnej stanice.

Tab. 1.2 Príklad použitia frekvenčných pásiem pre GEO satelity

Pomenovanie	Uplink (bandwidth)	Downlink (bandwidth)	Typické využitie v FSS pre GEO satelity
6/4 C pásmo	5.850 – 6.425 (575 MHz)	3.625 -4.2 (575 MHz)	Medzinárodné a domáce satelity: Intelsat, USA, Kanada, Čína, Francúzsko, Japonsko, Indonézia
8/7 X pásmo	7.925 – 8.425 (500 MHz)	7.25-7.75 (500 MHz) 10.95 -11.2	Vládne a armádne satelity Medzinárodná a tuzemské satelity v regióne 1 a 3

			11.45 - 11.7	Intelsat, Eutelsat,
			12.5 – 12.75 (1000 MHz)	Francúzsko, Nemecko, Španielsko, Rusko
13-14/11-12 pásmo	Ku 13.75-14.5 (750 MHz)	10.95-11.2		Medzinárodná a tuzemské satelity v regióne 2
			11.45-11.7	
			12.5-12.75 (700 MHz)	Intelsat, USA, Kanada, Španielsko
18/12 Ku pásmo	17.3-18.1 (800 MHz)	BSS pásma		Distribučná linka pre BSS
30/20 Ka pásmo	27.5-30.0 (2500 MHz)	17.7-20.2 (2500 MHz)		Medzinárodné a domáce satelity Európa, USA, Japonsko
40/20 Ka pásmo	42.5-45.5 (3000 MHz)	18.2, 21.2 (3000 MHz)		Vládne a armádne satelity

1.11.1 Oneskorenie šírením

Prvý problém, ktorý treba riešiť pri satelitných sieťach je veľmi veľká vzdialenosť. Pre GEO satelity, čas potrebný na prejde nie takýchto vzdialeností – a to: od pozemnej stanice k satelitu a ku inej pozemnej stanici – je približne 250 ms. Spiatkové oneskorenie (round trip) potom bude 2x 250 alebo 500 ms. Tieto časy šírenia sú omnoho väčšie ako časy v bežných terestriálnych systémoch. Tento problém je jeden z obrovských kvôli propagačnému času, čo spôsobuje echo na telefónnych okruhoch. Taktiež spomaľuje odpovede určitých dátových okruhov pre blokové alebo paketové systémy a vyžaduje starostlivý výber telefónnych signalizačných systémov alebo v opačnom prípade sa čas potrebný na zostavenie hovoru môže stať neúmerne veľkým.

1.11.2 Strata šírením a obmedzený výkon

Druhým problémom pri satelitných sieťach sú straty spôsobené šírením. Pri priamej viditeľnosti (LOS – line of sight) pre mikrovlnové šírenie zaznamenávame straty až do 145 dB. V prípade satelitných sietí s dosahom až do 22 300 míľ, operujúcich na 4.2 GHz, straty vo voľnom priestore sú 196 dB a pri frekvencii 6 GHz až 199 dB. Pri frekvencii 14 GHz je strata asi

207 dB. To nepredstavuje problém pre prenosy zo zeme smerom k satelitu, kde môžu byť použité vysoko výkonové vysielače a antény s vysokým ziskom. Spôsobuje to však problém v spojení zo satelitu na zem, kde výkon je obmedzovaný z 2 príčin:

1. V pásmach zdieľaných s terestriálnymi službami, ako je napríklad v široko využívanom 4-GHz pásme, aby sa zabránilo interferenciám s týmito službami.

2. V samostatných satelitoch, ktoré môžu získavať energiu len zo solárnych článkov. Tento spôsob získavania energie vyžaduje veľký počet solárnych buniek na vytvorenie dostatočného rádiovýkvenčného výkonu. Z toho dôvodu, zostupná linka (downlik), zo satelitov na zem je kritická a prijatá úroveň signálu bude omnoho menšia ako na porovnateľných rádiových spojoch, len -150 dBW.

1.11.3 Obežná dráha a obmedzená šírka pásma

Tretím problémom je obsadenosť. Rovníková obežná dráha sa zaplňuje s geostacionárnymi satelitmi. Narastá rádio frekvenčné rušenie z jedného satelitného systému k inému. Toto obzvlášť platí pre systémy používajúce menšie antény na pozemných staniách s ich podstatne širšími vyžarovacími uhlami (beam width). Toto všetko spôsobuje frekvenčné zahustenie vysielačov.

1.11.4 Prevádzková zložitosť pri LEO satelitných systémoch

Okrem GEO satelitov, môžeme vidieť aj niekoľko nových satelitných systémov operujúcich na nízkej obežnej dráhe, ktoré môžu rozšíriť satelitný potenciál. Tieto satelity sa typicky nachádzajú v nižšej nadmorskej výške nad zemou. To môže znižovať problémy s oneskorením a stratami, ale na druhej strane predstavujú väčšiu zložitosť v prevádzkovaní komunikačného spojenia medzi pozemným terminálom a satelitom v dôsledku rýchleho pohybu zoskupenia LEO satelitov.

1.12 Kapacita kanála pri digitálnych prenosoch

Vo frekvenčnej oblasti, väčšia šírka pásma môže podporovať viac komunikačných kanálov. V časovej oblasti, je kapacita digitálnych prenosov taktiež priamo úmerná šírke pásma.

1.12.1 Nyquistova rovnica pre bezšumové kanály (The Nyquist formula for noiseless channels)

Nyquistova rovnica je používaná pre určenie kapacity kanála pre bezšumový kanál:

$$C = 2B \log_2 M \quad (1.5)$$

Kde C je maximálna kapacita pre dátový prenos v jednotkách bit/s, B je šírka pásma v Hz a M je počet úrovní na signalizačný prvok.

1.12.2 Shannonova rovnica pre zašumené kanály

Shannonova a Hartleyho kapacitná rovnica je používaná na určenie maximálnej bitovej rýchlosti C na obmedzenom pásme kanála s použitím špecifického pomeru signál/šum (S/N). Rovnica vyzerá nasledovne:

$$C = 2B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.6)$$

Kde C je maximálna kapacita v bit/s, B je šírka pásma kanála, S je výkon signálu a N je šumový výkon.

Keďže $S = RE_b$ a $N = N_0 B$ rovnica môže byť prepísaná do nasledovného tvaru:

$$C = B \log_2 \left[1 + \frac{RE_b}{N_0 B} \right] = B \log_2 \left[1 + \left(\frac{R}{B} \right) \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right] \quad (1.7)$$

kde E_b je energia na bit, R je prenosová bitová rýchlosť a $N = N_0 B$, kde N_0 je spektrálna hustota toku šumového výkonu.

1.12.3 Hraničná kapacita kanálu

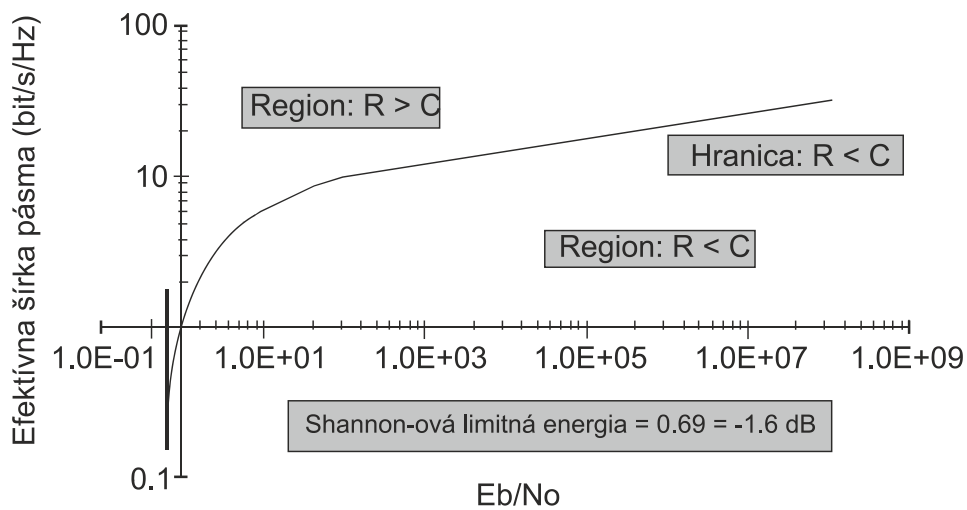
Nech $R=C$ v rovnici (1.7), potom dostávame funkciu hraničnej kapacity medzi účinnosťou C/B a daným E_b/N_0 :

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left[1 + \left(\frac{C}{B} \right) \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right] \quad (1.8)$$

Potom:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{\frac{C}{B}} - 1}{\frac{C}{B}} \quad (1.9)$$

Obr. 1.20 zobrazuje vzťah medzi hraničnou kapacitou komunikačného kanála a E_b/N_0 . Ak prenosová rýchlosť je v rozsahu kapacitného limitu, ak $R < C$, tak sme schopní dosiahnuť prenosovú rýchlosť s vhodne navrhnutým modulačným a kódovacím mechanizmom. Ak $R > C$, tak nie je možné dosiahnuť bezchybný prenos.



Obr. 1.20 Hraničná kapacita komunikačného kanála

1.12.4 Shannonova výkonová hranica (-1.6dB)

Kompromisom sa dá zvýšiť šírka pásma a takýmto spôsobom redukovať výkon prenosu. Ak necháme prenosovú bitovú rýchlosť dosiahnuť svoje maximum, potom dostávame rovnicu (1.8) v tvare:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{-1} = \log_2 \left[1 + \left(\frac{C}{B}\right) \left(\frac{E_b}{N_0}\right)^{\frac{B}{C}} \right] \quad (1.10)$$

Ak $\left(1 + \frac{1}{x}\right)^x \rightarrow e$ potom $x \rightarrow \infty$, nechajme $B \rightarrow \infty$ tak dostávame Shannonov limit výkonu:

$$\frac{E_b}{N_0} = \log_2 \left(\frac{1}{e} \right) = \log_e 2 \approx 0.69 = -1.6 \text{ dB} \quad (1.11)$$

Z toho vyplýva, že bez ohľadu na to akú máme šírku pásma, prenosový výkon v zmysle $\frac{E_b}{N_0}$ môže byť väčší ako Shannonova hranica, hoci je tam kompromis medzi šírkou pásma a výkonom.

1.12.5 Shannonova efektívna šírka pásma pre veľké E_b/N_0

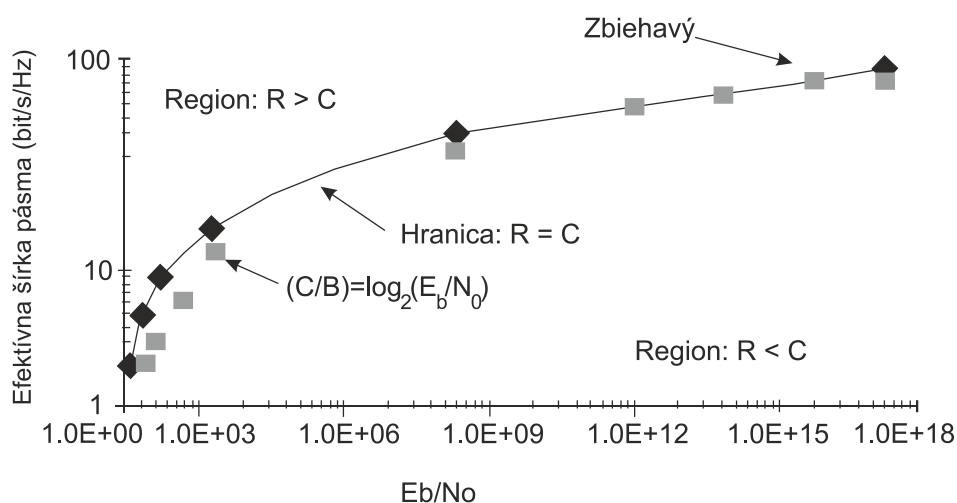
Podobne môžeme odvodiť rovnicu Shannonovej efektívnej šírky pásma z rovnice (1.8) pre veľké E_b/N_0 nasledovne:

$$\log_2 \left[\left(\frac{C}{B} \right) \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right] \leq \frac{C}{B} \leq 1 + \log_2 \left[\left(\frac{C}{B} \right) \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right]$$

Odkiaľ $\frac{C}{B} \approx \log_2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)$, keď $\left(\frac{E_b}{N_0} \right) \rightarrow \infty$. Obr. 1.21 zobrazuje konvergenciu medzi (C/B) a

$\log_2 \left(\frac{E_b}{N_0} \right)$. Taktiež zobrazuje skutočnosť, že pri nízkom prenosovom výkone, jeho zvyšovaním

pomocou malých skokov sa môže dosiahnuť obrovský vplyv na efektívnu šírku pásma. Na druhej strane, ak je prenosový výkon vysoký, redukovaním efektívnej šírky pásma pomocou malých skokov, sa dá dosiahnuť obrovský vplyv na šetrenie prenosového výkonu. Takýmto spôsobom sa môžu inžinieri pohybovať medzi prenosovou šírkou pásma a prenosovým výkonom.



Obr. 1.21 Shannonova efektívna šírka pásma pre veľké E_b/N_0

1.13 Doplnková literatúra

- [1] Ohmori, S.-Wakana,H.-Kawase.S:”Mobile Satellite Communications“, Artech House Publishers, Boston-London,1998.
- [2] Zhili,S.:”Satellite Networking.Principles and Protocols“, John Wiley & Sons Ltd, England, 2005
- [3] Eutelsat, *Overview of DVB, Annex B to Technical Guide*, June 1999.
- [4] Haykin, S., *Communication Systems*, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [5] ITU, *Handbook on Satellite Communications*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [6] Joel, A., Retrospective: telecommunications and the IEEE communications society, *IEEE Communications*, May 2002.
- [7] Khader, M. and W.E. Barnes, *Telecommunications Systems and Technology*, Prentice-Hall, 2000.
- [8] Brady, M. and M. Rogers, *Digital Video Broadcasting Return Channel via Satellite (DVB-RCS) Background Book*, Nera Broadband Satellite AS (NBS), 2002.
- [9] Podhradský,P.-Polec,J.-Karlubíková,T.: Multimediálne telekomunikačné technológie, Vydateľstvo STU v Bratislave, 2000
- [10] Doboš,L.-Dúha,J.- Marchevský,S.- Wieser,V.: Mobilné rádiové siete. Vydala Žilinská univerzita v Žiline/ EDIS- vydavateľstvo ŽU, 2004.

1.14 Cvičenie

1. Vysvetlite význam širokopásmový použitím definície danej v ITU-T požiadavkách
2. Vysvetlite základný koncept satelitných sietí a medzisieťovej komunikácie s terestriálnymi sieťami
3. Vysvetlite termín satelitné služby, sieťové služby a QoS
4. Vymenujte rozdiely medzi prvkami v satelitnom sieťovaní a terestriálnom sieťovaní
5. Vysvetlite funkciu sieťového užívateľského terminálu a satelitného terminálu
6. Derivujte Shannonov výkonový limit a Shannonovu pásmovú kapacitu pre veľkosť E_b/N_0

7. Vysvetlite základné princípy protokolov a referenčného modelu ISO/OSI.
8. Vysvetlite základy ATM referenčného modelu
9. Opíšte balík internetového protokolu TCP/IP
10. Vysvetlite základný princíp multiplexovania a viacnásobného prístupu
11. Vysvetlite základné koncepty prepínania vrátane obvodového prepínania, virtuálneho prepínania a smerovania.
12. Vysvetlite termín satelitné služby, sieťové služby a QoS

2 Orbitálne dráhy satelitov

2.1 Úvod

Táto kapitola si kladie za cieľ oboznámiť čitateľov s úvodnými dynamickými charakteristikami z pohľadu návrhu orbitálnej dráhy, so základnými rovnicami pohybu pre základné vlastnosti kruhových a eliptických dráh, so stručným konceptom orbitálnej zostavy a počte satelitov. Vzhľadom na rastúci záujem o negeostacionárne dráhy a ich formácie, bude v tejto kapitole stručné pojednanie aj o nich, hlavná pozornosť však bude venovaná geostacionárnej dráhe vzhľadom na jej praktickú dôležitosť, čo umožní realizovať priame analýzy stability geostacionárnej komunikačnej linky.

Orbitálna dynamika podporuje komunikačné satelitné projekty, obyčajne v dvoch fázach: návrh dráhy a orbitálna prevádzka. Návrh dráhy, alebo analýzy úlohy ako je o tom často hovorené, začína v skorom štádiu satelitného projektu, kde sú preverené rôzne druhy dráh, aby sa našla optimálna dráha pre komunikačné služby. Orbitálna prevádzka začína okamžite po vypustení satelitu, kde sledovanie satelitu, určenie a údržba bude uskutočňovaná periodicky počas doby života satelitu. Orbitálna prevádzka je založená na dôkladnom poznaní krátkodobých pohybov satelitu. Návrh dráhy je založený na prieskume orbítu, s čiastkovým záujmom o dlhodobú stabilitu orbitálnej dráhy.

Po prečítaní tejto kapitoly by mali byť čitatelia schopní:

- Poznať základné obežné dráhy satelitov a možnosti satelitov prevádzkovaných na týchto dráhach.
- Poznať dôvody vzniku porúch obežnej roviny.
- Opísať model poruchy obežnej dráhy.
- Poznať dôvody pre vytváranie satelitných formácií.
- Poznať dôvody prečo je potrebné sa vyhnúť van Allenovým pásom.
- Poznať vlastnosti eliptickej obežnej dráhy.
- Poznať spôsob stanovenia rýchlosti zväčšenie rýchlosti satelitu na dosiahnutie predpísanej geostacionárnej dráhy.
- Poznať význam parametra e na tvar obežnej dráhy.
- Poznať spôsob stanovenia pohybu satelitu.
- Poznať vplyv vedľajšej osi a eliptickej obežnej dráhy na veľkosť orbitálnej periódy.
- Poznať riešenie Keplerovej rovnice.
- Porozumieť pohybu satelitu na obežnej eliptickej dráhe v blízkosti perigea.
- Poznať dôvody pre ktoré je zemepisná šírka apogea eliptickej obežnej dráhy vybraná tak, že jej maximum je 63.4° , s $\omega = 90^\circ$ alebo 270° .

- Poznať načo má vplyv nastavenie excentricity blízkej $e=0.722$ v súvislosti s formáciami satelitov na eliptickej obežnej dráhe.
- Poznať dôvody, pre ktoré sa eliptické obežné dráhy nazývajú aj Molnija orbity.
- Opísať význam slovného spojenia „udržiavanie stanice“.
- Poznať riešenie problému dvoch telies v súvislosti s vyšetovaním pohybu satelitov na blízko geostacionárnych dráhach.
- Poznať význam vzťahu $e < B / (2r_0) = 0,00087$ pre udržiavanie stanice s presnosťou 0,1 stupňa.

2.2 Kruhová dráha

2.2.1 Základné formulácie

Dynamické charakteristiky kruhovej dráhy môžu byť jednoduché, zvlášť keď gravitačná a odstredivá sila sú vykompenzované. Avšak keď sú sily naozaj vykompenzované, nepôsobia na satelit žiadne iné sily, prečo potom satelit nevykonáva priamočiary pohyb preč od Zeme? Odpoveď na túto hlúpu otázku vyžaduje štúdium orbitálnej dráhy so základnými rovnicami pohybu a toto umožňuje začať študovať eliptické a geostacionárne dráhy.

Keď sa satelit pohybuje okolo Zeme, sú sily naňho pôsobiace popísané v polárnych súradniciach. Derivujeme rovnice pohybu v polárnych súradniciach (r, θ) podľa pravouhlých súradníc (x, y) (obr. 2.1). Z podobnosti rovnosti

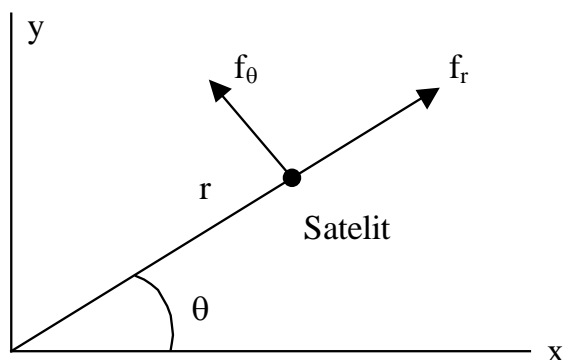
$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta$$

môžeme priamo napísať nasledujúce rovnice:

$$\ddot{x} = \ddot{r} \cos \theta - 2\dot{r}\dot{\theta} \sin \theta - r\dot{\theta}^2 \cos \theta - r\ddot{\theta} \sin \theta \quad (2.1)$$

$$\ddot{y} = \ddot{r} \sin \theta + 2\dot{r}\dot{\theta} \cos \theta - r\dot{\theta}^2 \sin \theta + r\ddot{\theta} \cos \theta \quad (2.2)$$

Sila f pôsobiaca na satelit je meraná v zrýchlení, ktoré sila spôsobila satelitu (tzn. sila je prepočítavaná na jednotku hmotnosti satelitu), takže rovnice pohybu v originálnych pravouhlých súradniciach vyzerajú jednoducho takto:



Obr. 2.1 Pravouhlé a polárne súradnice

$$f_r = \ddot{x}f = \ddot{y} \quad (2.3)$$

Ak rozpíšeme silu f do radiálnej a tangenciálnej zložky (f_r, f_θ), sú vzťahnuté ku x a y -ovej zložke:

$$f_r = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta \quad (2.4)$$

$$f_\theta = -f_x \sin \theta + f_y \cos \theta \quad (2.5)$$

Substitúciou (2.1) a (2.2) do (2.3) a potom (2.3) do (2.4) a (2.5) dáva výsledok:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = f_r \quad (2.6)$$

$$2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} = f_\theta \quad (2.7)$$

čo sú rovnice pohybu v polárnych súradniciach.

Ak by bola Zem ideálna guľa a jej hmotnosť rozložená symetricky, môžeme počítať, že sa celá jej hmotnosť nachádza v strede. Tento bod, kde je umiestnená hmotnosť, počiatok O v obr. 2.1 bude priťahovať satelit, opačne-umocnenou gravitačnou silou:

$$f_r = -\mu/r^2, f_\theta = 0$$

kde $\mu = 398600.5$ je gravitačná konštanta. Pohyb satelitu sa potom riadi rovnicami:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -\mu/r^2 \quad (2.8)$$

$$2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} = 0 \quad (2.9)$$

čo nám bude slúžiť ako základ pri našich ďalších diskusiách. Zvážiac satelitný pohyb ako taký - Zem s hmotnosťou v jednom bode a satelit - je označovaný ako dvojbodový problém.

Teraz, uvažujme, že $r = \text{konšt.}$ Potom z (2.9) musí platiť, že $\dot{\theta} = \text{konšt.} = \Psi$, a potom (2.8) je nutné:

$$r\Psi^2 = \mu/r^2$$

Táto rovnica potom uvádza, že odstredivá sila vyvažuje gravitačnú silu. Poznamenajme, že odstredivá sila pôsobí tak dlho, pokiaľ sledujeme pohyb satelitu pozdĺž osi r , ktorá sa otáča so satelitom. Ak chce niekto definovať obežnú dráhu ako rovnováhu síl, mal by najprv spomenúť, že odstredivé a príťažlivé sily pôsobiace na satelit, sú obe konštantné vo veľkosti, a tiež, že tieto dve sily sa navzájom vyvažujú.

Pri danom polomere r je obežný pohyb charakterizovaný uhlovou rýchlosťou obiehania

$$\Psi = \sqrt{\mu/r^3} \quad (2.10)$$

obežná rýchlosť satelitu

$$v = r\Psi = \sqrt{\mu/r} \quad (2.11)$$

a doba (perióda) obehu

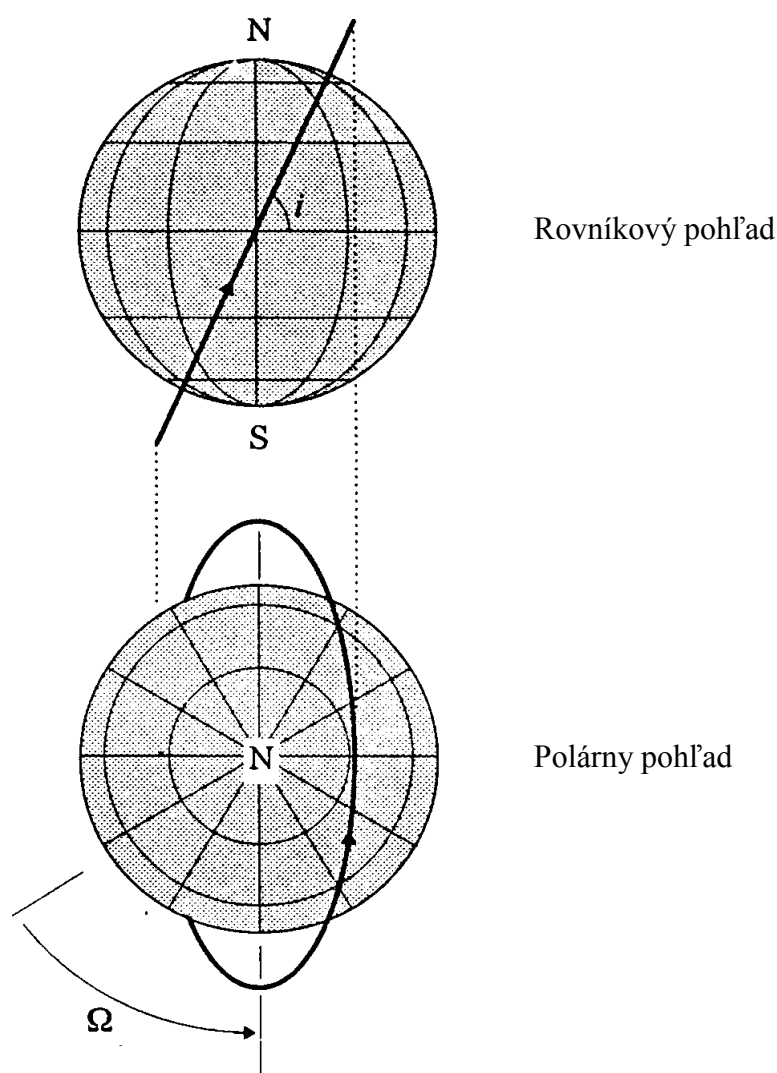
$$P = 2\pi/\Psi = \sqrt{r^3/\mu} \quad (2.12)$$

Úloha 2.1

Aký musí byť orbitálny polomer, aby sa orbitálna perióda rovnala perióde rotácie Zeme, ktorá je 23h 56m 4s (alebo 86164s)?

Dávnejšie sme spomínali, že pohyb satelitu je daný v (x,y) -súradniciach (rovine), alebo eventuálne v (r,θ) -súradniciach. To bolo prípustné, pretože gravitačná sila nemala žiadnu zložku vystupujúcu z roviny, takže orientácia našich súradníc - orbitálnych súradníc – ostala v tomto inerciálnom priestore nezmenená. Za účelom definovania tejto orientácie v inerciálnom priestore, sú použité dva parametre (Obr. 2.2). Jeden je uhol, ktorý zvierá orbitálna rovina voči rovine rovníka, ktorý sa nazýva inklinácia. Ďalší je definovaný následovne: Body, v ktorých

satelit prechádza rovinou rovníka sa nazývajú uzly, bod z ktorého vychádza z juhu na sever sa nazýva vzostupný uzol. Orientácia vzostupného uzla meraná v stálom referenčnom smere pozdĺž roviny rovníka, sa nazýva priame stúpanie vzostupného uzla. Teoreticky, referenčný smer môže byť hocijaký, ak je pevný v inerciálnom priestore. V praxi vyberieme (patríčne k historickému významu) tento referenčný smer v smere, v ktorom sa slnko nachádza v čase jarnej rovnodennosti- tento smer ukazuje na špecifickú oblasť zverokruhu na oblasť súhvezdia rýb (particular corner of zodiac constellation Pisces). Orientácia orbitálnej dráhy je tak špecifikovaná pomocou inklinácie i a pomocou Ω priameho smeru uzla stúpania.

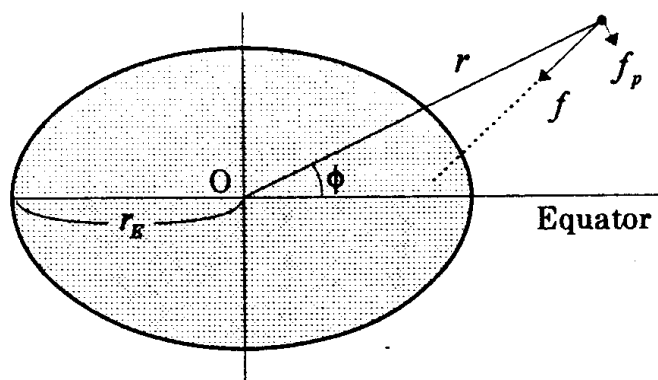


Obr. 2.2 Orientácia orbitálnej roviny: rovníkový a polárny pohľad

2.2.2 Narušenie (perturbation) obežnej roviny

Hoci sme predtým uvažovali, že Zem je guľovo symetrická, nie je to celkom pravda. Zem je trochu sploštená, takže polomer Zeme na rovníku je väčší než polárny polomer o 21 km.

Táto sploštenosť spôsobuje, ako čoskoro uvidíme, že obežná rovina postupne mení orientáciu v inerciálnom priestore. Taká pomalá zmena vznikajúca pri obežnom pohybe sa nazýva porucha (rušenie). Aj keď porucha spôsobená sploštenosťou orbitálnej dráhy (roviny) je malá, musíme ju zobrať do úvahy pri diskusii ako vytvoriť orbitálny formáciu počtu satelitov pre komunikačné služby.



Obr. 2.3 Vychýlenie gravitačnou silou

Gravitačná sila sploštenej Zeme sa javí, ako je to znázornené na obrázku 2.3, kde vydutá časť blízko rovníka priťahuje satelit tak, ako to ukazuje bodkovaný smer gravitačnej sily f , že ho jemne vytáča od zemského centra O . Sila f má potom malú zložku f_p kolmú na obežnú rovinu a orientovanú k rovine rovníka. Táto zložka, pre satelit o polomere r a uhle ϕ sa rovná

$$f_p = 3\mu J_2 \left(r_E^2 / r^4 \right) \sin \phi \cos \phi \quad (2.13)$$

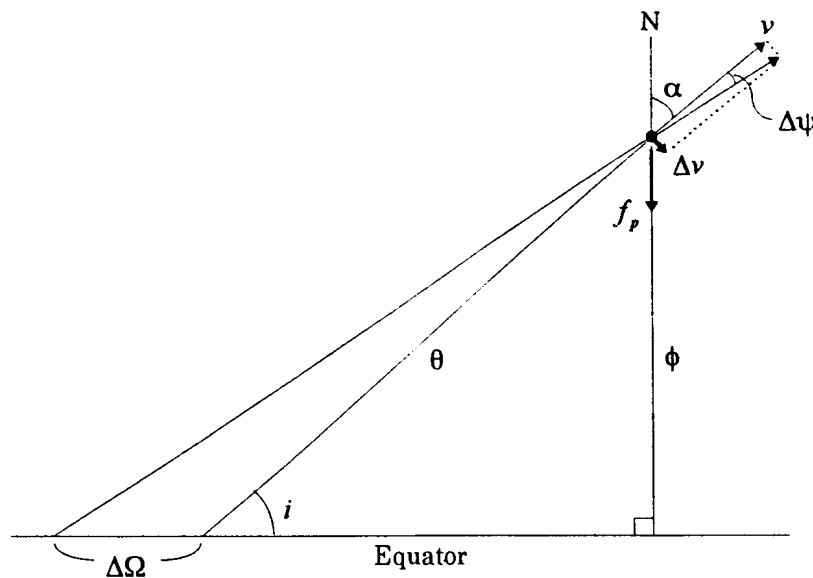
kde $r_E=6378.15$ km je polomer Zeme na rovníku a konštanta $J_2=0.0010823$ je miera zemského sploštenia. Ukážme, že táto zložka sily spôsobuje chybu v priamom smere uzla stúpania.

Predpokladajme, že náš satelit S prešiel uzlom stúpania a ide pod uhlom θ svojho obiehania, ako je to znázornené na obrázku 2.4 (Poznamenávame, že sme s týmto obrázkom robili sférickú (guľovú) trigonometriu, s trojuholníkmi bolo všetko vsadené do veľkých kružníc). Počas krátkej periódy Δt , zložka sily f_p pôsobiaca mimo roviny spôsobuje malú zmenu rýchlosti $f_p \Delta t$ smerovanú k rovníku. Táto zmena rýchlosti má zložku kolmú na rýchlosť satelitu, ktorá je

$$\Delta v = f_p \Delta t \sin \alpha$$

kde α je azimut kurzu (smeru) satelitu. V dôsledku tejto zmeny rýchlosti Δv , kurz satelitu sa zmení $\Delta \psi = (\Delta v)/v$. Potom, v sférickej trigonometrii (súradniciach), sa negatívna zmena Ω vyjadří ako

$$\Delta\Omega = -\frac{\sin\theta}{\sin i} \Delta\psi = -\frac{\sin\theta \sin\alpha}{\sin i} \frac{f_p}{v} \Delta t \quad (2.14)$$



Obr. 2.4 Porucha na Ω

Preto zmena Ω na jeden orbitálny obch sa dá zapísať nasledovne

$$\Delta\Omega = -\int_0^P \frac{\sin\theta \sin\alpha}{\sin i} \frac{f_p}{v} dt \quad (2.15)$$

Teraz nahradíme dt za $d\theta$ vo vzťahu $d\theta = (vdt)/r$ a použijeme sférické trigonometrické vzorce

$$\sin\alpha = \cos i / \cos\phi, \quad \sin\phi = \sin i / \sin\theta$$

a (2.11); potom (2.15) môžeme vyjadriť v tvare

$$\Delta\Omega = -3 \frac{J_2 R_E^2}{r^2} \cos i \int_0^{2\pi} \sin^2\theta d\theta$$

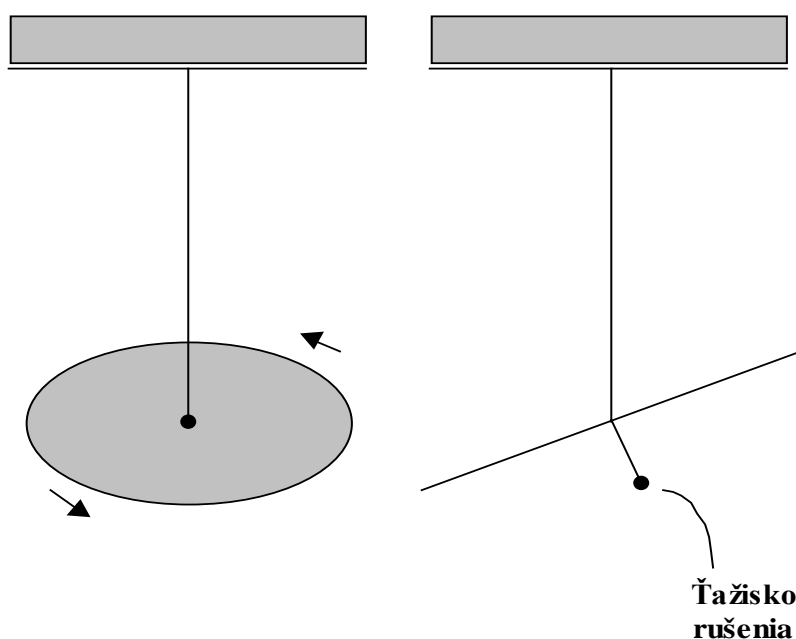
Určitý integrál v tejto rovnici je rovný π (3.14), teda získame

$$\Delta\Omega = -3\pi J_2 (r_E / r)^2 \cos i \quad (2.16)$$

pre odhad poruchy vrcholu-uzla v radiánoch na jeden obeh. Prakticky, to sa rovná $\Delta\Omega = -9.96(r_E/r)^{3.5} \cos i$ v stupňoch za deň. Ak obežná dráha je polárna orbita ($i=\pm 90$ stupňov), jej uzol (vrchol) sa nehýbe. Pre obežnú dráhu s inklináciou medzi ± 90 stupňov, sa uzol pohybuje v opačnom zmysle proti smeru pohybu satelitu, čo sa často uvádza ako uzlová regresia (spätný pohyb uzla).

Hoci inklinácia i sa javí, že sa tiež pravdepodobne zmení (obr.2.4) dá sa ukázať, že táto zmena sa stratí po vykonaní integrácie nad jednu obrátku, takže v inklinácii nenastane dlhotrvajúca zmena.

Satelit obiehajúci po kruhovej obežnej dráhe má konštantnú uhlovú rýchlosť vzhľadom k stredu Zeme. Chovanie sa orbitálnej dráhy je analogické s pohybom vlka (spinning top). Predstavte si, že máte tenký pevný disk vyrobený z rovnorodého materiálu, a tento disk je v strede uchytený za tenké dlhé vlákno visiace zo stropu (obr. 2.5). Pri udelení správneho počiatočného pohybu, disk sa otáča v stacionárnej rovine pri konštantnej inklinácii voči horizontálnemu pohľadu podobne, ako rovina rovníka. Ak niť podopiera kotúč presne v ťažisku, rovina otáčania sa nehýbe (to znamená, že je bez rušenia). Pripojme k tomuto disku tyčku, podobne ako ručka dáždника, a dajme malé závažie na jej koniec, ako na obrázku. Bude to fungovať tak, ako viesť rovinu disku strom k horizontálnej rovine, čo je analogické k efektu spôsobeného poruchovou silou v dôsledku sploštenia Zeme v oblasti rovníka, ktorá ťahá rovinu obežnej dráhy satelitu k rovine rovníka (obr. 2.3). Točiaci sa disk potom vytvára stály pohyb uzlového bodu, so stále nezmeneným sklonom, a to presne reprezentuje poruchu roviny obežnej dráhy.



Obr. 2.5 Model poruchy obežnej dráhy

V dôsledku tejto analógie, porucha Ω sa niekedy nazýva ako precesia uzla (precession of node).

Úloha 2.2

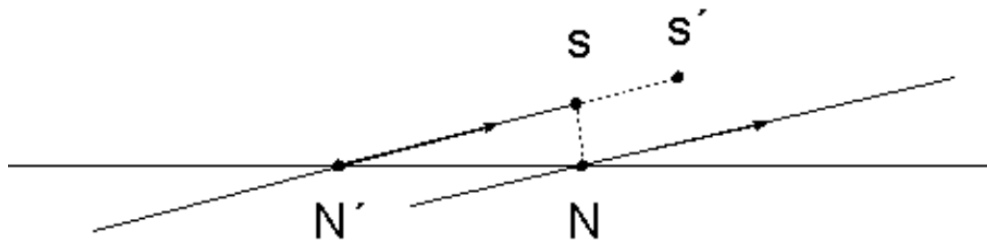
V našej poslednej analógii, uzol ostane stáť, ak sa disk otáča vo vertikálnej rovine, kým sa skutočne uzol polárnej orbitálnej dráhy nehýbe. Odkiaľ sa táto nezhoda vzala?

Niekoľko by mohol byť popletený kvôli zmene uzla pre skoro rovníkovú orbitálnu dráhu. Predpokladajme, že na obr. 2.6 náš satelit prešiel bodom (uzlom) N. Z rovnice (2.16) vyplýva, že uzol bude v určitej polohe N' po uplynutí jednej otáčky, čo však neznamená, že sa satelit bude nachádzať v polohe N' po jednej otáčke; v skutočnosti satelit bude v polohe S po uplynutí jednej periódy obehu. Pre rovníkový orbit je potrebné poznamenať, že uzol stráca jeho definíciu, takže netto by mohol zabudnúť na precesiu uzla. Presnejšie povedané, sploštením Zeme spôsobená rušivá sila má aj iné zložky než (2.13), a to má za následok to, že satelit dosiahne polohu S' po uplynutí jednej periódy definovanej v rovnici (2.12). Dá sa povedať, že orbitálna perióda je tiež rušená a táto porucha je závislá od inklinácie. Tento vzťah medzi orbitálnym uhlom a orbitálnou periódou definovaný v (2.12) takto potrebuje jemnú korekciu zodpovedajúcu poruche. Zdá sa, že to spôsobuje obtiažné situácie- vyselektujete patričnú obežnú dobu (periódu) pre váš komunikačný objekt a potom použijete (2.12) na nájdenie obežného uhla a takto nájdený uhol bude odlišný od toho, aký by mal byť v skutočnosti. Našťastie, tento rozdiel v obežnom uhle je taký malý, že sa dá zanedbať z hľadiska komunikačných služieb. Takže, na čo by sme mali pamätať v našom orbitálnom návrhu je, po tomto všetkom, že precesia uzla je spôsobená sploštením Zeme.

2.2.3 Viacnásobná satelitná formácia

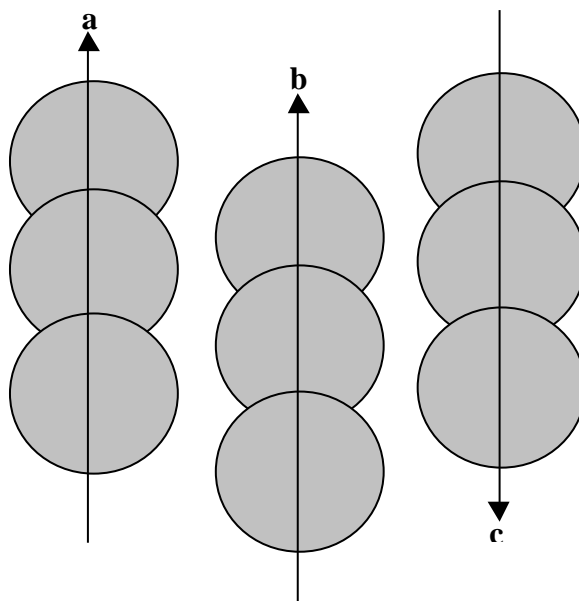
Použitie kruhovej obežnej dráhy pre mobilné komunikácie ukazuje svoju cenu, keď určitý počet satelitov je využitý tak, aby poskytoval široké služobné pokrytie. Satelity musia byť usporiadané v správnej orbitálnej formácii tak, aby sme si boli istí plynulou službou pri danom pokrytí. Návrh takéhoto usporiadania bude vyzeráť nasledovne.

Návrh začína definovaním ε , čo je minimálny elevačný uhol satelitu, ktorý môžeme garantovať pre komunikačné služby, a h , čo je výška obežnej dráhy satelitu.



Obr. 2.6 Uzlový spätný pohyb pre dráhu blízko rovníka

Udaním ε a h , má satelit pozemnú oblasť služieb ohraničenú kružnicou so stredom v bode pod satelitom (subsattelite point). Pokúsime sa pokryť širokú oblasť -najlepšie celú Zem- určitým počtom služobných kružníc obtočených okolo Zeme. Poznamenajme, že sme zabudnúť na otáčanie Zeme, ak predpokladáme globálne pokrytie. Uvažujme kruhovú obežnú dráhu s výškou h a umiestnime potrebný počet satelitov na túto obežnú dráhu v rovnakom odstupe, tak aby sme vytvorili zástup vzájomne sa prekrývajúcich služobných kruhov ako je to zobrazené na obr. 2.7. To, aby mali satelity identickú výšku je nevyhnutné, pretože kruhy pokrytia sa potom pohybujú rovnakou rýchlosťou otáčania podľa (2.10), kde $r=r_E+h$, a potom pevná geometria prekrytia môže byť udržiavaná kruhmi pokrytia. Máme teda pás pokrytia okolo Zemského povrchu pozdĺž veľkého kruhu. Vytvorenie globálneho pokrytia si vyžaduje určitý počet takých pásov pokrytia (služieb). Pretože každé dva pásy pokrytia sa križuju navzájom na dvoch miestach, redundancia (nadbytok) pri vytváraní pokrytia je nevyhnutná, hoci existujú snahy minimalizovať túto redundanciu adekvátnou formáciou orbitálnych rovín. Aby sa táto formácia zachovala, poruchy orbitálnych rovín sa musia v dôsledku (2.16) objavovať v zhode. Pretože pásy pokrytia začínajú rednúť v blízkosti rovníka, dostatečný počet pásov musí byť umiestnený tak, aby nebola ponechaná žiadna medzera medzi nimi v blízkosti rovníka. Poznamenajme, že nevyhnutný minimálny odstup medzi susednými pásmi závisí od toho, či sú pásy idúce súbežne (väčší odstup), alebo oproti sebe (užší odstup), kvôli nerovnakej šírke pásov pokrytia.



Obr. 2.7 Súbežné (a,b) a protibežné (b,c) pásy pokrytia

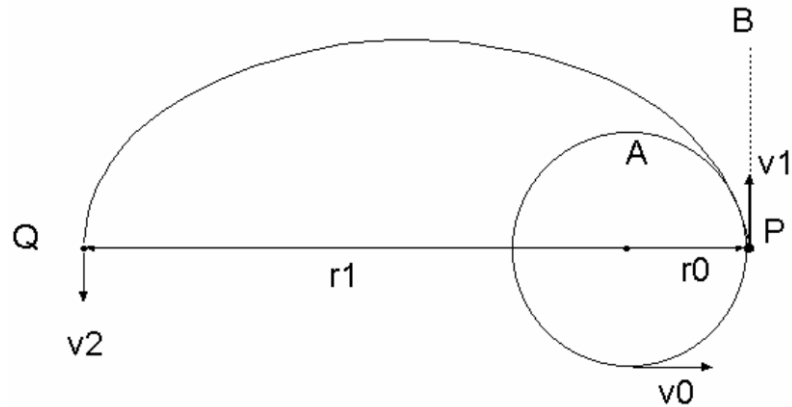
Výber výšky satelitu vyžaduje dokonalé zváženie. Nižšie výšky môžu byť výhodné, kvôli menším stratám šírenia a kvôli menšiemu časovému oneskoreniu. Ich nevýhodou je, že ich spôsobujú drastické pribúdanie satelitov kvôli menšiemu rozmeru kruhu pokrytia. Ak je výška satelitu menšia než 1,000 km a blíži sa k 500 km, efekt odporu vzduchu bude spôsobovať ťažkosti v orbitálnej údržbe. V dôsledku existencii van Allenovho radiačného pásma, je potrebné sa vyhnúť výškovým zónam od 1,500 do 5,000 km a od 13,000 do 20,000 km. Na to aby sa vymyslela formácia vyhovujúca týmto stavom je potrebné veľmi veľa skúšania a omylov, sú potrebné skúsenosti a fantázia. Avšak, nezáleží na tom aká komplikovaná viacnásobná formáciu satelitov sa môže ukázať, jej fyzikálny princíp nikdy nepôjde mimo dosahu (2.10) a (2.16).

2.3 Eliptická obežná dráha

2.3.1 Orbitálny tvar

Satelit na kruhovej obežnej dráhe podstúpi obiehanie na stálej výške a stálej rýchlosti, v dôsledku toho poskytuje komunikačné služby rovnakým spôsobom pozdĺž jeho obežnej dráhy. Naopak, satelit na eliptickej obežnej dráhe môže počas jedného drasticky meniť svoju výšku a rýchlosť. Takýto dynamizmus môže byť užitočný na vývoj rozšírenej komunikačnej služby pre konkrétne územie. V tejto časti, sa budeme venovať dynamike tejto potenciálne užitočnej dráhy, použitím základných rovníc, ktoré boli vytvorené pre kruhové dráhy.

Na začiatok, predpokladáme že máme satelit na kruhovej obežnej dráhe A s polomerom r_0 a obežnou rýchlosťou v_0 (Obr. 2.8). Teraz si predstavíme, že rýchlosť satelitu sa okamžite zvýši



Obr. 2.8 Orbitálna zmena zvýšením rýchlosti

z hodnoty v_0 po v_1 v určitom bode P , potom aká by bola nová obežná dráha? Keď v_1 je veľmi veľké, satelit odletí preč pozdĺž čiar B ako keby nebola žiadna Zem. Na druhej strane, keď $v_1 = v_0$, satelit jednoducho zostane v pôvodnej dráhe. Takže pre malé veľkosti udelenej rýchlosti v_1 , nová dráha bude niečo medzi A a B , viac podobná C s konečným maximálnym polomerom r_1 . Predtým ako si ukážeme, že C je eliptická obežná dráha, vyskúšajme si aké veľké zvýšenie rýchlosti dosiahne maximálny polomer novej obežnej dráhy.

Spomedzi základných rovníc (2.8) a (2.9) sústavy rovníc využijeme najprv rovnicu (2.9). Jej ľavá strana vynásobená r dáva $2r\dot{r}\dot{\theta} + r^2\ddot{\theta}$, ktorá je zhodná s $d(r^2\dot{\theta})/dt$, takže dostaneme

$$d(r^2\dot{\theta})/dt = 0$$

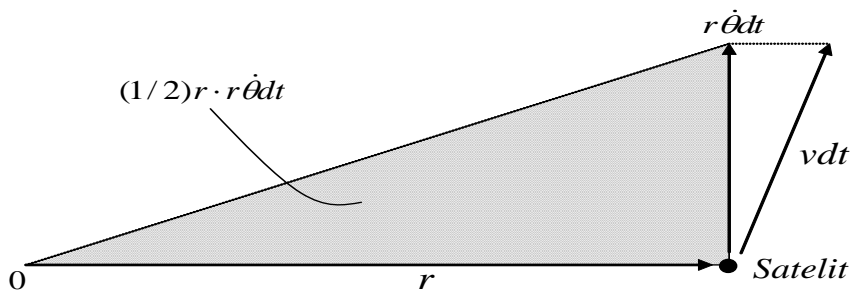
z ktorej môžeme napísať

$$r^2\dot{\theta} = \text{const} = p \quad (2.17)$$

Táto kvantita p má dôležitý fyzikálny význam. Vo vzorci (2.9) sa satelit pohybuje rýchlosťou v . Počas krátkeho časového intervalu dt sa satelit pohybuje až po $v dt$ a jeho zložka kolmá na vektor polomera satelitu je $r\dot{\theta} dt$. Potom počas tohoto dt , vektor polomeru vyznačuje plochu rovnú $(1/2)r \cdot r\dot{\theta} dt = (p/2)dt$. Takže $p/2$ označuje plochu opísanú vektorom polomera satelitu za jednotku času. Budeme to označovať *rýchlosť popisovania plochy* a vzťah (2.17) hovorí, že rýchlosť popisovania plochy satelitu by mala zostať konštantná počas jedného obehu po orbite.

Vráťme sa späť k obrázku (2.8). Rýchlosť popisovania plochy pre orbit C je vyjadrená v P ; to sa rovná $(1/2)r_0v_1$. Ak Q je bod maximálneho orbitálneho polomeru - aj keď ešte nevieme kde a kedy tento bod Q vznikne - rýchlosť v_2 v Q musí byť kolmá na polomer r_1 , takže rýchlosť popisovania plochy v bode Q je zapísaná ako $(1/2)r_1v_2$. Pretože tieto sa musia rovnať, dostaneme

$$r_0v_1 = r_1v_2 \quad (2.18)$$



Obr. 2.9 Oblasť prieniku

V ďalšom aplikujeme zákon zachovania energie. Vyhodnotením energie (kinetickej plus potenciálnej $v^2/2 - \mu/r$) v P a v Q a ich porovnaním dostaneme

$$\frac{v_1^2}{2} - \frac{\mu}{r_0} = \frac{v_2^2}{2} - \frac{\mu}{r_1} \quad (2.19)$$

Vyriešením (2.18) a (2.19) pre r_1 a v_2 dostaneme

$$r_1 = \frac{r_0}{2(v_0/v_1)^2 - 1} \quad (2.20)$$

$$v_2 = v_1[2(v_0/v_1)^2 - 1] \quad (2.21)$$

Ako sa udelená rýchlosť v_1 blíži $\sqrt{2}v_0$, maximálny polomer r_1 z rovnice (2.20) ide do nekonečna, takže satelit odletí od Zeme. Ak v_1 je mierne pod touto *únikovou rýchlosťou*, orbit C bude mať zväčšený ale konečný maximálny polomer a satelit zostane dlhšie blízko bodu maximálneho polomeru kvôli malému v_2 , čo vyplýva z rovnice (2.21). Jednoducho kvôli tomuto mechanizmu komunikačné služby používajúce eliptické obežné dráhy môžu mať predĺžený čas služby pri vyšších elevačných uhloch.

Úloha 2.3

Predstavme si kruhovú dráhu v 1000 kilometrovej výške. Nájdite rýchlosť, ktorú je potrebné dosiahnuť, aby sa zvýšil maximálny polomer na geostacionárny polomer 42164 km.

Najprv preskúmame presný tvar novej obežnej dráhy C . Použijme $\dot{\theta} = p/r^2$ z rovnice (2.17) a doplníme ju do rovnice (2.8) a dostaneme

$$\ddot{r} = -\frac{\mu}{r^2} + \frac{p^2}{r^3} \quad (2.22)$$

Vyriešenie tejto rovnice vyžaduje niektoré zmeny v technike. Zavedme si fiktívnu veličinu u prostredníctvom $r = 1/u$, pričom $u > 0$. Vyjadrime si \ddot{r} prostredníctvom u použitím rovnice (2.17), ako

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{1}{u^2} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{u^2} \frac{du}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -p \frac{du}{d\theta}$$

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -p \frac{d^2u}{d\theta^2} \frac{d\theta}{dt} = -p^2 u^2 \frac{d^2u}{d\theta^2}$$

Potom sa rovnica (2.22) prepíše ako

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{\mu}{p^2} \quad (2.23)$$

Teda posun u oproti θ predstavuje harmonickú osciláciu, čo môže byť riešené ako

$$u = \frac{\mu}{p^2} + q \cos(\theta + \omega)$$

s ľubovoľnými konštantami q a ω . Môžeme predpokladať, že $q > 0$ je správnym zápisom ω .

Potom

$$0 \leq q \leq \mu/p^2 \quad (2.24)$$

musí byť splnená táto podmienka, aby platilo, že $u > 0$. Vracajúc sa späť od u k r je potom tvar obežnej dráhy opísaný nasledovne

$$r = \frac{p^2 / \mu}{1 + (p^2 / \mu)q \cos(\theta + \omega)} \quad (2.25)$$

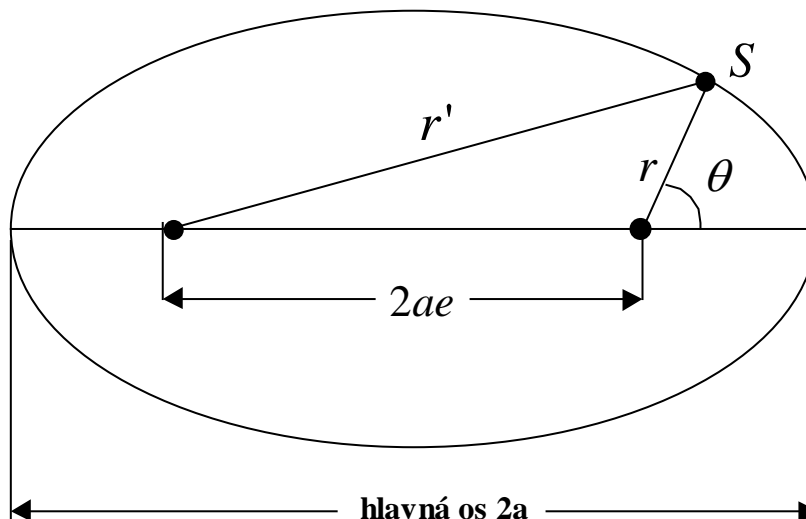
Dokážme, že z toho vznikne elipsa. Ak satelit S opíše elipsu ako ukazuje obrázok 2.10, S sa musí pohybovať tak, aby suma vzdialeností z S do dvoch ohniskových bodov zostala konštantná, ako

$$r + r' = 2a \quad (2.26)$$

kde $2a$ je hlavná os elipsy a ohniskové body sú navzájom oddelené prostredníctvom $2ae$. Nechajme $r' = 2a - r$ z rovnice (2.26) a dosadíme to do trigonometrického vzťahu

$$(r')^2 = r^2 + (2ae)^2 + 2r(2ae) \cos \theta$$

potom dostaneme



Obr. 2.10 Definícia elipsy; $r + r' = 2a$.

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta} \quad (2.27)$$

aby sme vyjadrili elipsu s jedným z dvoch ohniskových bodov v počiatku. Táto rovnica je identická s rovnicou (2.25), keď necháme ω definovať orientáciu hlavnej osi a ak dáme

$$e = (p^2 / \mu)q \quad (2.28)$$

a

$$a(1 - e^2) = p^2 / \mu \quad (2.29)$$

Všimnite si, že $0 \leq e < 1$ vo vzťahu (2.24). Polomer r z rovnice (2.27) dosahuje minimum a maximum v

$$r_{\min} = a(1 - e), r_{\max} = a(1 + e) \quad (2.30)$$

pre $\vartheta = 0$ (perigeum) a pre $\vartheta = \pi$ (apogeum), pre každé zvlášť. Takže parameter e ukazuje do akej miery sa tvar dráhy odlišuje od kružnice, zatiaľ čo $a = (r_{\min} + r_{\max})/2$ vyjadruje veľkosť obežnej dráhy. Teda a a e , tiež nazývané *a-vedľajšia* os a *e-excentricita* definujú veľkosť a tvar eliptickej dráhy. Parameter ω sa nazýva *argument perigea* a definuje orientáciu perigea normálne meranú od vzostupného uzla. Teda eliptická dráha definovaná prostredníctvom a , e a ω sa bude nachádzať vo svojej orbitálnej rovine napr. ako ukazuje obr. 2.11, kde orbitálna rovina sa pretína s rovinou rovníka na čiare spájajúcej vzostupné - zostupné uzly. Orientácia orbitálnej roviny je definovaná opäť prostredníctvom i a Ω rovnakým spôsobom ako pre kruhovú dráhu. Takže máme parametre a, e, i, Ω a ω špecifikujúce veľkosť, tvar a orientáciu eliptickej dráhy v inerciálnom priestore.

Úloha 2.4

Dokážte na základe hore uvedenej diskusie, že eliptická obežná dráha sa redukuje na kruhovú obežnú dráhu v prípade, že $e=0$.

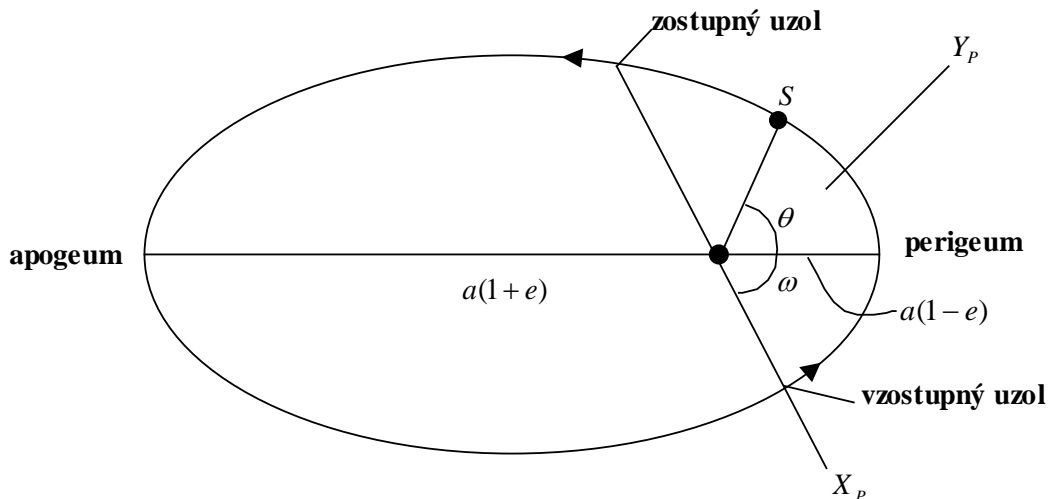
2.3.2 Pozícia satelitu ako funkcia času

Napriek tomu, že sme definovali presný tvar obežnej dráhy stále nepoznáme pohyb satelitu na obežnej dráhe ako funkciu času. Je to preto, že časový argument t zmizol z rovnice (2.23) zatiaľ čo sme riešili rovnice. Akým spôsobom by sme mohli spoznať pohyb satelitu?

Najprv nájdeme orbitálnu periódu, čo nie je zložité. Elipsa špecifikovaná prostredníctvom a a e má plochu

$$A = \pi a^2 \sqrt{1 - e^2}$$

Z rovnice (2.29) rýchlosť popisovania plochy satelitu je



Obr. 2.11 Eliptická obežná dráha vo svojej orbitálnej rovine.

$$p/2 = \sqrt{\mu a(1 - e^2)} / 2$$

Orbitálna perióda, čo znamená čas potrebný na opísanie celej eliptickej plochy je potom

$$P = A / (p/2) = 2\pi \sqrt{a^3 / \mu} \quad (2.31)$$

Porovnaním (2.31) s rovnicou (2.12) je zrejmé, že vedľajšia os a , určuje orbitálnu periódu rovnakým spôsobom ako ju určoval polomer r pri kruhovej dráhe.

Teraz zistíme vzťah medzi pozíciou satelitu a časom. Na obr. 2.11 uhol ϑ ukazuje pohyb satelitu pri obehu po orbite, meraný od perigea - tento uhol má zvláštne meno a to *skutočná anomália*. Chceme vyjadriť skutočnú anomáliu ϑ ako funkciu času t . Štandardný postup na to je podľa väčšiny učebníc nasledovný: Najprv konvertujeme t do fiktívnej veličiny m , ktorá sa nazýva *neskutočná anomália*. Neskutočná anomália m sa pohybuje od 0 po 2π lineárne v čase po tom, čo perigeum prejde cez orbitálnu periódu. Z toho m hľadá ďalšiu fiktívnu veličinu E nazývanú *excentrická anomália* pomocou rovnice

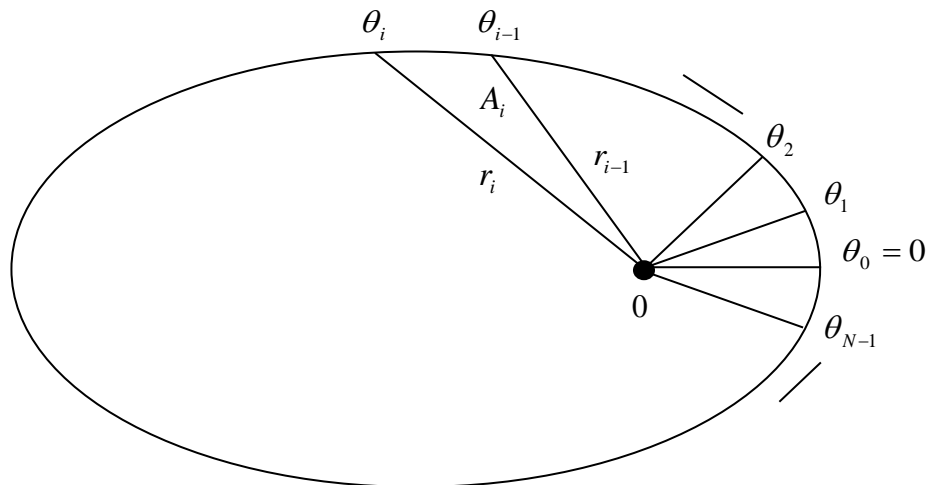
$$m = E - e \sin E$$

Táto rovnica známa ako Keplerova rovnica nemôže byť riešená analyticky ak $e \neq 0$, teda na jej riešenie musia byť použité numerické metódy. Potom z vyriešeného E niektoré trigonometrické operácie dávajú ϑ a tým udávajú pevný vzťah medzi t a ϑ . Samotný postup môžeme nájsť napr. v [1] alebo [2].

Program pre obe vyššie spomínané štandardné procedúry bude zaberat' ak sa vytlačí nie viac ako jednu stranu. To by však priťahovalo len málo čitateľov tohto učebného textu. Keďže náš záujem sa týka predovšetkým koncepčného návrhu orbitálnych systémov, privítali by sme radšej zrozumiteľnejšiu a ľahšie aplikovateľnejšiu procedúru pre nahradenie tejto obtiažnej a zdĺhavej procedúry. Takže, aby sa splnila táto požiadavka, zjednodušená procedúra bude predstavená n nasledujúcom odstavci.

Máme danú dráhu so špecifikovaným a a e . Odvodme si vzťah $\vartheta(t)$ priamo zo zákona zachovania rýchlosti popisovania plochy. Uvažujme podľa obr. 2.12 vzorky satelitných pozícií (r_i, ϑ_i) pre $i=0,1,\dots,N$ pri jednom, kde hodnoty ϑ_i sú rovnako rozdelené v skutočnej anomálii, takže $\vartheta_i = i\vartheta$ z $\nabla\vartheta=2\pi/N$. Čiastkový segment elipsy medzi $\vartheta = \vartheta_{i-1}$ a $\vartheta = \vartheta_i$ má plochu, ktorá sa približuje k

$$A_i = (1/2)r_{i-1}r_i\Delta\theta$$



Obr. 2.12 Hľadanie závislosti ϑ - t .

kde hodnoty r sú počítané z rovnice (2.27). Sčítajme všetky čiastkové plochy, aby sme dostali celkovú plochu

$$A_T = \sum_{i=1}^N A_i$$

z čoho vypočítame rýchlosť popisovania plochy

$$(p/2) = A_T / P$$

s použitím orbitálnej periódy zo vzťahu (2.31). Potom čas potrebný na to, aby satelit prešiel z ϑ_{i-1} do ϑ_i je

$$t_{i-1,i} = A_i / (p/2) = (A_i / A_T) P$$

Takže, keď satelit prejde cez perigeum v $t=t_p$, čas t_i v bode prechodu $\vartheta = \vartheta_i$ bude

$$t_i = \sum_{k=1}^i t_{k-1,k} + t_p = P \sum_{k=1}^i A_k / A_T + t_p$$

Teda rozpis pre jeden orbitálny obch ziskame ako (t_i, ϑ_i) , $i=1,2,\dots,N$. Keď satelit ide do ďalšieho obehu, čas t_i je samozrejme nahradený (t_i+P) . Pre ľubovoľne udaný čas bude pozícia satelitu interpolovaná z rozpisu. Kódovanie pre náš postup je dostatočne jednoduché, pretože nejde o nič viac ako o sčítanie a normalizovanie polôh A_i . Všimnite si však, že presnosť nášho rozpisu závisí od počtu vzorkovacích bodov N a excentricity e . Tabuľka 2.1 vyhodnocuje chybu rozpisu, kde hodnoty ϑ_i boli skontrolované oproti rigoróznym hodnotám v t_s . Pre dané e musí byť správne určené N , aby bola splnená požadovaná presnosť.

Náš časový rozpis má priame uplatnenie v prípade, keď chceme vidieť pohyb satelitu na monitore počítača. Zobrazí sa jedna pozícia satelitu pre $\vartheta = \vartheta_{i-1}$. Pridelí sa čas čakania pre $t_{i-1,i}$ a potom sa zobrazí ďalšia pozícia pre $\vartheta = \vartheta_i$ atď. Satelit potom ukazuje na obrazovke fyzikálne presný orbitálny pohyb.

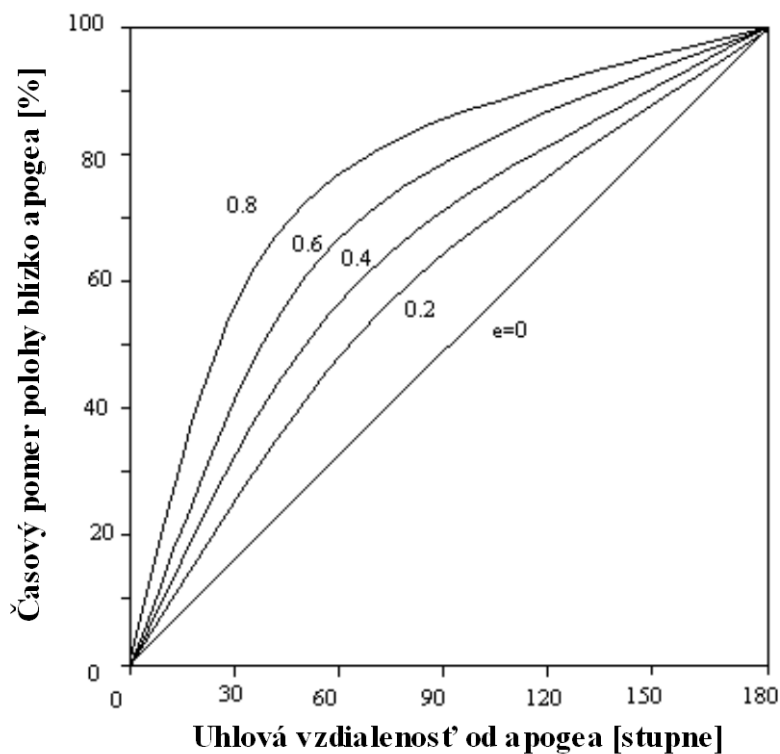
V diskusii k obr. 2.8 bolo kvalitatívne vysvetlené, že satelit na eliptickej dráhe by mal zostať dlhšie v blízkosti oblasti apogea. To môže byť teraz analyzované prostredníctvom nášho časového rozpisu. V tabuľke nájdeme dĺžku času, podľa ktorej spadá skutočná anomália do $\pm\vartheta$ apogea. Toto časové obdobie je potom vyhodnotené vo vzťahu k jednej orbitálnej perióde a jeho výsledok vidieť na obr. 2.13. Zvyšovanie excentricity tak v skutočnosti vytvára takmer apogeálnu koncentráciu času zotrvania. Náš časový rozpis je zvlášť vhodný pre tento druh analýzy, pretože vzorky ϑ_i sú rovnomerne rozložené.

Teraz, keď sme presne zistili orbitálny pohyb, bola naša predchádzajúca diskusia s obr. 2.8 zbytočná? Určite nie. To, čo sme prejednali prostredníctvom obr. 2.8 nám poskytuje jasnú predstavu o tom, že každá eliptická dráha pochádza zo svojej pôvodnej „parkovacej“ kruhovej dráhy prostredníctvom zvýšenia rýchlosti a táto predstava nám pomáha porozumieť pohybu

satelitu v blízkosti perigea. Mnoho kníh a materiálov o orbitálnej mechanike ukazuje obrázky eliptických orbitov a nezriedka sa tieto obrázky ukážu pri bližšom skúmaní ako nesprávne v tom, že minimálny polomer sa v skutočnosti nevyskytuje v perigeu.

Tab 2.1 Priemerný časový rozpis odchýliek (milistupne)

Testované body N	Excentricita e			
	0,5	0,6	0,7	0,8
200	6,5	9,2	14	22
400	1,6	2,3	3,4	5,6
600	0,7	1,0	1,5	2,5
800	0,4	0,6	0,8	1,4



Obr. 2.13 Časové sústredenie blízkeho apogea

Majúc na pamäti Obr. 2.8 a to, že orbitálna elipsa oskuluje pri jej perigeu k svojej pôvodnej kruhovej polohe, môžeme automaticky nakresliť správnu eliptickú dráhu, a tým teda správne zobrazíť pohyb satelitu blízko perigea.

Na konci tejto časti nám pomôže poznámka o častiach orbity. Veľmi rýchlo môžeme získať informácie o piatich parametroch špecifikujúcich orbit : a, e, i, Ω a ω , aj keď by ich mohlo byť 6. V mnohých častiach orbitálnych operácii je šiestym parametrom stredná anomália m ,

ktorá je jednoducho historickým dôsledkom.. Špecifikovanie strednej anomálie je ekvivalentné stanoveniu času, kedy satelit prekročil, alebo kedy prekročí perigeum. Dalej bude vhodné definovať orbitálne parametre ako: a, e, i, Ω, ω a t_p , kde t_p je čas prechodu perigeom.

2.3.3 Rušenie

Pôsobenie Zeme je častou príčinou rušenia na eliptických dráhach. Ich analýza je v princípe rovnaká ako pri kruhových obežných dráhach. Počas krátkeho časového úseku dt spôsobí rušiaci sila f_p určitú zmenu prvku obežnej dráhy napríklad:

$$d\Omega = \alpha f_p dt$$

kde α je koeficient citlivosti.

Argument času t je nahradený pravdepodobnostnou odchýlkou θ , potom integrál cez jednu obežnú periódu bude:

$$\Delta\Omega = \int_0^{2\pi} \alpha(\theta) f_p(\theta) \frac{r}{v} d\theta$$

Rušiaci sila musí byť vyjadrená v troch zložkách (t.j. r, θ a out-of-plane), pričom každá má svoj vlastný koeficient citlivosti a integrály týchto troch zložiek sú sčítané. Takáto procedúra pre eliptické obežné dráhy je ťažkopádna, takže si ukážeme len výsledky. Rušenie sa vo výsledku javí nasledovne:

$$\Delta\Omega = -3\pi J_2 \frac{r_E^2}{a^2(1-e^2)^2} \cos i$$

$$\Delta\omega = 3\pi J_2 \frac{r_E^2}{a^2(1-e^2)^2} \left(2 - \frac{5}{2} \sin^2 i\right)$$

v radiánoch na obežnú periódu. Teda dlhodobé rušenie sa objaví len v uzle a perigeu, tvar a veľkosť obežnej dráhy sú nemenné. Pohyb perigea bude spôsobovať ťažkosti pri komunikačných službách. Našťastie predsa len sa toto rušenie perigea stráca pri konkrétnom sklone 63.4° . Poznamenávame však, že konkrétna inklinácia nezávisí od veľkosti, hmotnosti

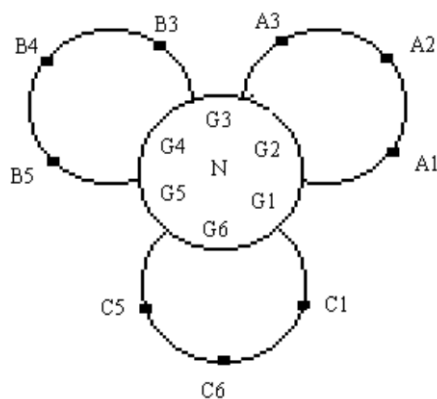
a sploštenosti Zeme. Ak v budúcnosti objavíme neznámu planétu a táto planéta bude mať satelit na eliptickej obežnej dráhe s inklináciou 63.4° , potom najpravdepodobnejšie sa bude jednať o umelý satelit poskytujúci regionálne služby na povrchu planéty.

2.3.4 Viacnásobná satelitná formácia

Bez ohľadu na to ako sa môže predĺžiť čas v blízkosti apogea, jediný satelit nemôže na eliptickej obežnej dráhe nemôže poskytovať spojitú komunikačnú službu pre pozemného používateľa. poskytovať nepretržité komunikačné služby užívateľovi na Zemi. Podobne ako pri kruhovej obežnej dráhe, vzniká tu nutnosť využívať viacerých satelitov na vytvorenie orbitálnej formácie, a ako navrhnuť takúto formáciu sa dozvieme z nasledujúceho príkladu.

Výber konkrétnej inklinácie 63.4° tak ako vytvorenie nemennej orientácie apogea – perigea je bezpodmienečne nutný pre návrh formácie, za predpokladu, že nenastavíme $i = 0$ a nebudeme tak zabezpečovať obsluhu rovníkovej oblasti. To ale neznamená, že apogeum musí prísť nad zemepisnú dĺžku 63.4° . Obežná dráha s pevnou veľkosťou, tvarom a pevnou inklináciou $i = 63.4^\circ$ môže stále meniť svoju geometriu pomocou zmeny svojej orientácie perigea ω . Nastavenie ω na 90° , alebo 270° prinesie zemepisnú šírku apogea na $\pm 63.4^\circ$, kým nastavenie ω na 0° alebo 270° prinesie apogeum na rovník. Takže zemepisná šírka apogea sa môže meniť v rozsahu $\pm 63.4^\circ$.

Počet obežných dráh s rovnakými a, e, i a ω sú potom usporiadané podľa rozdielnych hodnôt Ω - charakteristický príklad je na obrázku 2.14. Na tomto príklade sú tri satelity A, B a C, ktoré poskytujú nepretržité komunikačné služby v pozemnej oblasti, ktorú reprezentuje bod G. (Pripojené čísla tu určujú pohyby satelitov a pozemnej oblasti). Keďže G sa pohybuje od G1 ku G3, kvôli zemskej rotácii, satelit A vykoná pohyb od A1 do A3 cez apogeum A2.



Obr. 2.14 Formácia troch satelitov, zobrazenie v polárnych súradniciach

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Správnym výberom orientácie perigea ω , apogeum A2 bude nad G2, takže používatelia okolo G sa budú tešiť zo satelitu v blízkosti apogea. Keď satelit A dosiahne pozíciu A3 odovzdá komunikačné služby satelitu B, ktorý práve dosiahol pozíciu B3. Potom satelit B počas pohybu z B3 do B5 bude poskytovať službu pre G, ktorý sa pohybuje od G3 ku G5. Takto to bude pokračovať bez prerušenia s každým satelitom striedavo každých 8 hodín.

K uskutočneniu takéhoto systému je potrebné splniť niekoľko podmienok. Vždy, keď G prechádza na G2 satelit A musí vstúpiť do apogea A2. Takže perióda obehu by mala byť $P =$ jeden deň, 1/2 dňa, 1/3 dňa a tak ďalej (deň sa tu uvažuje ako hviezdny (sidereal) deň, ktorý trvá 23h 56m 4s). Podľa (2.31) musia byť vedľajšie osi $a_1 = 42.164\text{ km}$, $a_2 = 26.562\text{ km}$, $a_3 = 20.270\text{ km}$, atď. Nech h_p a h_a sú výšky perigea a apogea. Znížením perigea dosiahneme zvýšenie excentricity, kým nízke perigeum je nepraktické v dôsledku prítomnosti atmosferického unášania. Predpokladajme teda $h_p = 1000\text{ km}$. Potom zo vzťahu

$$a = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2} = \frac{h_p + h_a}{2} + r_E$$

vypočítame výšku apogea $h_a = 70572\text{ km}$ (pre a_1), 39367 km (pre a_2), 26781 km (pre a_3), atď. Prvá je príliš veľká, a tak vyberieme $h_a = 39367\text{ km}$, čo je rozumnejšie. Potom podľa (2.30) dostaneme

$$e = (r_{\max} - r_{\min}) / (2a) = (h_a - h_p) / (2a) = 0.722$$

a perióda obehu je 11h 58 m. Čas počas, ktorého satelit opíše oblúk z A1 do A3 na operačnej obežnej dráhe je 8h, čo je 67% jednej periódy. Následkom koncentrácie v blízkosti apogea ako ukazuje obr.2.13 operačná obežná dráha opisuje falošný oblúk medzi $\pm 37^\circ$ od apogea a objaví sa operačný oblúk na obzore G (ako odhadnúť aktuálnu eleváciu satelitu ukážeme na konci tejto kapitoly). Avšak v blízkosti bodov prepínania A3 a B3 a tiež ďalších prepínacích bodov sa bude elevácia satelitu nevyhnutelne zmenšovať. To sa zmenší, ak zemepisná šírka apogea a zemepisná šírka služobnej oblasti sú dostatočne veľké. Takže tento druh orbitálnej formácie je predovšetkým vhodný pre služobné oblasti s veľkými zemepisnými šírkami. Eliptické obežné dráhy sa tiež niekedy označujú ako Molniya orbity.

Ak je zemepisná šírka apogea vybraná tak, že jej maximum je 63.4° , s $\omega = 90^\circ$ alebo 270° , tak takáto formácia môže priniesť špeciálne výhody. Pri nastavení excentricity okolo $e=0.722$, bude prepínanie satelitných bodov A3 a B3 zhodné so všetkými ďalšími. To znamená že smer čiarového zamerania satelitov a ich rozpätie je v momente prepnutia satelitov spojité, čo umožňuje dobrú údržbu komunikačných liniek.

Pokiaľ hodnoty ω boli v predchádzajúcej časti všetky identické, ďalšie druhy formácií varovania s nerovnakými hodnotami ω môžu poskytnúť širšie pokrytie.

2.4 Geostacionárne obežné dráhy

2.4.1 Stabilita komunikačných liniek

Môžeme pozorovať že stabilná komunikačná linka nemôže byť poskytovaná satelitom na kruhovej a eliptickej dráhe pretože linky musia byť prepínané pravidelne z jedného satelitu na ďalší. Poskytnutie stabilnej linky je osobitným kladom geostacionárnych satelitov, kvôli ich fixnej polohe k Zemi. Satelity nemôžu byť absolútne stacionárne – poruchy spôsobujú postupnú stratu počiatočných stacionárnych podmienok, teda spôsobujú odchylenie sa satelitu z obežnej dráhy. Preto satelity potrebujú z času na čas korekcie orbity, aby sa udržala ich pôvodná poloha, čo sa nazýva stationkeeping. Obvyklou praxou pri komunikačných satelitoch je udržať zemepisnú šírku a zemepisnú dĺžku v limite do 0.1° od jeho nominálnej hodnoty. Pohyb satelitu v tomto intervale je zanedbateľný ak má používateľ mobilnú anténu so širokou smerovosťou je sledovaný z mobilnej antény použijme prijímač mobilnú užívateľskú anténu so širokou smerovosťou, hoci bude zaujímavé ak satelit spôsobí zemenu vzdialenosti, ktorá ovplyvní prenos signálu (predovšetkým digitálneho) Skúmanie stability vzdialenosti si vyžaduje vhodné modelovanie pohybu satelitu, čo bude obsahom nasledujúcej časti.

2.4.2 Pohyb na blízko geostacionárnych dráhach

Ak máme ideálny geostacionárny satelit, jeho obežná dráha musí byť kruhová, rovníková a synchronná s periódou obehu Zeme. Táto perióda je 23h 56m 4s, teda polomer obežnej dráhy podľa (2.12) bude $r_0=42\ 164.2$ km. Považujme takýto ideálny satelit, ako označenie stabilnej nominálnej polohy a uvažujme pohyb našich aktuálnych satelitov okolo tejto nominálnej polohy v uzavretej slučke, ako ukazuje obrázok 2.15. Pozícia nášho satelitu je potom meraná relatívne k jeho nominálnej pozícii našich satelitov sú potom relatívne úmerné nominálnej pozícii, radiálne v R a tangenciálne v L. V polárnom súradnicovom systéme (Earth-centered polar coordinates) je nominálna pozícia určená

$$r = r_0, \quad \theta = \Psi_0 t$$

kde $\psi_0 = 7.292115 \times 10^{-5}$ (rad/sek) je rýchlosť otáčania Zeme s $r_0 \psi_0^2 = \mu / r_0^2$. Aktuálny satelit je na pozícii, pre malé R a L ako

$$r = r_0 + R, \theta = \Psi_0 t + L / r_0 \quad (2.32)$$

Teraz uvažujme pohyb satelitu (r, θ) pridržajúc sa dvoch rovníc (2.8) a (2.9). Najskôr dosadíme (2.32) do (2.8) a dostaneme

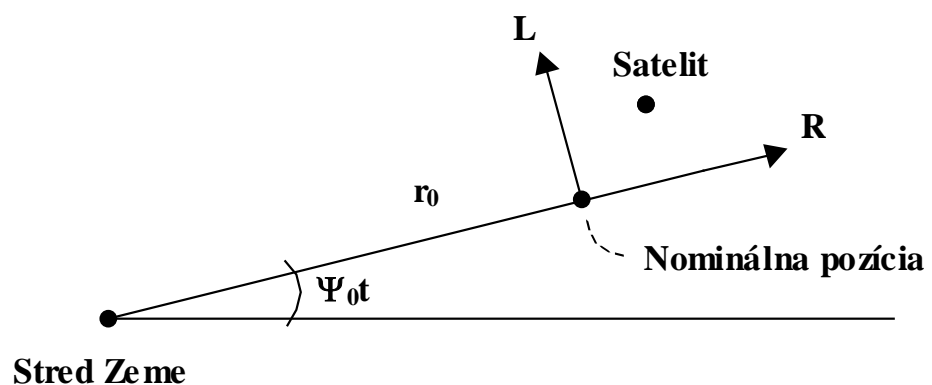
$$\ddot{R} - (r_0 + R)(\Psi_0 + \dot{L}/r_0)^2 = -\mu/(r_0 + R)^2 \quad (2.33)$$

Predpokladajme, že časové derivácie R a L sú tiež malé; potom vyššie rády malých členov takých ako $R \dot{L}$ sú zanedbateľné a pravú stranu môžeme aproximovať ako

$$-\mu/(r_0 + R)^2 \approx -\mu/r_0^2 + 2(\mu/r_0^3)R = -\mu/r_0^2 + 2\Psi_0^2 R$$

teda máme

$$\ddot{R} - 2\Psi_0 \dot{L} - 3\Psi_0^2 R = 0 \quad (2.34)$$



Obr. 2.15 Relatívna poloha satelitu k jeho nominálnej polohe

Takým istým spôsobom upravíme aj (2.9) substitúciou (2.32) a dostaneme

$$\ddot{L} + 2\Psi_0\dot{R} = 0 \quad (2.35)$$

Takéto výsledky platia pre pohyb v rovine rovníka. V skutočnosti sa však satelit môže premiestniť mimo tejto roviny a pohyb je potom meraný cez os Z, ktorá je kolmá na rovinu (R,L), ako ilustruje obrázok 2.16. Pravá strana rovnice (2.33) sa musí zmeniť na $-\mu / [(r_0 + R)^2 + Z^2]$, ale Z je malé v porovnaní s r_0 a tak Z^2 môžeme zanedbať. Preto (2.34) a (2.35) nepotrebujú zmenu tvaru ak uvažíme pohyb v osi Z. Zemská gravitačná sila má Z zložky v tvare

$$-\frac{\mu}{(r_0 + R)^2 + Z^2} \frac{Z}{\sqrt{(r_0 + R)^2 + Z^2}} \approx -(\mu / r_0^3)Z = -\Psi_0^2 Z$$

takže pohyb so Z – zložkami bude

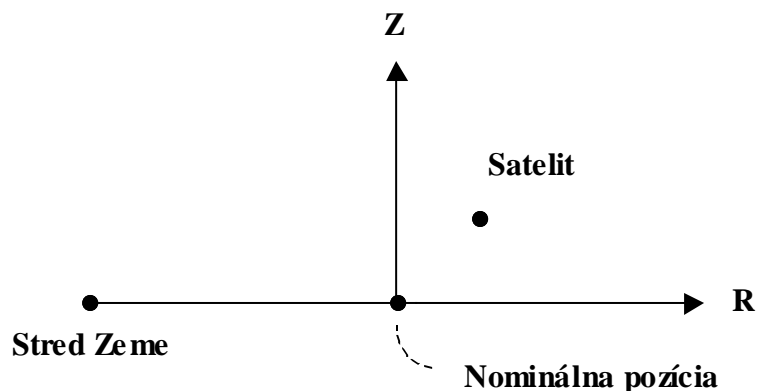
$$\ddot{Z} + \Psi_0^2 Z = 0 \quad (2.36)$$

Pohyb satelitu v častiach (R,L,Z) je daný rovnicami (2.34 – 36) ako problem dvoch telies. (two-body problem) Ak uvažíme vynútené rušenie v zložkách (R,L,Z) platia pre pohyb tieto rovnice. (Pôvodne boli tieto rovnice odvodené pre spojitú kontrolu a riadenie dvoch satelitov – vid' príklad 2.).

$$\ddot{R} - 2\Psi_0\dot{L} - 3\Psi_0^2 R = f_R \quad (2.37)$$

$$\ddot{L} + 2\Psi_0\dot{R} = f_L \quad (2.38)$$

$$\ddot{Z} + \Psi_0^2 Z = f_Z \quad (2.39)$$



Obr. 2.16 Mimorovinný pohyb

Teraz predpokladajme problém dvoch telies ; pohyb satelitu je potom riešený ako

$$R = -\frac{2}{3\Psi}D + E_x \cos \Psi_0 t + E_y \sin \Psi_0 t \quad (2.40)$$

$$L = L_0 + Dt - 2E_x \sin \Psi_0 t + 2E_y \cos \Psi_0 t \quad (2.41)$$

$$Z = I_x \cos \Psi_0 t + I_y \sin \Psi_0 t \quad (2.42)$$

kde L_0 , D , E_x , E_y , I_x , I_y sú konštanty špecifikujúce orbitálny pohyb nasledovne : L_0 a D určujú lineárny drift pohybu v L a tento pohyb vzniká, ak je polomer odchylený od synchrónneho polomera (2.40). E_x a E_y určujú eliptický pohyb v rovine (R,L) , vztiahnuté k malej excentricite orbity – vidíme ako polomer R osciluje (2.40) a porovnaním s (2.30), nájdem vzťah

$$\sqrt{E_x^2 + E_y^2} = r_0 e \quad (2.43)$$

I_x a I_y určuje sínusový pohyb pozdĺž Z čo korešponduje s malou inklináciou podľa vzťahu

$$\sqrt{I_x^2 + I_y^2} = r_0 i \quad (2.44)$$

Týchto šesť parametrov L_0 , D , E_x , E_y , I_x , I_y slúži ako orbitálne elementy pre geostacionárne satelity.

Úloha 2.5

Aká je výhoda použitia L_0 , D , E_x , E_y , I_x , I_y oproti použitiu Keplerových orbitálnych elementov pre určenie blízko geostacionárnych orbitov?

2.5 Pohyb udržiavaných satelitov

Geostacionárne satelity sú postihované rôznym rušením. Gravitačná sila Slnka a Mesiaca produkuje sínusoidnú silu f_Z (2.39), ktorá vyvoláva nárast amplitúdy oscilácií Z , čím sa zväčšuje inklinácia. Priečny rez zemským rovníkom je trochu deformovaný kruh; toto produkuje konštantnú silu f_L v (2.38) a táto sila potom zvyšuje akceleračný drift v L . Tlak slnečného žiarenia vytvára každodenné sínusoidálne sily f_R a f_L vo vzťahu (2.37) a (2.38), ktoré vyvolávajú nárast oscilačných amplitúd R a L a takto sa zväčšuje excentricita. V dôsledku toho, parametre orbity sa menia postupne s časom, takže sa satelit odchýli od jeho počiatočnej zavedenej nominálnej pozície. Za účelom zabránenia rušenia, impulzové sily f_L a f_Z sú z času na čas aplikované na satelit so správnym zabezpečením podmienky:

$$|L|, |Z| \leq B \quad (2.45)$$

kde

$$B = r_0 \sin 0,1 \text{ deg} = 73,6 \text{ km}$$

pre zachovanie štandardného uhla udržiavania $0,1$ stupňa. Za účelom zabezpečenia podmienky udržiavania stanice, pre kmitanie L vo vzťahu (2.41) musí platiť že $2 \sqrt{E_x^2 + E_y^2} < B$. Potom, pomocou vzťahu (2.43), $e < B / (2r_0) = 0,00087$ je potrebné pre zachovanie udržiavania $0,1$ stupňa. V praxi, musí byť udržiavaná excentricita omnoho menšia ako tá, ktorá by umožnila pre drift L pohyb spôsobený L_0 a D , zatiaľ čo inklinácia môže byť v rozsahu $0,1$ stupňa.

Ako realizovať skutočné udržiavanie stanice, je vysvetlené stručne v odkaze [3], alebo podrobne v [4]. Ďalej sa budeme venovať skúmaniu ako sa mení rozsah udržiavania satelitnej stanice s časom.

2.6 Rozsah rýchlosti a jej variácie

Uvažujeme používateľa U na zemi, ako to ilustruje obr. 2.17, ktorý sa nachádza v ofsetových uhloch α a β od centra Zeme, ako to vidieť z nominálnej polohy satelitu. Pri zmene polohy satelitu z jeho nominálnej polohy do bodu (R, L, Z), vzdialenosť satelitu v U sa bude odchyľovať od jeho nominálnej hodnoty ρ_0 na :

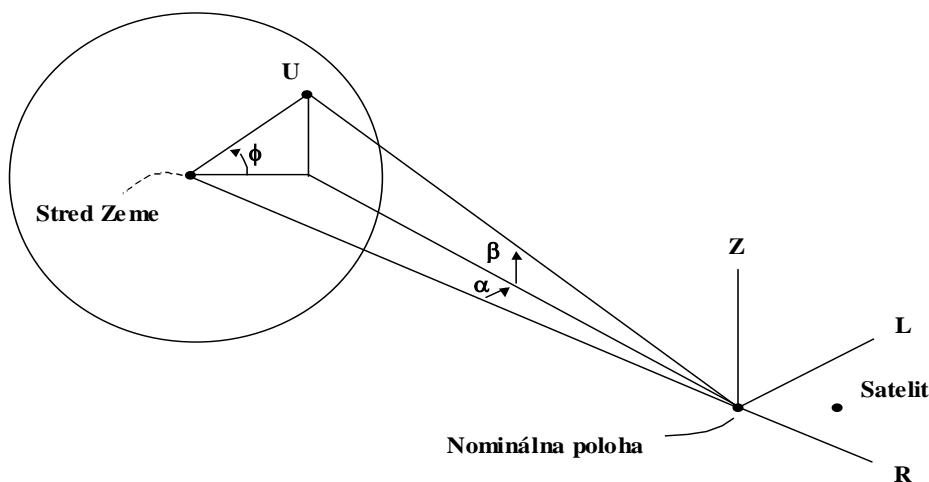
$$\rho = \rho_0 + c_R R + c_L L + c_Z Z$$

kde:

$$c_R = \cos \beta \cos \alpha, \quad c_L = -\cos \beta \sin \alpha, \quad c_Z = -\sin \beta$$

sú koeficienty citlivosti odchýlky vzdialenosti. Potom, rozsah rýchlosti je vyjadrený vzťahom:

$$\dot{\rho} = c_R \dot{R} + c_L \dot{L} + c_Z \dot{Z}$$



Obr. 2 17 Rozloženie satelit/používateľ. Uhly α a β sú merané pozdĺž a vertikálne vzhľadom na rovinu rovníka pre vyhľadanie používateľa U

a do tohto vzťahu dosadíme vzťahy (2.40 - 2.42). Po úprave vzťahov dostaneme:

$$\begin{aligned} \dot{\rho} = & c_L D + \sqrt{c_R^2 + 4c_L^2} \Psi_0 \sqrt{E_X^2 + E_Y^2} \sin(\Psi_0 t + \theta_1) \\ & + c_Z \Psi_0 \sqrt{I_X^2 + I_Y^2} \sin(\Psi_0 t + \theta_2) \end{aligned} \quad (2.46)$$

kde θ_1 závisí od E_x a E_y , θ_2 závisí od I_x a I_y . Hoci sa orbitálne parametre postupne menia rušením, môžu sa uvažovať počas dňa ako konštanty. Rozsah rýchlosti vyjadrený vzťahom (2.46) potom obsahuje jednu konštantu a dve sínusoidálne vzťahy. Budeme skúmať šírku špička – špička v závislosti od rozsahu rýchlosti; takže zanedbáme konštantu vzťahu. Pretože α a β sú obe z rozsahu $\pm 8,7$ stupňa, aproximujeme:

$$\sqrt{c_R^2 + 4c_L^2} \approx 1 \quad \text{a} \quad c_Z \approx r_E \sin \phi / r_0$$

kde r_E je polomer Zeme, ϕ je zemepisná šírka U. Po dosadení vzťahu (2.43) a (2.44) do vzťahu (2.46) dostaneme:

$$\dot{\rho} = e r_0 \Psi_0 \sin(\Psi_0 t + \theta_1) + i r_E \Psi_0 \sin \phi \sin(\Psi_0 t + \theta_2)$$

Vzťah medzi θ_1 a θ_2 je skrytý v politike udržiavania staníc, ktorá je produktom riadiaceho centra satelitu, takže nemôžeme vo všeobecnosti vedieť, či dva sínusoidálne vzťahy sa sčítajú, alebo sa navzájom zrušia; môžeme len odhadnúť možné minimum a maximum hodnôt $\dot{\rho}$ amplitúdy kmitania. Preto môžeme len dospieť k záveru, že amplitúda každodenných zmien rýchlosti oscilácii vzdialenosti v dôsledku pohybu satelitu je väčšia ako $\Psi_0 |e r_0 - i r_E \sin \phi|$ a menšia ako $\Psi_0 |e r_0 + i r_E \sin \phi|$.

Úloha 2.6

Predpokladajme: $e = 0,0001$, $i = 0,1$ stupňa a $\phi = 45$ stupňov, odhadujeme dennú amplitúdu rýchlosti zmien vzdialenosti. Ak sa používateľ pohybuje rýchlosťou v ľubovoľnom smerom, môže to spôsobiť rozsah rýchlosti až o $\pm v \cos \varepsilon$, kde ε je elevácia satelitu.

Takže vieme odpovedať na problém 2.6 : Ak sa používateľ pohybuje rýchlejšie ako je obvyklá rýchlosť pri chôdzi , potom sa nejedná o pohyb satelitu ale používateľa , čo bude špecifikovať stabilitu vzdialenosti satelitu - takýto stabilný je geostacionárny prenosový spoj.

2.7 Výpočet azimutu a elevácie

Zatiaľ, čo sme sa naučili najzákladnejšie pojmy orbitálnej dynamiky pre diskusiu mobilných komunikačných služieb, niektorých čitateľov by mohol zaujímať návrh obežnej dráhy. Nakoniec, ako sa dá prakticky vypočítať, vzdialenosť, azimut a elevácia satelitu. praktický výpočet rozsahu, azimutu a elevácie satelitu. Ukažeme si zjednodušený spôsob, ktorý predpokladá riešenie na základe problému dvoch telies a kompaktného algoritmu pre výpočet uhlov

Nech $(a, e, i, \Omega, \omega, t_p)$ sú prvky obežnej dráhy satelitu. t_p –čas prechodu perigeom. Čas je meraný od ľubovoľne zvoleného začiatku $t = 0$.

Najprv vypočítame periodu obežnej dráhy pomocou vzťahu:

$$P = 2\pi\sqrt{a^3/\mu} \quad [s]$$

kde $\mu = 398\,600.5 \text{ km}^3/\text{s}^2$. Ďalej si pripravíme skutočný časový rozvrh z (a, e) .

Potom pre každú vzorku (θ, t) časového rozvrhu sú aplikované nasledujúce kroky.

Krok 1

Lokalizujme polohu satelitu „v súradniciach orbitálnej roviny „ (X_p, Y_p) – (obr. 2.11)

Body osi X_p smerujú ku vzostupnému uzlu a os Y_p je kolmá na os X_p . Poloha satelitu je:

$$X_p = r \cos(\theta + \omega), \quad Y_p = r \sin(\theta + \omega)$$

kde:

$$r = a(1 - e^2) / (1 + e \cos \theta)$$

Krok 2

Konvertujeme (X_p, Y_p) na „súradnice rovníkového uzla“, (X', Y', Z') – (obr. 2.18). Os X' je totožná s osou X_p , zatiaľ čo (X', Y') - rovina rovníka a os Z' prechádza cez severný pól Zeme. Keď sa pozrieme na os X' , os Y_p je pod uhlom i vzhľadom na os Y' . Teda pre prevody platia vzťahy:

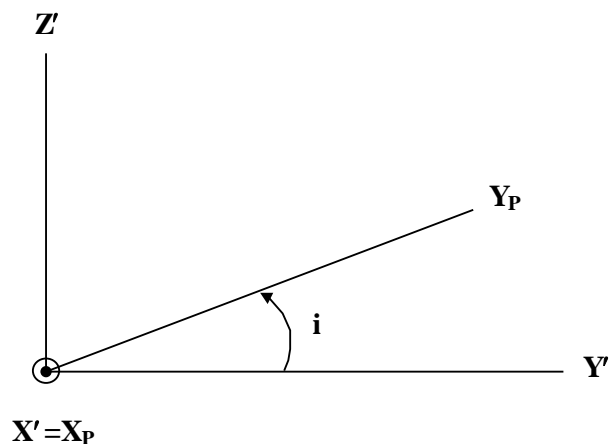
$$X' = X_p, \quad Y' = Y_p \cos i, \quad Z' = Y_p \sin i$$

Krok 3

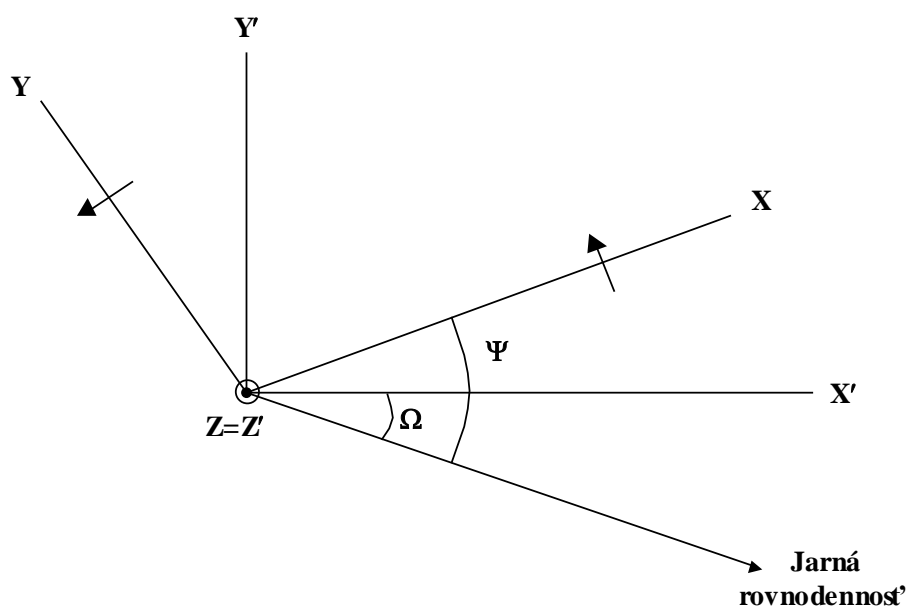
Konvertujeme (X', Y', Z') na pevné súradnice Zeme (X, Y, Z) – (obr. 2.19). Osi X a Y sú pevné vzhľadom na Zem, takže rovina (X, Y) je rovina rovníka. Os Z je totožná s osou Z' a rovina (X, Y) obsahuje Greenwichský poludník. Označme ψ ako rotačný uhol Zeme, ktorý je orientovaným uhlom osi X meraným od jarnej rovnodennosti. Tento uhol sa mení s časom, podľa vzťahu:

$$\psi = \Psi_0 t + \psi_0$$

kde $\Psi_0 = 7,292115 \cdot 10^{-5}$ [rad / sec] je rýchlosť otáčania Zeme. Konštanta ψ_0 , ktorá predstavuje uhol orientácie Zeme v $t=0$, môže byť zvolená ľubovoľne; je to parameter návrhu určujúci tvar orbity Zeme. Prevod sa realizuje nasledovne:



Obr. 2.18 Uzol - súradnice rovníka (X', Y', Z')



Obr. 2.19 Pevné súradnice Zeme (X, Y, Z)

$$X = X' \cos(\psi - \Omega) + Y' \sin(\psi - \Omega)$$

$$Y = -X' \sin(\psi - \Omega) + Y' \cos(\psi - \Omega)$$

$$Z = Z'$$

Ak je satelit stacionárny na zemepisnej dĺžke λ_s , potom zabudnime na všetko, čo sme doposiaľ tvrdili a jednoducho nastavme pozíciu satelitu na :

$$X = r_0 \cos \lambda_s, \quad Y = r_0 \sin \lambda_s, \quad Z = 0$$

kde: $r_0 = 42,164$ km je synchrónny polomer.

Krok 4

Predpokladajme, že používateľ na zemi je na zemepisnej šírke ϕ a dĺžke λ .
Vzdialenosť k satelitu na pozícii (X, Y, Z) je:

$$\rho = \sqrt{(X - r_E \cos \phi \cos \lambda)^2 + (Y - r_E \cos \phi \sin \lambda)^2 + (Z - r_E \sin \phi)^2} \quad (2.47)$$

kde $r_E = 6\,378$ km je polomer Zeme. Zem je uvažovaná ako guľa; táto aproximácia môže spôsobiť chybu vo vzdialenosti menšej ako niekoľko desiatok kilometrov a chyby azimutu a elevácie budú menšie ako 0,1 stupňa.

Krok 5

Výpočet azimutu a elevácie si normálne vyžaduje viac práce s konverziou súradnic, ale dá sa tomu vyhnúť nasledujúcim zjednodušeným postupom.

Ak uvažujeme, že (2.47) je definícia vzdialenosti a funkcia r_E, ϕ a λ , potom:

$$\rho = f(r_E, \phi, \lambda)$$

Uvažujme používateľov referenčný rámec: Východiskový bod je používateľ a tri osi smerujú na východ, sever a nahor. Pre každú referenčnú os, vypočítame kosínusový smer satelitu pomocou numerickej derivácie:

$$\text{východ : } l_E = \frac{f(r_E, \phi, \lambda - \Delta\lambda) - f(r_E, \phi, \lambda + \Delta\lambda)}{2r_E \Delta\lambda \cos \phi} \quad (2.48)$$

$$\text{sever : } l_N = \frac{f(r_E, \phi - \Delta\phi, \lambda) - f(r_E, \phi + \Delta\phi, \lambda)}{2r_E \Delta\phi} \quad (2.49)$$

$$\text{nahor : } l_U = \frac{f(r_E - \Delta r_E, \phi, \lambda) - f(r_E + \Delta r_E, \phi, \lambda)}{2\Delta r_E} \quad (2.50)$$

Čo tieto rovnice znamenajú, nám bude jasné z príkladu : Predpokladajme, že satelit je nad používateľom a použijeme vzťah (2.50). Posunutie užívateľa hore – dole o $\pm \Delta r_E$ bude znamenať zmenu rozsahu práve $\pm \Delta r_E$, potom horný smer kosínusu sa rovná 1, zatiaľ čo východný a severný smer kosínusov je nulový. Rozmery deliacich faktorov $r_E \Delta\lambda \cos \phi$, $r_E \Delta\phi$, Δr_E vo vzťahu (2.48 - 2.50) musia byť správne zvolené, obyčajne niekoľko sto metrov .

Krok 6

Keď sme takto zvolili smer kosínusov, vypočítame:

$$\text{elevácia} = \pi / 2 - \cos^{-1} l_U, \quad \text{azimut} = \tan^{-1}(x = l_N, y = l_E)$$

kde azimut je definovaný ako nula pre sever a $\pi / 2$ pre východ.

Táto prezentovaná procedúra by nemala byť aplikovaná pre dlhé výpočty mnohých orbitálnych obehov, pretože pri výpočte bolo zanedbané rušenie. Pre presnejšie orbitálne výpočty, ktoré berú do úvahy relevantné rušenia, je potrebné navštíviť Web stránku <http://www.crl.go.jp/ut/orbit>

kde návštevníci môžu vykonávať rôzne druhy výpočtov obežných dráh.

2.8 Doplnková literatúra

[1] Bate, R. R., D. D. Mueller, and J. E. White, Fundamentals of Astrodynamics, Chapter 4, New York: Dover, 1971.

[2] Prussing, J.E., and B.A. Conway, Orbital Mechanics, Chapter 2 and Chapter 8, New York, NY: Oxford, 1993.

[3] Agrawal, B. N., Design of Geosynchronous Spacecraft, Chapter 2, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1986.

[4] Soop, E. M., Handbook of Geostationary Orbits, Nowell, MA: Kluwer, 1994.

[5] Marchevský, S. - Podhradský, P. - Gamec, J. - Galajda, P. - Gamcová, M. - Pillár, S.: Trends in e-learning services delivery via current satellite systems, Acta Electrotechnica et Informatica Vol. 9, No. 1, 2009, pp. 12 – 19, ISSN 1335-8243

[6] Galajda, P. - Marchevský, S. - Gamec, J. - Gamcová, M. - Pillár, S.: Infrastructure for packet based e-learning services provided via satellite, Acta Electrotechnica et Informatica Vol. 9, No. 1, 2009, pp. 74 – 80, ISSN 1335-8243

[7] Marchevský, S. - Pillár, S.: Access Network Technologies, Satellite Access Networks, in: Dúha, J. - Kiczko, M. - Podhradský, P.- Róha, R.: Multimedia ICT Telecommunications, S. 167 – 178, Bratislava 2005

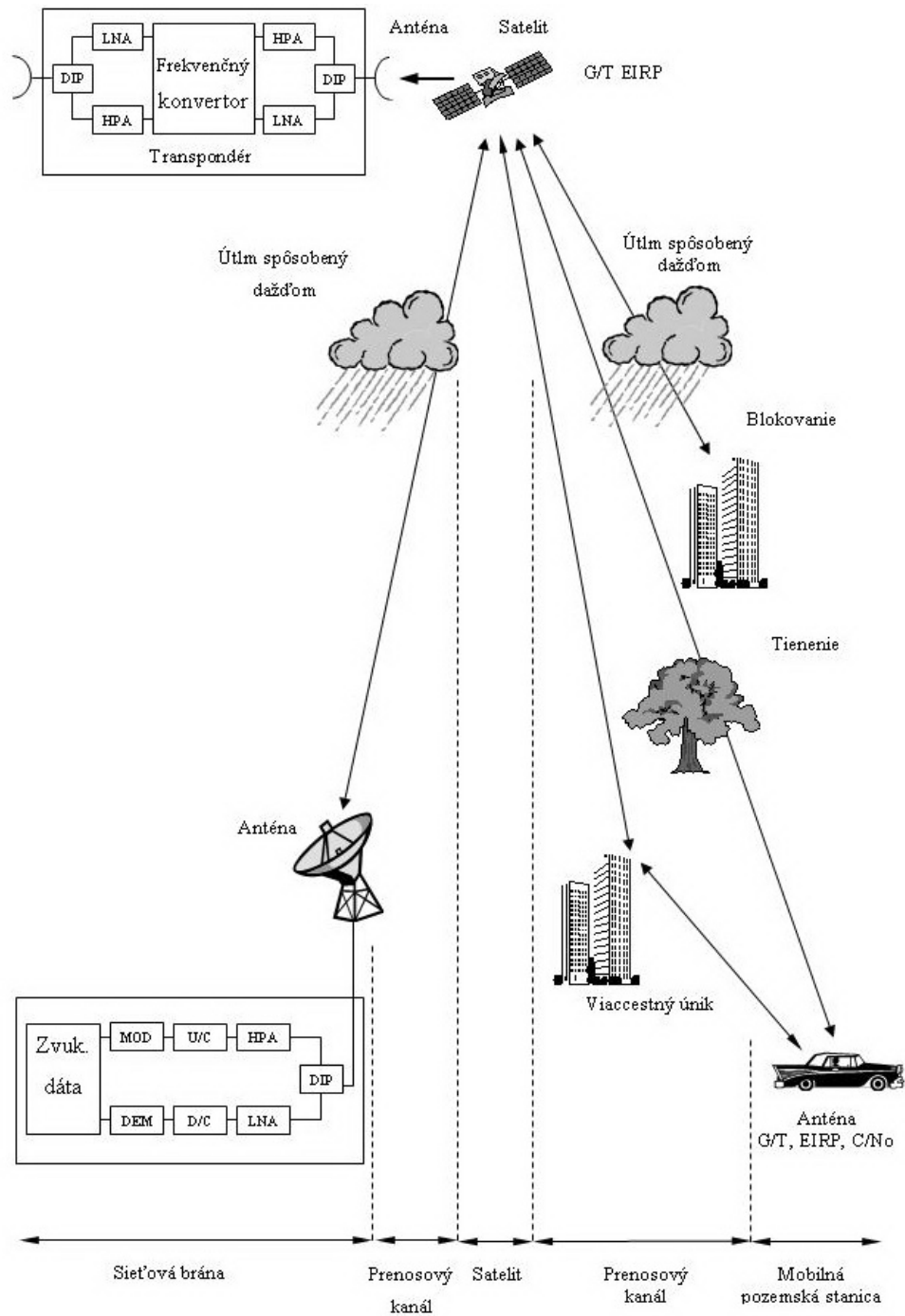
[8] Marchevský, S. - Pillár S. a kol.: Služby družicových systémov, in: Podhradský, P. et al.: Multimedia: Telekomunikačné služby, Bratislava 2005

3 Energetická bilancia satelitného spoja

3.1 Konfigurácia mobilného satelitného komunikačného systému

Na obr. 3.1 je ukázané základné usporiadanie mobilných satelitných komunikačných systémov. Systém pozostáva z troch základných segmentov: zo satelitu, sieťovej brány (gateway) a mobilnej pozemskej stanice. Z hľadiska návrhu systému, by dráha signálu mala byť pridaná ako štvrtý segment. V mobilných satelitných komunikačných systémoch je dráha šíriaceho sa signálu veľmi dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje predovšetkým kvalitu kanála komunikačného systému. V prípade mobilných satelitných komunikácií na pevnine, je najväčším problémom šírenia efekt blokovania, zapríčinený budovami a okolitými objektami, ktoré spôsobujú, že signály zo satelitu sa neprenesú úplne. Druhým problémom je tienenie spôsobené stromami a listami, ktorého výsledkom je útlm signálu. Tretím je viaccestný únik, ktorý je spôsobený hlavne budovami. Avšak, tento vplyv môže byť zvyčajne zanedbaný, z dôvodu použitia smerových antén a veľkého útlmu odrazených signálov. V námorných satelitných komunikáciách je únik spôsobený odrazom od morskej hladiny najväčším problémom šírenia. Útlm v dôsledku dažďa sa musí uvažovať až vo vyšších frekvenčných pásmach takých ako je Ka pásmo a pásmo milimetrových vln. Môže sa však zanedbať v L pásme.

Sieťová brána a mobilná pozemská stanica sa skladajú z antény, diplexera (DIP), súboru vzostupných (U/C) a zostupných (D/C), výkonového zosilňovača (High-Power Amplifier-HPA), nízkošumového zosilňovača (Low-Noise Amplifier-LNA), a súboru modulátorov (MOD) a demodulátorov (DEM). Konfigurácia satelitu je takmer rovnaká ako pri sieťovej bráne a mobilnej pozemskej stanici a dá sa rozložiť na anténu, súbor vzostupných (U/C) a zostupných (D/C) konvertorov a súbor transpondérov.



Obr. 3.1 Konfigurácia mobilných satelitných komunikačných systémov

Satelity typu „bent pipe“ (transparentné) satelity nemajú modulátory a demodulátory. Môžu iba vysielat' signál po zmene frekvencie a zosilňovať prijaté nízkoúrovňové signály. Základné parametre, ktoré charakterizujú prevedenie uvádzaných troch segmentov, t.j. satelitov, sieťových brán a mobilných pozemských staníc sú G/T (pomer zisku antény a šumovej teploty systému), $EIRP$ (Equivalent Isotropically Radiated Power a C/No (pomer

výkonu nosnej frekvencie a hustoty energie šumu v šírke pásma 1 Hz). G/T a EIRP sú často používané pojmy v satelitných komunikáciách a na základe nich sa hodnotie prijímacie a vysielacie schopnosti sieťovej pozemskej brány (gateway Earth) resp. satelitu. C/No reprezentuje kvalitu komunikačného kanála. Tieto parametre budú opísané podrobne v nasledujúcej podkapitole.

3.2 Základné parametre v energetickej bilancii satelitného spoja

3.2.1 Šum terminálu

Šumové vlastnosti komunikačných systémov sa dajú opísať pomocou termínu šumová teplota.. Použitie fiktívnej teploty vyplýva zo skutočnosti, že základný zdroj šumu v elektrických obvodoch je tepelné kmitanie elektrónov v rezistívnych obvodových súčiastkach.

V obvode naprázdno je efektívna hodnota (rms) šumového napätia U_n generovaná v odpore s hodnotou R ohmov (Ω) pri absolútne teplote T (K) daná vzťahom podľa Nyquista [1].

$$U_n = \sqrt{4kTRB} \quad (\text{Volty}) \quad (3.1)$$

kde k je Boltzmanova konštanta (1.38×10^{-23} Watt/sec/K) a B je šírka frekvenčného pásma (Hz), v ktorom je šumové napätie merané. Je dobre známe, že maximálny výkon, môže dodávať zdroj s definovaným vnútornou záťažou do vonkajšej záťaže vtedy, keď je vonkajšia záťaž komplexne združená s impedanciou zdroja. Z toho sa dá ľahko ukázať, že tepelný šumový výkon P_n dodaný do tejto optimálnej záťaže zo zdroja tepelného šumu odporu R pri teplote T je určený výrazom:

$$P_n = \frac{U_n^2}{4R} = kTB \quad (\text{W}) \quad (3.2)$$

Musíme poznamenať, že šumový výkon nezávisí od konkrétnej hodnoty odporu, ale len od absolútnej teploty T a šírky frekvenčného pásma B .

Odtiaľ hustota energie šumu na jednotkovú frekvenčnú šírku pásma (1 Hz) je daná:

$$N_0 = kT \quad (\text{W/Hz}) \quad (3.3)$$

Je výhodné použiť vyjadrenie v decibeloch (dB) vo výpočte parametrov mobilných satelitných komunikácií, napríklad pri zisku antény, šumovom výkone, pri útlme šírenie vo voľnom priestore, a pod. V tomto učebnom texte, $\log(A)$ je označený symbolom $[A]$. Podľa toho je N_0 vyjadrený v decibeloch nasledovne:

$$\begin{aligned} [N_0] &= [k] + [T] \\ &= 10\log(k) + 10\log(T) \\ &= 10\log(1.38 \times 10^{-23}) + 10\log(T) \\ &= -228.6 + 10\log(T) \quad (\text{dBW/Hz}) \quad (3.4) \end{aligned}$$

Príklad 3.1

Hustota energie šumu generovaná v rezistore pri teplote 270 C sa vypočíta podľa (3.4) nasledovne:

$$\begin{aligned} [N_0] &= -228.6 + 10\log(273 + 27) \\ &= -228.6 + 24.8 \\ &= -203.8 \quad (\text{dBW/Hz}) \end{aligned}$$

3.2.2 Šumové číslo

Prevedenie elektrických obvodov alebo súčiastok je hodnotené pomocou šumového čísla (Noise Figure-NF), ktoré je definované nasledovne:

$$NF = \frac{\frac{S_{in}}{N_{in}}}{\frac{S_{out}}{N_{out}}} = \frac{\frac{S_{in}}{kT_0B}}{\frac{GS_{in}}{G(kT_0B + kT_{in}B)}} = 1 + \frac{T_{in}}{T_0} \quad (3.5)$$

kde S_{in} a N_{in} predstavujú výkon signálu a šumu na vstupe obvodu a S_{out} a N_{out} znamenajú to isté na výstupe obvodu. Písmená G a B znamenajú zosilnenie a šírku frekvenčného pásma obvodu, ako je to ukázané na obrázku 3.2.

T_0 označuje fyzikálnu teplotu okolia, v ktorom sa nachádza uvažovaný obvod. T_{in} označuje ekvivalentnú vstupnú šumovú teplotu, ktorá je ekvivalentnou hodnotou šumovej teploty na vstupe obvodu, ktorý generuje tepelný šum. Šumové číslo sa často udáva v decibelovej miere následovne:

$$[NF] = 10 \log \left(1 + \frac{T_{in}}{T_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.6)$$

Ak je dané šumové číslo, potom sa T_{in} vypočíta nasledovne:

$$T_{in} = T_0 \left(10^{\frac{[NF]}{10}} - 1 \right) \quad (\text{K}) \quad (3.7)$$

Príklad 3.2

1. Ak $T_{in} = 400\text{K}$, a $T_0 = 300\text{K}$, NF sa vypočíta nasledujúcim spôsobom:

$$[NF] = 10 \log \left(1 + \frac{400}{300} \right) = 3.7 \quad (\text{dB})$$

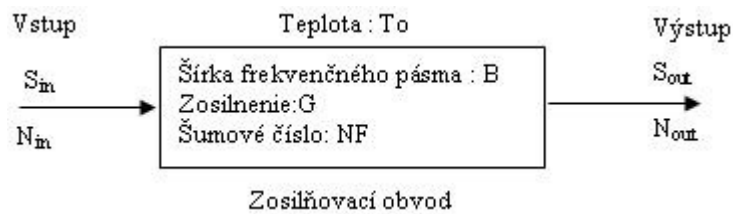
2. Ak $NF = 4 \text{ dB}$ a $T_0 = 290 \text{ K}$, T_{in} sa dá vypočítať podľa vzťahu (3.7) nasledovným spôsobom:

$$T_{in} = T_0 \left(10^{\frac{[4]}{10}} - 1 \right) = 438.4 \quad (\text{K})$$

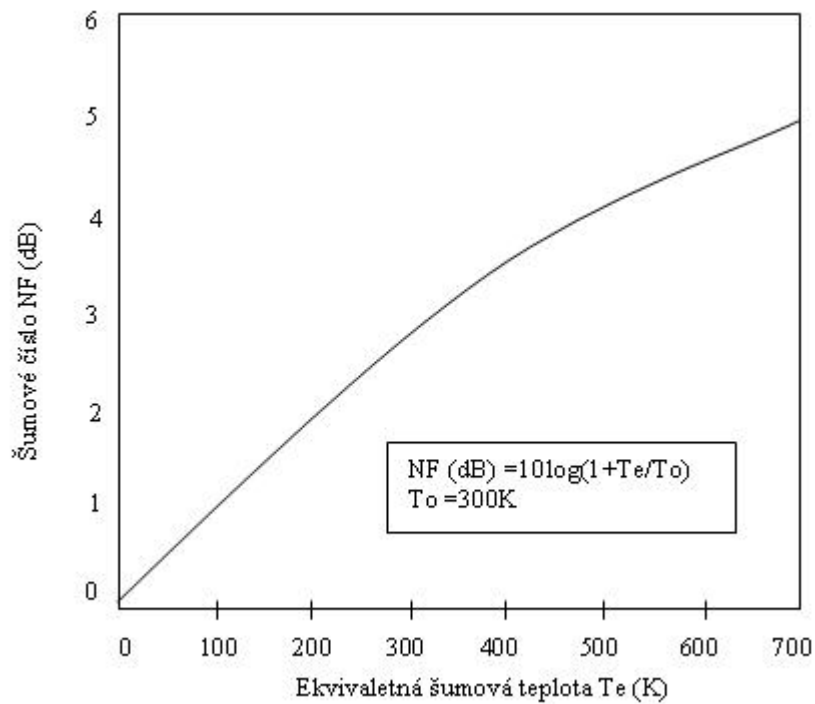
Obrázok 3.3 ukazuje vzťah medzi šumovými číslami v decibeloch a ekvivalentnými šumovými teplotami pri $T_0 = 300 \text{ K}$.

Tým istým spôsobom ako v prípade šumového čísla, ak obvod alebo napájacie vedenie má stratu L_f podľa obr. 3.4, možno L_f vyjadriť nasledujúcim vzťahom:

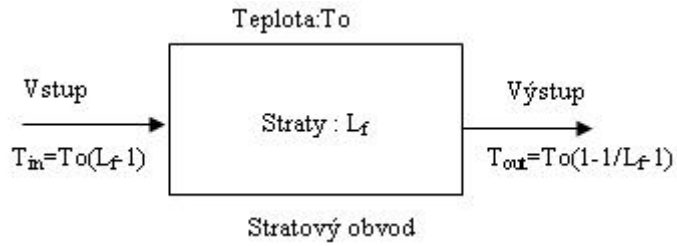
$$T_{in} = T_0(NF - 1)$$



Obr. 3.2 Šumové číslo zosilňovacieho obvodu



Obr. 3.3 Šumové číslo a ekvivalentná šumová teplota



Obr. 3.4 Ekvivalentná šumová teplota pre stratový obvod

$$L_f = \frac{\frac{S_{in}}{N_{in}}}{\frac{S_{out}}{N_{out}}} = \frac{\frac{S_{in}}{kT_0 B}}{\frac{1}{L_f} \frac{S_{in}}{\frac{1}{L_f}(kT_0 B + kT_{in} B)}} = \frac{T_0 + T_{in}}{T_0} \quad (3.8)$$

$$T_{in} = T_0(L_f - 1) \quad (3.9)$$

Preto, ekvivalentná šumová teplota na výstupe obvodu T_{out} sa dá získať vydelením T_{in} pomocou L_f nasledovným spôsobom:

$$T_{out} = T_0 \left(1 - \frac{1}{L_f} \right) \quad (3.10)$$

Príklad 3.3

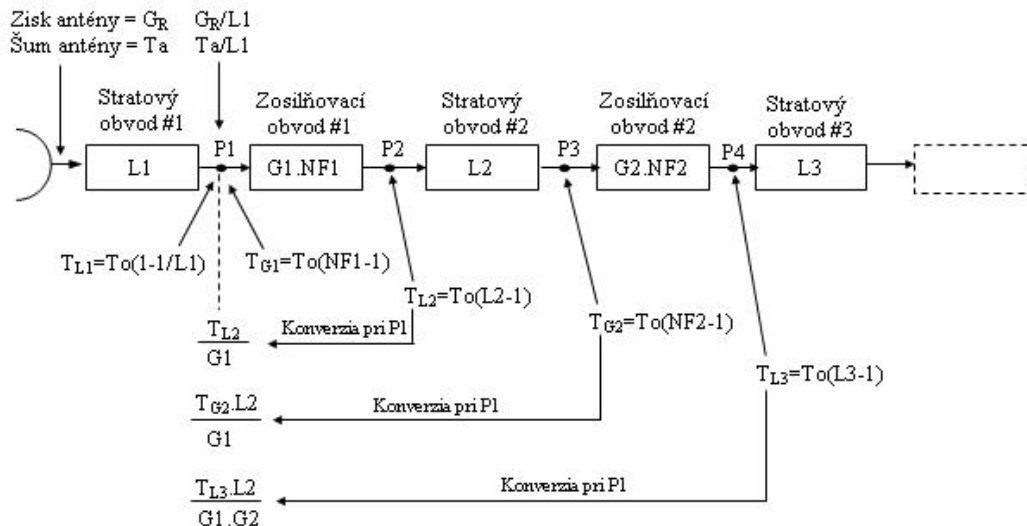
Ak obvod má stratu 3 dB a $T_0=300\text{K}$, ekvivalentná vstupná a výstupná šumová teplota sa dá vypočítať pomocou (3.9) a (3.10), nasledovným spôsobom:

$$T_{in} = 300 \left(10^{\frac{3}{10}} - 1 \right) = 298.6 \quad (\text{K})$$

$$T_{\text{out}} = 300 \left(1 - \frac{1}{10^{\frac{3}{10}}} \right) = 149.6 \quad (\text{K})$$

3.2.3 Šumová teplota prijímača

Všeobecne, prijímací systém má kaskádové spojenie stratových a zosilňovacích obvodov ako je to ukázané na obr 3.5. Signál zo satelitu je prijatý anténou so ziskom G a ekvivalentnou anténa šumovou teplotou na výstupe antény označenou ako T_a .



Obr. 3.5 Kaskádne zapojenie stratových a zosilňujúcich obvodov

Straty v stratových obvodoch $\#n$ (n je 1,2,...) sú označené ako L_n , a zisky a šumové čísla zosilňovacích obvodov $\#n$ sú označené ako G_n a NF_n .

Na obr. 3.5, ekvivalentná šumová teplota T_{L1} na výstupe P_1 stratového obvodu $\#1$ je opísaná ako $T_{L1} = T_0(1-1/L_1)$. Keď sa uvažuje zosilňovací obvod $\#1$, ekvivalentná šumová teplota T_{G1} na vstupe P_1 obvodu $\#1$ sa dá opísať vzťahom $T_{G1} = T_0(NF_1-1)$. Nasledovne, keď sa uvažuje stratový obvod $\#2$, ekvivalentná šumová teplota T_{L2} na vstupe P_2 obvodu $\#2$ sa dá vyjadriť pomocou vzťahu $T_{L2} = T_0(L_2-1)$. Rovnakým spôsobom, ekvivalentná šumová teplota na vstupe každého obvodu sa dá opísať podľa obr. 3.5. Ak ekvivalentná šumová teplota T_{L2} je

meraná na vstupe P1 zosilňovacieho obvodu #1, toto sa dá vyjadriť tak, že ju vydelíme ziskom G_1 obvodu #1. Rovnakým spôsobom, sa dá ekvivalentná šumová teplota na vstupe každého obvodu konvertovať na ekvivalentnú vstupnú šumovú teplotu na vstupe zosilňovacieho obvodu #1 ako je ukázané na obr. 3.5.

Teda, ekvivalentná vstupná šumová teplota T_i celého obvodu (prijímača) na vstupe P1 k zosilňovaču #1 sa dá zapísať nasledovným spôsobom:

$$T_i = T_{L1} + T_{G2} + \frac{T_{L2}}{G_1} + \frac{T_{G2}L_2}{G_1} + \frac{T_{L3}L_2}{G_1G_2} + \dots \quad (3.11)$$

Ak $G_1 \gg 1$, všetky členy po treťom člene vo vzťahu (3.11) môžu byť zanedbané v porovnaní s prvým a druhým členom. Teda, z predchádzajúceho vzťahu je zrejmé, že kvalita šumových pomerov v prvom zosilňovacom obvode a v prvom stratovom obvode je rozhodujúca pre kvalitu prijímača.

Celková ekvivalentná vstupná šumová teplota T_s na vstupnom porte prijímača môže byť vyjadrená ako:

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{T_a}{L_1} + T_{L1} + T_{G1} \quad (3.12) \\ &= \frac{T_a}{L_f} + T_0 \left(1 - \frac{1}{L_f} \right) + T_R \end{aligned}$$

kde T_R značí ekvivalentnú šumovú teplotu prvého zosilňovacieho stupňa prijímača, ktorý je obvyčajne nazývaný nízko šumový zosilňovač (LNA), a L_f označuje straty napájacieho vedenia linky medzi anténou a LNA. Hodnota T_a znamená ekvivalentnú šumovú teplotu antény a T_s je šumová teplota systému. Tu musíme poznamenať, že T_s závisí od pozície meraného bodu, a obvykle sa určuje na vstupe LNA.

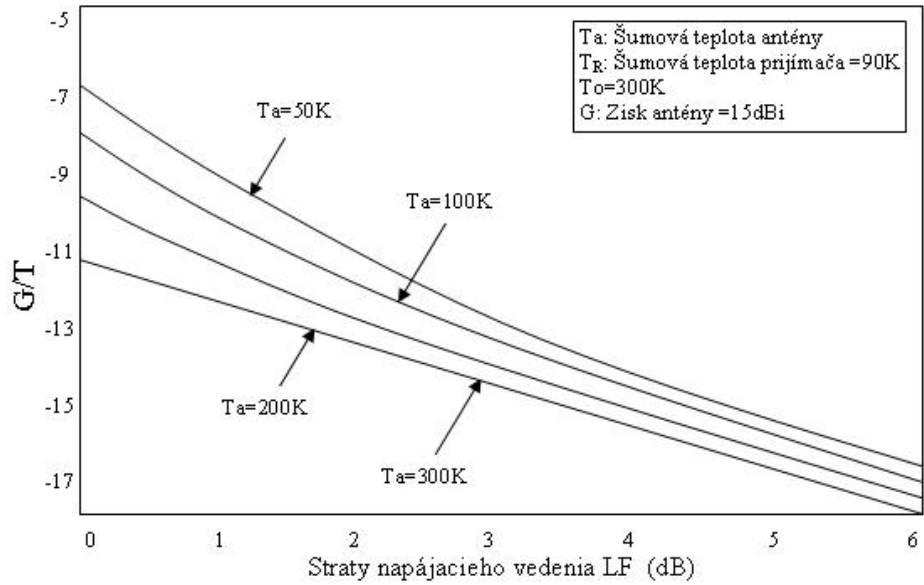
3.2.4 Účinnosť (G/T)

Čo sa týka antény, zisk G_R na prijímanej frekvencii a ekvivalentná vstupná šumová teplota T_a môžu byť označované ako G_R / L_f ($=G_S$) resp. T_a / L_f na vstupe zosilňovacieho obvodu #1. Hodnota G_S označuje systémový zisk na vstupe LNA. V dôsledku toho, pomer zisku antény a šumovej teploty na vstupe LNA môže byť zapísaný ako:

$$\begin{aligned} \frac{G_S}{T_S} &= \frac{\frac{G_R}{L_f}}{\frac{T_a}{L_f} + T_0 \left(1 - \frac{1}{L_f}\right) + T_R} \\ &= \frac{G_R}{T_a + T_0(L_f - 1) + T_R L_f} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Kde G_S/T_S je niekedy jednoducho zapísaný ako G/T . G/T je základný parameter prijímača.

Obrázok 3.6 ukazuje vzťah medzi G/T a stratami napájacieho vedenia v 15-dBi anténe, ktorý predstavuje charakteristický zisk antény v moderných typoch mobilných satelitných komunikačných systémov. Hoci T_a závisí od činiteľov ako sú frekvencia a šírka anténového zväzku, jej charakteristická hodnota v pásme L je približne od 80K do 100K. Hodnota L_f označuje celkové straty napájacieho vedenia a ďalších súčiastok ako sú diplexery, káble a v prípade sfázovaných anténových sústav aj fázových posúvačov.



Obr. 3.6 Závislosť medzi G/T a stratami napájacieho vedenia; zisk antény je 15 dBi

3.3 Závislosť medzi prenášaným a prijímaným výkonom

V predchádzajúcich častiach bolo ukázané, že citlivosť prijímača je určená účinnosťou G/T . Ďalej, budeme brať do úvahy, aký výkon bude dostupný na vstupe prijímača.

Obrázok 3.7 ukazuje pomer medzi vysielaným a prijímaným výkonom. Hoci sa nikdy nedá dosiahnuť dokonalý 3D všesmerový vyžarovací diagram, predstava takého ideálu antény je veľmi užitočná v teoretickej analýze. Ak vysielacia anténa má ideálny izotropický vyžarovací diagram v 3D, výkonová hustota na guľovom povrchu je:

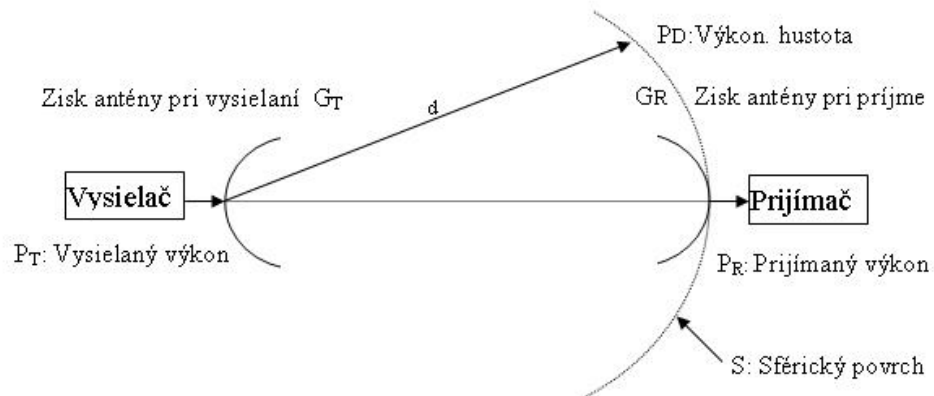
$$P_D = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.14)$$

kde P_T a d označujú prenášaný výkon a vzdialenosť medzi vysielacou a prijímacou anténou. Ak vysielacia anténa má zisk G_T , výkonová hustota (3.14) môže byť napísaná ako:

$$P_D = \frac{G_T P_T}{4\pi d^2} \quad (\text{Ws/m}^2) \quad (3.15)$$

kde $G_T \cdot P_T$ je vyžarovaný výkon vysielaný ideálnou všesmerovou anténou. Preto, tento vzťah je uvažovaný ako efektívny (alebo ekvivalentný) izotropický vyžarovaný výkon (EIRP), a ten je vyjadrený nasledovným spôsobom v antilogaritmických a decibelových výrazoch, nasledovne:

$$EIRP = G_T P_T \quad (\text{Ws/m}^2) \quad (3.16)$$



Obr. 3.7 Náčrt koncepcie závislosti medzi prenášaným a prijímaným výkonom

$$[EIRP] = [G_T] + [P_T] \quad (\text{dBW}) \quad (3.17)$$

EIRP sa často používa v satelitných komunikačných systémoch na ukázanie schopnosti prenosu.

Potom, výkon P_R prijímaný prijímacou anténou, ktorá má fyzickú aperturovú plochu A a účinnosť apertúry η , je:

$$\begin{aligned}
 P_R &= \frac{G_T P_T}{4\pi d^2} A_e \eta \\
 &= \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} (G_T P_T) G_R \\
 &= \frac{(G_T P_T) G_R}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} \\
 &= \frac{EIRP G_R}{L_P} \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

V dôsledku toho, $A_e \eta$ označuje efektívnu plochu apertúry antény, ktorá sa vzťahuje ku G_R a vlnovej dĺžke λ frekvencie získanej pomocou nasledujúcej rovnice [2]:

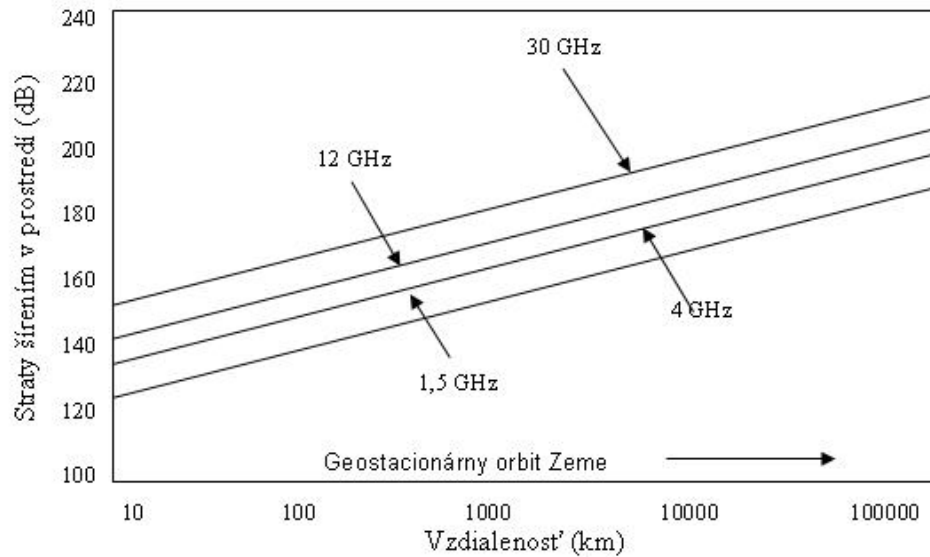
$$A_e \eta = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \quad (3.19)$$

Príklad 3.4

Frekvencia je 1500 MHz. Zisk antény, ktorej priemer je 100 cm a účinnosť apertúry je 0,6, je daný podľa (3.19) nasledovným spôsobom:

$$\begin{aligned}
 G_R &= \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \eta \\
 &= 4\pi \times \left(\frac{1500 \times 10^6}{3 \times 10^8}\right) \times \pi \left(\frac{1}{2}\right)^2 \times 0.6 = 148.0 \\
 [G_R] &= 10 \log(148.0) = 21.7 \quad (\text{dB})
 \end{aligned}$$

Prenosové straty vo voľnom priestore L_p sú spôsobené geometrickým útlmom pri šírení sa elektromagnetického vlnenia od vysielača k prijímaču. Obrázok 3.8 ukazuje prenosové straty vo voľnom priestore v decibelovej mierke na 1,5 GHz (L pásmo), 4 GHz (C pásmo), 12 GHz (Ku pásmo), a 30 GHz (Ka pásmo).



Obr. 3.8 Straty (útlm) prenosu voľným priestorom

GEO satelit má geostacionárnu obežnú dráhu, ktorá je okolo 36,000 km nad rovníkom.

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (3.20)$$

Príklad 3.5

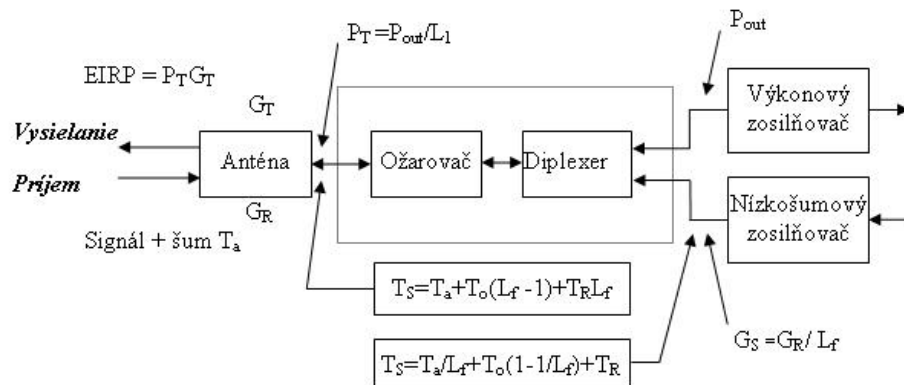
Prenosové straty vo voľnom priestore pri 1500 MHz z geostacionárneho satelitu na rovník tesne pod ním sú vypočítané nasledovným spôsobom:

$$L_p = \left(\frac{4\pi \times 36500 \times 10^3}{\lambda} \right)^2 = (7.3\pi \times 10^8)^2$$

$$[L_p] = 10 \log(7.3\pi \times 10^8)^2 = 20 \log(7.3\pi \times 10^8) = 20(8 + 1.36) = 187.2 \text{ (dB)}$$

3.4 Pomer signál/šum (C/No) v satelitných komunikačných spojoch

Rádiofrekvenčné zariadenia pozemskej stanice a satelitu, obyčajne, pozostávajú z rovnakých blokov ako je anténa, napájacie (budiaceho) vedenie, diplexer, výkonový zosilňovač (HPA), a nízko šumový zosilňovač (LNA) (obr.3.9). Na obr. 3.9, G_T a G_R znamenajú zisky antén pri vysielaní a prijíma a P_{out} a P_T znamenajú výstupný výkon HPA a vstupný výkon do antény.



Obr. 3.9 Blokový diagram RF stupňa pozemnej stanice

Pomer výkonov vstupného signálu (C) a výkonu šumu (N) na vstupnom bode antény, môže byť zapísaný nasledujúcim spôsobom s využitím vzťahov (3.2) a (3.16):

$$\frac{C}{N} = \frac{\left(\frac{P_{out}}{L_f} G_T \right) G_R}{k T_S B}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{(P_T G_T) G_R}{L_P} \\
 &= \frac{L_P}{k T_S B} \\
 & \frac{EIRP \cdot G_R}{L_P} \\
 &= \frac{L_P}{k T_S B} \\
 &= \frac{EIRP}{L_P} \left(\frac{G_R}{T_S} \right) \frac{1}{kB} \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

Keď je uvažovaná výkonová hustota šumu (C/N_0), (3.19) môžeme zapísať ako:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{EIRP}{L_P} \left(\frac{G_R}{T_S} \right) \frac{1}{k} \quad (3.22)$$

Rovnice (3.21) a (3.22) sú základné rovnice, ktoré ukazujú kvalitu prijímaných signálov zo satelitu k pozemskej stanici po dráhe, ktorá sa nazýva zostupná.

Rovnica (3.20) môže byť napísaná nasledovným spôsobom v decibelovej mierke:

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{C}{N_0} \right] &= [P_{out}] - [L_f] + [G_T] - [L_P] + [G_R] - [T_S] - [k] \\
 &= [EIRP] - [L_P] + [G_R] - [T_S] + 228.6 \quad (3.23) \\
 &= [EIRP] - [L_P] + \left[\frac{G_R}{T_S} \right] + 228.6 \quad (\text{dBHz})
 \end{aligned}$$

Rovnica (3.23) nám poskytuje prehľad o kvalite kanála zostupnej linky. Prenášaný výkon (EIRP) je tmený stratami vznikajúcimi pri šírení vo voľnom priestore (L_P) od satelitu k Zemi, zosilnený

ziskom prijímacej antény (G_R), a tlmený šumom systému (T_s). Kvalita kanála vzostupnej linky zo Zeme k satelitu je vyjadrená rovnako ako (3.21-23).

V digitálnych komunikáciách, požadovaný pomer C/No je určovaný bitovou chybovosťou (BER), ktorá reprezentuje požadovanú kvalitu komunikačných kanálov.

Príklad 3.6

Geostacionárny satelit vysiela signál na frekvencii 1500 MHz k mobilnej pozemskej stanici na rovník tesne pod ním. Parametre sú nasledujúce:

Satelitom vysielaný výkon (1 W)	0	dBW
Zisk satelitnej antény (D=1m)	21.7 dBi	(príklad 3.4)
Prenosové straty (d= 36,000 km)	187.2 dB	(príklad 3.5)
Zisk mobilnej antény (D=40 cm, $\eta=0.8$)	15.0 dBi	
Šumová teplota systému mobilnej pozemskej stanice (okolo 300K)	24.8 dBK	

C/No sa dá vypočítať pomocou (3.21) nasledovným spôsobom:

$$C/No = 0 + 21.7 - 187.2 + 15 - 24.8 + 228.6 = 53.3 \text{ (dBHz)}$$

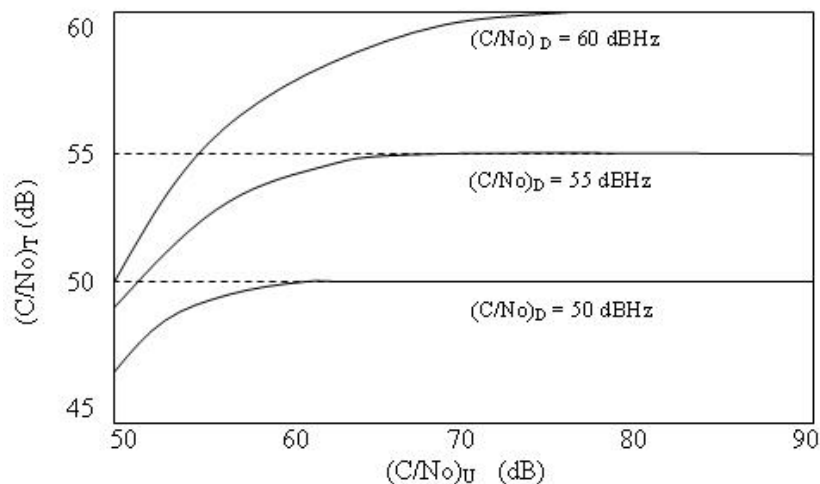
V predchádzajúcom texte sme uvažovali kvalitu kanála zostupného spoja a vzostupného spoja oddelene. Môžeme sa však spýtať aká je kvalita kanála zo základnej stanice k mobilnej pozemskej stanici cez satelit? Toto sa dá ľahko určiť ak vieme, že tepelný šum, ktorý je vytváraný vo vzostupnom a zostupnom spoji, je postupne lineárne pridávaný. Všeobecne, interferenčný šum, ktorý je vytváraný v systéme v dôsledku iných systémov, je pridávaný k tepelnému šumu. Celková hodnota pomeru $(C/No)_T$ je daná nasledovne:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{C}{(N_0)_U + (N_0)_D + I_0} \quad (3.24)$$

$$= \left\{ \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_U} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_D} + \frac{1}{\left(\frac{C}{I_0}\right)} \right\}^{-1}$$

kde I_0 znamená výkonovú hustotu interferenčného šumu a U a D znamenajú označujú vzostupný a zostupný spoj.

V (3.24), ak hodnota (C/N_0) pre jeden zo spojov je dostatočne malá v porovnaní s ďalšími hodnotami, napríklad $(C/N_0)_D \ll (C/N_0)_U$ a $(C/N_0)_D \ll (C/I_0)$, potom celková kvalita $(C/N_0)_T$ môže byť približne určená pomerom $(C/N_0)_D$. To značí, že celková kvalita komunikačného kanála bude určovaná najhoršou kvalitou komunikačného spoja. Obr. 3.10 ukazuje vypočítaný príklad pre celkový pomer $(C/N_0)_T$ v závislosti od hodnoty pomeru $(C/N_0)_U$ vzostupného spoja. Parametrami sú hodnoty pomeru zostupného spoja $(C/N_0)_D$ 50 dBHz, 55 dBHz, a 60 dBHz. V tomto prípade sa dá ľahko pochopiť, že celková kvalita komunikačného kanála je určená horšou kvalitou zostupného spoja a tak celková kvalita kanála nikdy neprekročí kvalitu zostupného spoja, nech by kvalita vzostupného spoja akokoľvek rástla.



Obr. 3.10 Závislosť medzi úplným $(C/N_0)_T$ a $(C/N_0)_U$, $(C/N_0)_D$

Príklad 3.7

Uvažujme prípad pokusného leteckého-navigačného prenosu dát cez satelit použitím ETS-V satelitu. Celkové $(C/No)_T$ pre priamy komunikačný spoj zo sieťovej pozemskej brány (GES pri Kašmíre) na lietadlovú pozemskú stanicu (AES pri Anchorage) cez satelit sa môže vypočítať podľa 3.24. V príklade sa neuvažuje interferenčný šum. Frekvencie 6 GHz a 1,5 GHz boli použité medzi základňovou pozemskou stanicou a satelitom resp. medzi satelitom a lietadlovou pozemskou stanicou.

Od GES k satelitu -uplink

EIRP GES	60,7dBW	
Straty šírením (6 GHz)	199,4dB	(d = 37,270 km)
Zisk satelitnej antény	21,7dBi	
Straty ožarovača	3,0dB	

Uplink celkovo: $C = 60.7 - 199.4 + 21.7 - 3.0 = -120.0$ (dBW)

$[No] = -228.6 + 10 \log(300) = -203.8$ (dBHz)

* uplink $(C/No)_U = -120,0 + 203,8 = 83,8$ (dBHz)

Od satelitu k AES downlink

EIRP satelitu	30,5dBW	
Straty šírením	188,5dB	(d = 41,097 km)
Zisk AES antény	14,0dBi	

Sledovanie odchýlky antény 0,5dB

Straty ožarováním 3,0dB

Downlink celkovo: $C = 30.5 - 188.5 + 14.0 - 0.5 - 3.0 = -147.5$ (dBW)

$[N_0] = -228.6 + 10 \log(300) = 203.8$ (dBHz)

* downlink $(C/N_0)_D = -147,5 + 203,8 = 56,3$ (dBHz)

Teda celkový pomer výkonu nosnej k výkonovej hustote šumu (C/No) sa vypočíta ako :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_T = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_U} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_D}} = \frac{1}{\frac{1}{10^{8.38}} + \frac{1}{10^{5.63}}} = 425822,28$$

$$\left[\left(\frac{C}{N_0}\right)_T\right] = 10 \log(425822,28) = 56,3(\text{dBHz})$$

Je to potvrdené tým, že celková kvalita komunikačného kanála je určená najhorším komunikačným spojom, ktorý je v tomto príklade zostupný spoj. Viac detailov je uvedených v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Príklad energetickej bilancie priameho spoja pre letecko-navigačné satelitné komunikácie

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

<i>Z GES k satelitu (vzostupný spoj)</i>		
<i>Siet'ová pozemská brána: Kašmír (140,7 E , 30,0 N)</i>		
HPA výstupný výkon	dBW	10,0
Straty ožarováním	dB	3,0
Zisk antény	dBi	53,7
Tx frekvencia	GHz	6,0
Priemer antény	m	10,0
EIRP	dBW	60,7
Straty šírením	dB	199,4
Vzdialenosť	km	37.270,0
<i>Satelit: ETS -V (150 E 0)</i>		
Zisk antény	dBi	21,7
Priemer antény	m	0,3
Straty ožarováním	dB	3,0
Prijímaný výkon	dBW	-120,0
Teplota systémového šumu	K	439,9
Šumová teplota antény	K	200,0
Šumová teplota LNA	K	190,0
Teplota prostredia	K	300,0
G/T	dBK	-7,7
Uplink C	dBW	-120,0
N ₀	dBW/Hz	-203,8
Uplink C/N ₀	dB/Hz	83,8

3.5 Strategické technológie pre mobilné satelitné komunikačné systémy

3.5.1 Systémové požiadavky a strategické technológie

Strategické technológie na realizáciu mobilných satelitných komunikácií sú zvýraznené pomocou takých systémových požiadaviek ako miniatúrnosť, ľahkosť terminálov, dostatočná kapacita na uspokojenie veľkého počtu mobilných účastníkov, vysoká kvalita a spoľahlivosť v komunikáciách aj napriek náročným podmienkam šírenia v prostrediach mobilných staníc.

Tieto systémové požiadavky pomáhajú pri objasňovaní funkcií ako ochrana proti úniku, blokovaniu, tieneniu prostredníctvom šírenia prostredím mobilných staníc. Napríklad za účelom poskytovania služieb veľkému počtu mobilných užívateľov v pridelenom frekvenčnom pásme, šírka pásma na kanál musí byť tak úzka ako je len možné a činiteľ opätovného použitia frekvencie sa musí zvýšiť. Tieto požadované funkcie si vyžadujú využívanie strategických technológií na palube satelitov, pri spracovaní informácií a v mobilných termináloch.

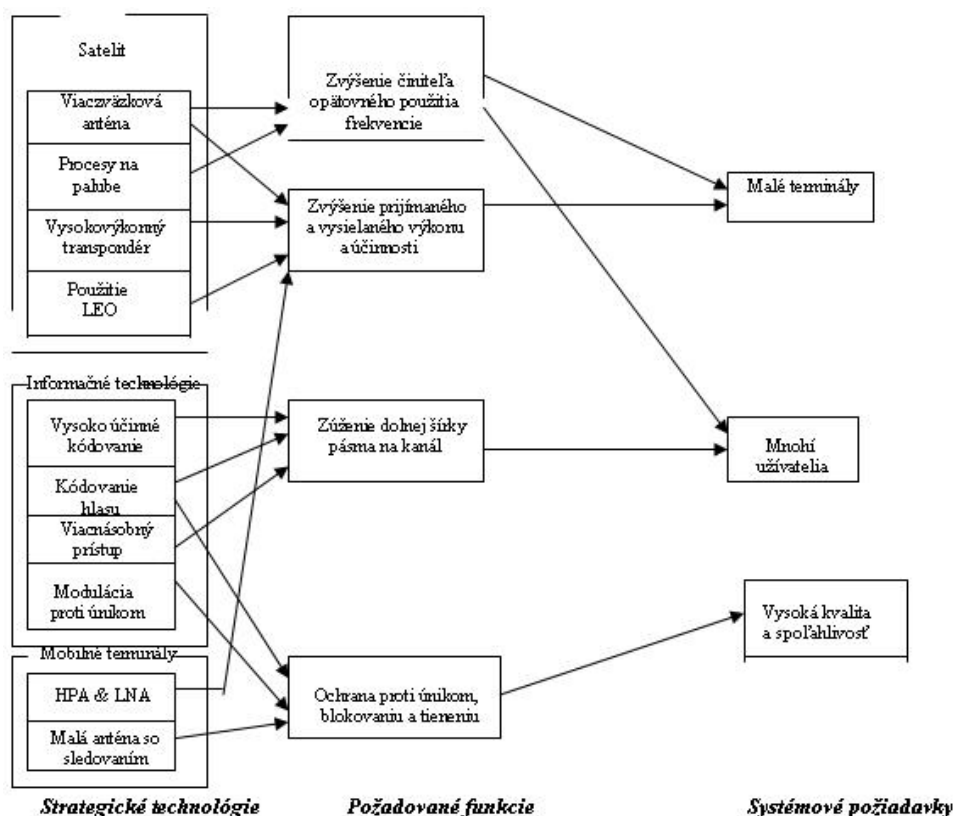
Tab. 3.1 (pokračovanie) Príklad energetickej bilancie priameho satelitného spoja pre letecko-navigačné satelitné komunikácie

<i>Zo satelitu k lietadlovej pozemskej stanici AES (zostupný spoj-downlink)</i>		
<i>Satelit: ETS- V (150 E, 0)</i>		
Zisk transpondéra	dB	128,0
HPA výstupný výkon	dBW	8,0
Straty ožarovaním	dB	3,0
Zisk antény	dB	25,5
Tx frekvencia	GHz	1,5
Priemer antény	m	1,5
EIRP	dB	30,5
Straty šírením	dB	188,5
Vzdialenosť	km	41.097,0
<i>Lietadlová pozemná stanica: Anchorage (150 W, 61.2 N)</i>		
Chyba sledovania antény	dB	0,5
Zisk antény	dB	14,0
Priemer antény	m	0,4
Straty šírením	dB	3,0
Prijatý výkon	dBW	-147,5
Systémová šumová teplota	K	294,8
Šumová teplota antény	K	110,0
Šumová teplota LNA	K	90,0
Teplota prostredia	K	300,0
G/T	dB	-13,7
Downlink C	dB	-147,5
N_0	dBW/Hz	-203,8
Downlink C/ N_0	dBHz	56,3
Celkové C/ N_0	dBHz	56,3

Obrázok 3.11 ukazuje vzájomné vzťahy medzi systémovými požiadavkami a strategickými technológiami mobilných satelitných komunikácií.

3.5.2 Technológia satelitov

Komunikačné zariadenie musí byť miniatúrne a ľahké. Miniatúrnosť a ľahkosť sa dosahuje technickými zlepšeniami v elektrických prvkoch ako sú antény, výkonové zosilňovače, integrované obvody a napájacie zdroje za účelom ich inštalovania do mobilných zariadení. Avšak najpodstatnejším činiteľom je schopnosť satelitu, a to aby bol schopný vysielať dostatočný výkon pre prijímanie miniatúrnymi terminálmi s malými anténami. Satelity umiestnené na geostacionárnej dráhe musia byť vybavené veľkými zosilňovačmi výkonu a anténami, aby kompenzovali veľké tlmenie signálov dôvodu strát vznikajúcich pri prenose signálov voľným prostredím na vzdialenosť väčšiu ako 36000 km.



Obr. 3.11 Vzťah medzi systémovými požiadavkami a dôležitými technológiami mobilných satelitných komunikácií

V LEO systémoch je požadované prenášanie výkonu satelitom redukované kvôli ich nízkej obežnej dráhe. V oboch GEO i LEO systémoch budú viacväzkové antény na palube satelitov značne prispievať k vysokej hustote toku energie na zemskom povrchu a tiež zlepšia činitele opätovného použitia frekvencie podľa dopadnutých lúčov na zem. Prijatie viacväzkových antén môže vyžadovať také inteligentné funkcie ako prepínanie zväzkov so schopnosťami spracovania signálov na palube.

3.5.3 Informačné technológie

Vysoká kvalita a spoľahlivosť sú dôležitými činiteľmi v akomkoľvek komunikačnom systéme. Avšak v mobilných satelitných komunikačných systémoch majú značný vplyv na kvalitu

komunikácie, podmienky šírenia v ktorých mobilné zariadenia pracujú. V námorných satelitných komunikáciách vznikajúce úniky spôsobenými odrazmi od morskej ovplyvňujú kvalitu komunikácie. V pozemných mobilných komunikáciách sú signály zo satelitov tlmené a blokované v dôsledku prekážok, ktoré sú tvorené stromami alebo budovami. Za účelom prekonať tieto nedostatky, musí mať modulácia aj demodulácia schopnosť odolávať týmto únikom. Pri realizácii takýchto protiúnikových opatrení a úzkej šírky frekvenčného pásma na komunikačný kanál, je nevyhnutné na spracovanie signálov a kódovanie hlasu využívať moderné digitálne technológie.

3.5.4 Technológia terminálov

Okrem dobrej mechanickej pevnosti a jednoduchej inštalácie sú ďalšími samozrejmyimi požiadavkami na mobilné terminály kompaktnosť a nízka hmotnosť. Technológia návrhu a výroby antén pre mobilné terminály je jednou z najdôležitejších kľúčových technológií v mobilných satelitných komunikačných systémoch. Mobilné antény musia byť vhodné pre nepretržité sledovanie satelitov v prísnych podmienkach úniku, blokovania a tienenia. S terminálmi do dlane predstavuje vyžarovanie vážny problém, o ktorom je potrebné hovoriť, pretože prenášaný vysoký rádiový výkon smeruje aj do hlavy.

3.6 Mobilné satelitné transpondéry

Transpondér je zložený z vysielača a prijímača a je umiestnený na palube satelitu. Prijíma a vysiela signály s frekvenčnou konverziou a zosilnením signálov. Antény pre komunikácie na palube satelitu sa uvažujú ako súčiastky transpondéra. Obrázok 3.12 a 3.13 ukazuje transpondéry pre satelity INMARSAT-2, ktoré boli vypustené na obežnú dráhu v rokoch 1990-1992. Každý satelit je trojosovo stabilizovaný s 10-ročnou životnosťou a jeho počiatočná hmotnosť je 800kg, menovitý výkon je 1200W. Každý satelit má 2 transpondéry na prevod z C do L pásma a späť (L do C), komunikačné spoje majú kapacitu rovnajúcu sa 250 INMARSAT-A

hlasových kanálov. Efektívny všesmerový vyžiarený výkon EIRP v L pásme je 39 dBW. Každý satelit má globálny zväzok, ktorý pokryje približne 1/3 zemského povrchu.

3.6.1 C/L transpondéry

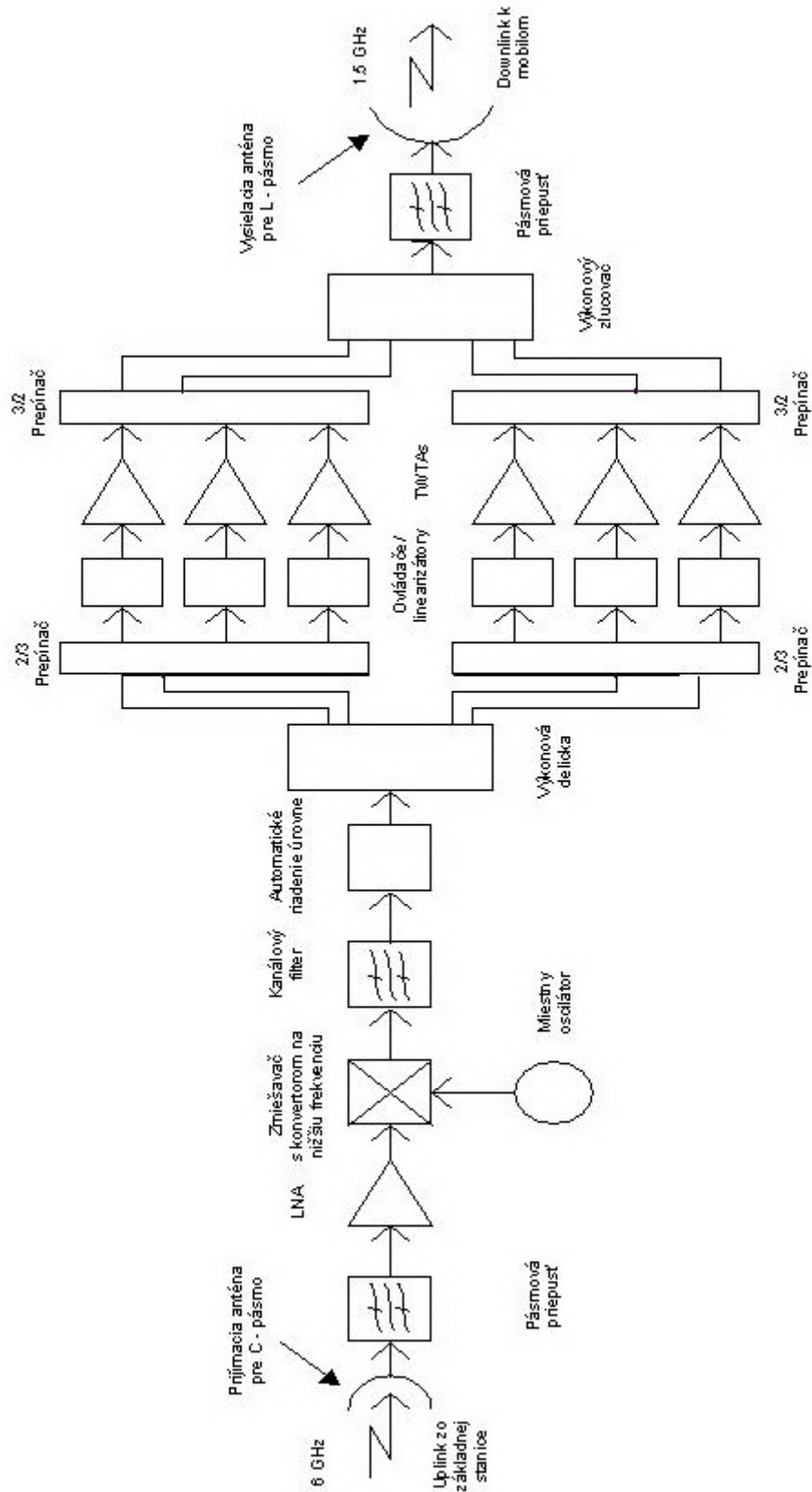
C/L pásmové transpondér prijíma vzostupné (uplink) signály v C pásme (6,4 GHz) zo základňových staníc a zabezpečí ich retransmisiu na zostupné (downlink) signály do L pásma (1.5 GHz) po frekvenčnej konverzii a zosilnení vykonovým zosilňovačom HPA. Signály prijímané anténou pre C pásmo sú vedené cez dolnopriepustný filter do frekvenčného meniča z pásma C-do pásma L. Signál kanálového filtra sa riadi pomocou zariadenia zabezpečujúceho automatické vyrovnanie úrovne signálu (AVC), ktoré obmedzuje úroveň signálov pre zosilňovač. Výkonový zosilňovač (HPA) sa skladá zo šiestich elektroniek s postupnou vlnou (TWTA) a im prislúchajúcim napájacim zdrojom. Pred každým TWTA je zaradený budič/linearizátor kompenzáciu nelineárnych RF vlastností TWTA. Delička signálu napája rovnakými budiacimi signálmi klaždy zo štyroch (zo šiestich) TWTA zosilňovačov, ktoré sú v nepretržitej prevádzke a ďalšie dva môžu byť kedykoľvek aktivované v prípade poruchy ako záložné zosilňovače. Aktívne TWTA sú vybrané pomocou 2/3 a 3/2 prepínačov a ich výstupné výkony sú kombinované pomocou pomocou obvodu pre zlučovanie výkonu generátora. Celkový výkon je vedený cez pásmový priepust do antény vysielajúcej v L pásme.

3.6.2 L/C transpondéry

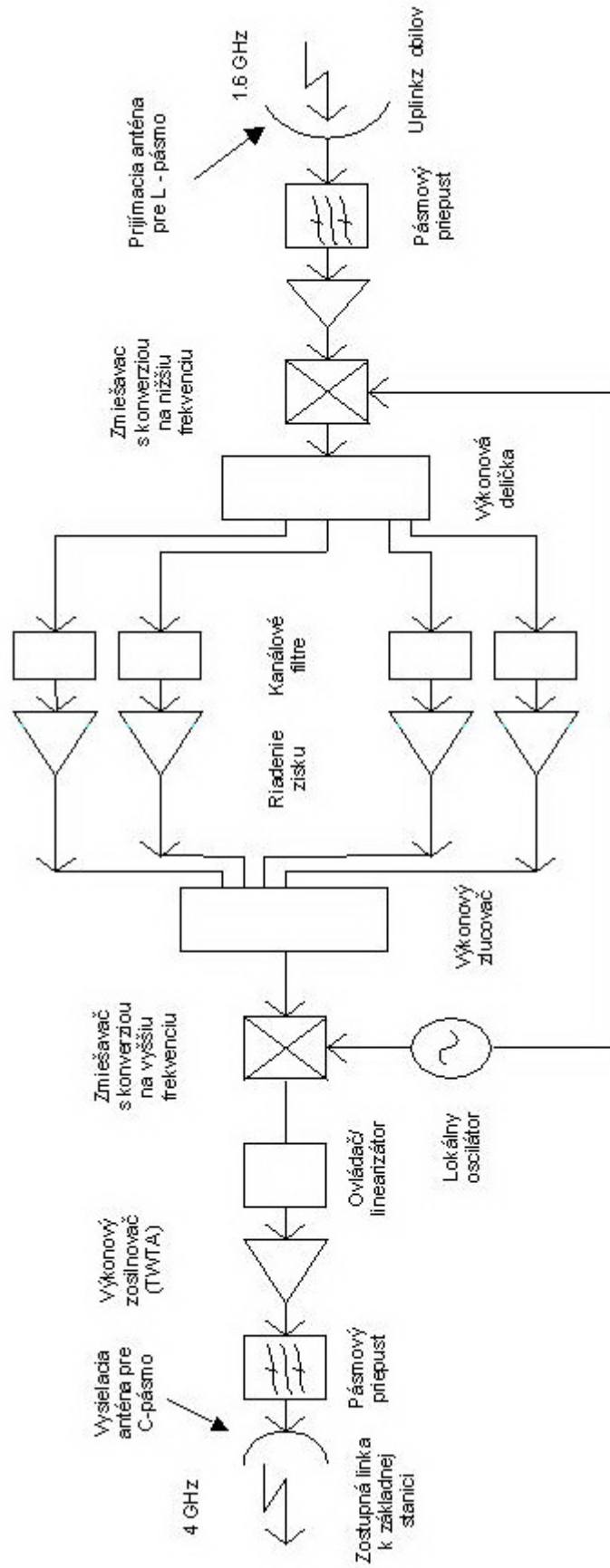
L/C pásmové transpondéry prijímajú vzostupné (uplink) signály v L pásme (1.6 GHz) z mobilných terminálov a vykonajú ich retransmisiu do zostupných (downlink) signálov do C pásma (3.6 GHz) po frekvenčnej konverzii a zosilnení signálu vykonovým zosilňovačom. Signály sú prijímané anténou v L pásme sú vedené cez dolnopriepustný filter a nízkošumový zosilňovač (LNA) do frekvenčného meniča z frekvencie 1,6 GHz na medzifrekvenciu 60 MHz. Zostava filtrov poskytuje požadované charakteristické vlastnosti pre štyri kanály. Podľa rozloženého výkonu v štyroch kanáloch, signály sú konvertované nahor z 60 MHz na 3.8 GHz.

Po zosilnení vo výkonovom zosilňovači (TWTA) je signál vedený cez pásmový filter do antény vysielajúcej v C pásme. Týmto spôsobom bol vytvorený zostupný satelitný spoj.

V apríli 1996 bol vypustený jeden zo štyroch satelitov INMARSAT-3 a štvrtý bol vypustený v júli 1997. Satelit INMARSAT-3 využíva modernú technológiu lokalizácie anténového zväzku (spotbeam) pre celosvetové hlasové a dátové komunikačné služby umožňujúcu ďalšie znižovanie mobilných terminálov, využívanie vreckové prijímačov správ na lodiach, v lietadlách a v pozemských dopravných prostriedkoch. Tento satelit dodávať EIRP nad 48 dBW v L pásme. Táto hodnota je 8-krát vyššia ako pri INMARSAT-2 a poskytuje taktiež 8-krát väčšiu kapacitu hlasových kanálov ako INMARSAT-2.



Obr. 3.12 C/L-pásmový transpondér satelitu INMARSAT-2



Obr. 3.13 L/C-pásmový transpondér satelitu INMARSAT-2

3.7 Frekvenčná interferencia

3.7.1 Koordinácia interferencie

Ako bolo spomenuté v kapitole 1, frekvenčné pásma boli medzinárodne pridelené pre všetky rádiokomunikačné služby, nielen na prenos dát cez satelit ale aj pre terestriálne služby. Väčšina frekvenčných pásiem pridelených službám cez satelit bola pridelená pre zdieľanie s terestriálnymi komunikčnými systémami. Interferencia je klasifikovaná do šiestich typov takto:

Medzi satelitom a satelitnými systémami

1. Satelit 1 k pozemnej stanici 2
2. Satelit 1 od pozemnej stanice 2

Medzi satelitom a terestriálnymi systémami

3. Satelit k terestriálnej stanici
4. Satelit od terestriálnej stanice
5. Stanica Zem k terestriálnej stanici
6. Stanica Zem od terestriálnej stanice

Za účelom využívania rovnakých frekvenčných pásem a garantovania koexistencie medzi rôznymi systémami, mnohé predpisy ako koordinácia procedúr a technické požiadavky, boli zahrnuté do Radio Regulations ITU [4]. Tabuľka 3.2 obsahuje zabezpečenie pre satelitné a terestriálne stanice, ktoré pracujú v rovnakom frekvenčnom pásme nad 1 GHz.

3.7.2 Hodnotenie interferencie

Interferenciu možno považovať za neželaný signál z iného systému a jej vplyv spôsobuje nárast ekvivalentnej šumovej teploty ΔT . Táto metóda môže byť aplikovaná na akýkoľvek satelitný komunikačný systém, ktorý je nezávislý od modulácii a presných frekvencií.

Ak pomer $\Delta T/T \geq 6\%$ interferencia môže byť spôsobená inými systémami. Výsledkom frekvenčnej koordinácie medzi systémovými operátormi vykonanej podľa pravidiel ITU, môže byť odstránenie vzniknutých interferencií.

Uvažujme interferenciu medzi systémom 1 a systémom 2. Ako je ukazané na obr. 3.14, systém 1 pozostáva zo satelitu 1 (S1) a pozemskej stanice 2 (E2). Systém 2 vytvára interferenciu v systéme 1 pri vyostupnom spoji z E2 do S1 a pri zostupnom spoji z S2 do E2.

Nárast prijatej ekvivalentnej šumovej teploty ΔT_{S12} a ΔT_{E12} pre S1 resp. E1 sa dá vypočítať podľa nasledujúcich vzťahov:

$$\Delta T_{S12} = \frac{P_{E2} \cdot G_{T2}(\Theta_{21}) \cdot g_{r1}(\Phi_{12})}{kL_{S1E2}} \quad (3.25)$$

$$\Delta T_{E12} = \frac{P_{S2} \cdot g_{T2}(\Phi_{21}) \cdot G_{R1}(\Theta_{12})}{kL_{S2E1}} \quad (3.26)$$

kde jednotlivé premenné znamenajú:

- P_{E2} : maximálna výkonová hustota (W/Hz) dodaná do antény zariadenia E2;
- P_{S2} : maximálna výkonová hustota (W/Hz) dodaná do antény zariadenia S2;
- $G_{T2}(\Theta_{21})$: zisk vysielacej antény E2 voči S1;
- $G_{R1}(\Theta_{12})$: zisk prijímacej antény E1 voči S2;
- $g_{r1}(\Phi_{12})$: zisk prijímacej antény S1 voči E2;
- $g_{T2}(\Phi_{21})$: zisk vysielacej antény S2 voči E1;
- k : Boltzmanova konštanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ watt/sec/K);
- L_{S1E2} : prenosové straty medzi zariadeniami S1 a E2;
- L_{S2E1} : prenosové straty medzi zariadeniami S1 a E2.

Nárast ekvivalentnej šumovej teploty ΔT_{12} systému 1 spôsobený interferenciou systému 2 dostaneme podľa vzťahu:

$$\Delta T_{12} = r\Delta T_{S12} + \Delta T_{E12} \quad (3.27)$$

kde r znamená úplný zisk z výstupného portu prijímacej antény zariadenia S1 voči výstupnému portu prijímacej antény zariadenia E1 v systéme 1.

Ak berieme do úvahy aj polarizáciu, tak vzťah (3.27) možno prepísať na nasledujúci s využitím koeficientov polarizačnej diskriminácie:

$$\Delta T_{12} = \frac{r\Delta T_{S12}}{Y_{up}} + \frac{\Delta T_{E12}}{Y_{down}} \quad (3.28)$$

Tabuľka 3.3 obsahuje koeficienty polarizačnej diskriminácie.

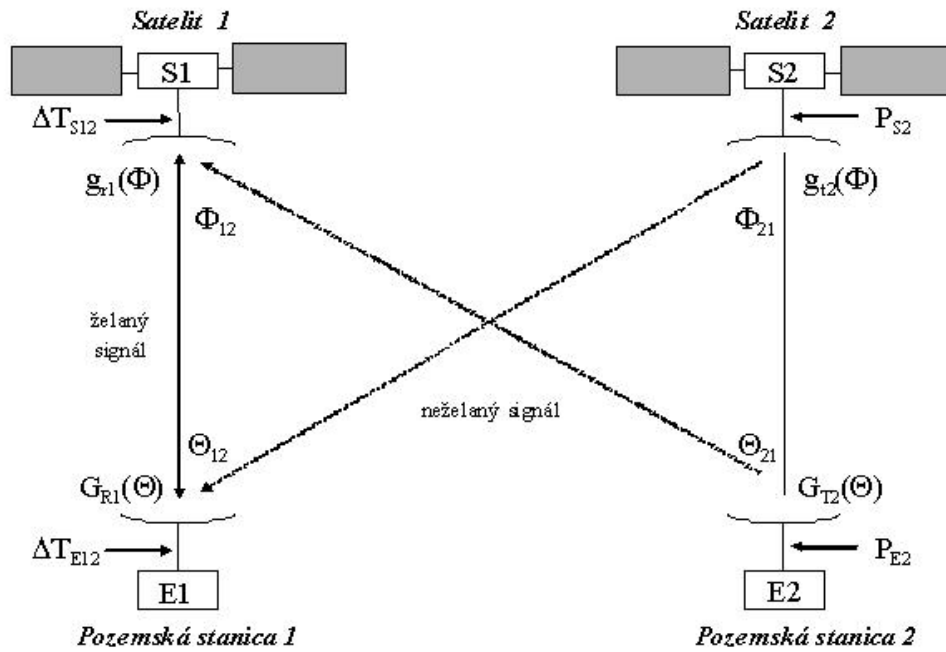
Vo vzťahu 3.28, Y_{up} a Y_{down} znamenajú koeficienty polarizačného rozlíšenia (diskriminácie) pri vzostupnom spoji resp. zostupnom spoji. Skoro vo všetkých prípadoch je koeficient vo všeobecnosti 1, pretože interferencia je vyčíslená pre najhorší prípad.

Tab 3.2 Požiadavky pre terestriálne, GEO a pozemské stanice, pracujúce v rovnakom pásme nad 1 GHz

Typ stanice		Obmedzenia		Poznámky		
Terestriálna stanica	EIRP	>1GHz	55dBW	max. hodnota	A = uhol k satelitu s prihliadnutím smerovosti antény	
		1-10 GHz	35dBW	A > 2 stupne		
		10-15GHz	45dBW	A > 1,5 stupňa		
	vstupný výkon	1-10 GHz	13dBW	max. hodnota		
		> 10GHz	10dBW			
		Frek. pásmo	Elevačný uhol (stupne)	Jednotka	Sat. Služba	
		1.69-1.7 GHz	0<E<5	5<E<25	25<E<90	meteorológia
		1.525-2.5 GHz	-133	-133	-133	výskumná činnosť
			-154	-155+0.5(E-5)	-144	rozhlás
	výkonová hustota toku na Zemi	2.5-2.69 GHz	-152	-155+0.75(E-5)	-137	meteorológia
		3.4-7.75 GHz	-152	-155+0.5(E-5)	-142	výskum
	Vesmírna stanica (GEO Satelit)	8.025-11.7 GHz	-150	-150+0.5(E-5)	-140	prieskum Zeme
		12.2-12.75 GHz	-148	-148+0.5(E-5)	-138	fixné
		17.7-19.7 GHz	-115	-115+0.5(E-5)	-195	prieskum Zeme
		31.0-40.5 GHz	-115	-115+0.5(E-5)	-195	výskum
	Udržiavacia pozícia	tolerancia +/- 0.1 stupňa				Experimentálny satelit
		tolerancia +/- 0.5 stupňa				
	presnosť smeru lúča	v rozsahu max. a nominálnej hodnoty (0.3 stupňa, 10% HPBW)				HPBW - half-power beam width
	prerušenie prenosu	výžaduje sa diaľkové ovládanie funkcií				

Tab. 3.2 (pokračovanie) Požiadavky pre terestriálne, GEO a pozemné stanice, pracujúce v rovnakom pásme nad 1 GHz

Typ stanice	Obmedzenia	Poznámky
obmedzenia EIRP	1-15 GHz 40 dBW/4 kHz 40+3E dBW/4kHz >15 Ghz 64 dBW/1 MHz 64+3E dBW/1 MHz 3 stupne	E = elevačný uhol k satelitu 0 < E < 5 st. Bez obmedzenia nad 5 st. E < 0 st. 0 < E < 5 st.
Pozemná stanica	Min. elevačný uhol	0 < ϕ < ϕ_m D - polomer antény $\phi_m < \phi < \phi_r$ λ - vlnová dĺžka $\phi_r < \phi < 48$ ϕ - smer lúča (v stupňoch) 48 < $\phi < 180$ G1 - zisk 1. bočného laloka $\phi_m = -G_1 + 20 \lambda \sqrt{G_{max}} / D$
vyžarovacia charakt. Antény	D/ λ < 100 (max. zisk < asi 48 dB) $G(\phi) = G_{max} - 2.5 \times 10^{-3} (D \phi / \lambda)^2$ (dBi) $G(\phi) = G_1$ (dBi) $G(\phi) = 32 - 25 \log(\phi)$ (dBi) $G(\phi) = -10$ (dBi)	0 < ϕ < ϕ_m $\phi_r = 15.85(D/\lambda) - 0.6$ $\phi_m < \phi < \phi_r$ $\phi_r < \phi < 48$ 48 < $\phi < 180$



Obr. 3.14 Interferencia medzi dvoma satelitnými systémami

Tab. 3.3 Koeficient polarizačných rozlíšení

Polarizácia Systém 1	Systém 2	Polarizačné rozlíšenie Koeficient Y
LHC	RHC	4
LHC	L	1.4
RHC	L	1.4
LHC	LHC	1
RHC	RHC	1
L	L	1

Poznámka: LHC - ľavotočivá kruhová polarizácia, RHC - pravotočivá kruhová polarizácia

Príklad 3.8

Uvažujeme dva satelitné systémy. Systém 1 pozostáva zo satelitu 1 (S1) a pozemnej stanice 1 (E1) a systém 2 zo satelitu 2 (S2) a pozemnej stanice 2 (E2). Obidva systémy pracujú v C pásme (6 GHz) a iba vzostupný spoj systému 2 môže spôsobovať interferenciu v systéme 1. Zostupný spoj S2 do E1 nespôsobuje interferenciu. Vzostupný spoj z E2 môže spôsobovať

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

interferenciu v satelite 1, ako to naznačuje obrázok 3.14. Úplná šumová teplota v systéme 1 je 80 K.

Nasledujúce parametre boli využité pri výpočte a majú rovnaký zápis ako v obr. 3.14:

System 1

Satelit 1 (S1)

Pozícia	150 stupňov východne
Zisk antény voči E2	$g_{r1}(\Phi 12) = 21$ (dBi)
Zisk antény voči E1	$g_{r1}(0) = 22$ (dBi)
Zisk transpondéra	110 (dB)
Prenosové straty z S1 do E1 (37 270km)	199.4 (dB)

Pozemná stanica 1 (E1)

Zisk antény voči S1	$G_{R1}(0) = 50$ (dBi)
---------------------	------------------------

System 2

Satelit 2 (S2)

Pozícia	145 stupňov východne
---------	----------------------

Pozemná stanica 2 (E2)

Pozícia	132.5 stupňov východne
	43 stupňov severne
Zisk antény voči S1	$G_{T2}(\Theta 21) = 13.4$ (dBi)
Vysielaný výkon	$P_{E2} = - 33$ (dBW/Hz)
Prenosové straty z E2 do S1 (37 991km)	199.5 (dB)

Využitím vzťahu (3.25) môžeme nárast prijatej ekvivalentnej šumovej teploty ΔT_{S12} vypočítať nasledovne:

$$\begin{aligned}\Delta T_{S12} &= \frac{P_{E2} G_{T2} (\Theta_{21}) g_{r1} (\Phi_{12})}{kL_{S1E2}} \\ &= \frac{10^{-33.4/10} \times 10^{13.4/10} \times 10^{21/10}}{1.38 \times 10^{-23} \times 10^{-199.5/10}} = 1000 \quad (\text{K})\end{aligned}$$

Z toho vyplýva, že nárast úplnej ekvivalentnej šumovej teploty podľa (3.27) je:

$$\Delta T_{12} = r\Delta T_{S12} + \Delta T_{E12} = 10^{(110+22-199.4+50)/1000} = 18.2 \quad (\text{K})$$

Pri použití tohto výrazu (3.27) sme neuvažovali člen ΔT_{E12} pretože downlink z S2 do E1 nespôsobuje interferenciu. Pomer medzi nárastom šumovej teploty a systémom bez interferencie je:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{18.2}{80} = 22.8\% \geq 6\%$$

Preto frekvenčná koordinácia medzi dvoma systémami musí byť vykonaná.

3.7.3 Metódy na redukciu interferencie

- Vzostupný spoj (interferencia medzi E2 a S1):
 - redukcia EIRP v E2
 - nárast EIRP v E1
 - zlepšenie vyžarovacej charakteristiky antény v E2
 - zlepšenie polarizačného rozlíšenia

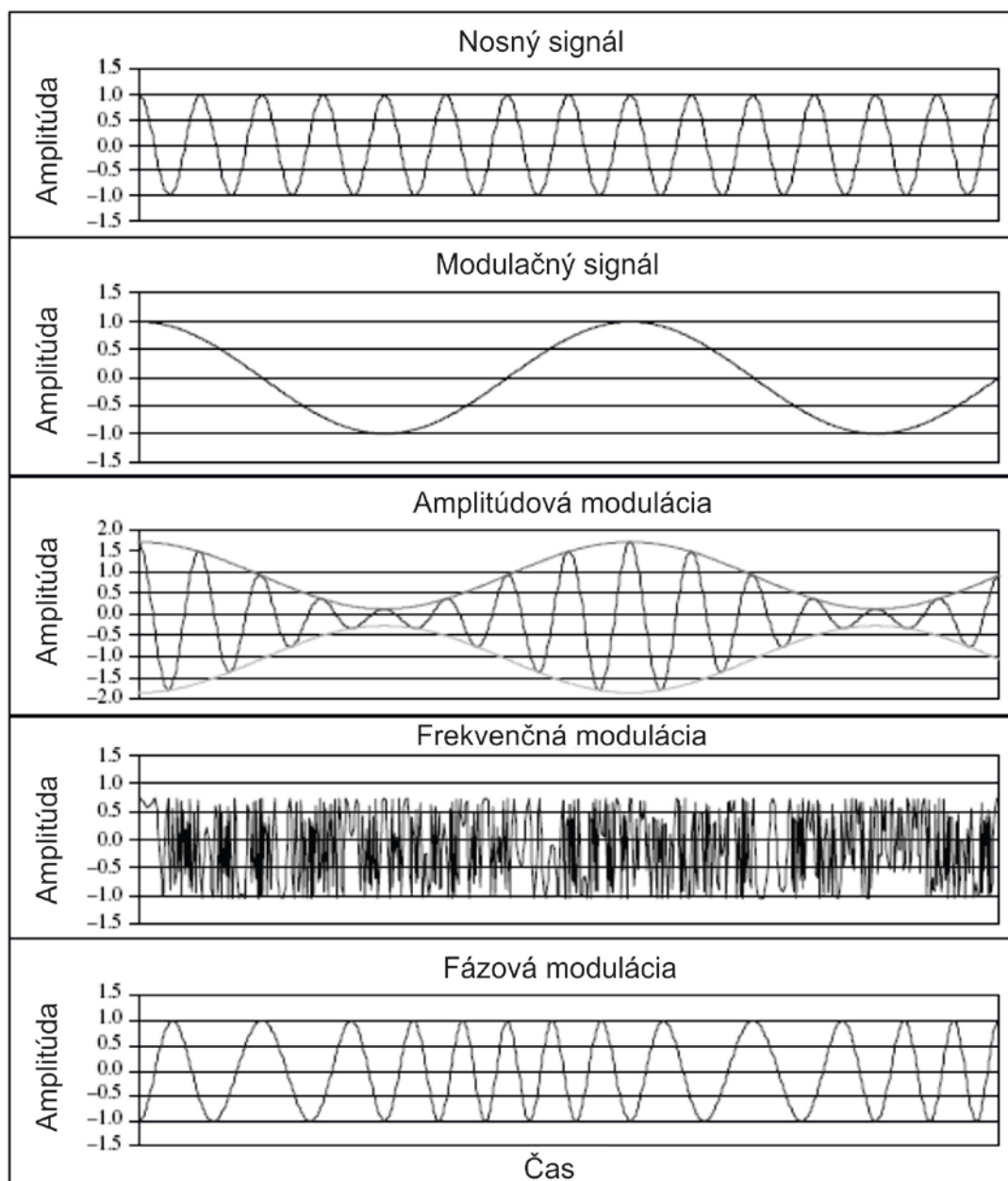
- zaviesť rozptýlenie energie
- vybrať umiestnenie E2
- obmedziť operácie systému v E2
- obmedziť nosné v E2
- alokovať nosné z E2
- zmeniť pozíciu satelitu na orbite
- Zostupný spoj (interferencia medzi S2 a E1):
 - redukcia EIRP v S2
 - nárast EIRP v S1
 - zlepšenie vyžarovacej charakteristiky antény v S2
 - zlepšenie polarizačného rozlíšenia
 - zaviesť rozptýlenie energie
 - odklonenie lúča antény v S1
 - obmedziť nosné v E2
 - alokovať nosné z E2

3.8 Literatúra

- [1] Nyquist, H., "Thermal Agitation of Electric Charge in Conductor", Physical Review, Vol. 32, July 1928, pp. 110-113
- [2] Stutzman, W. L. and G.A. Thiele, Antenna Theory and Design, New York, NY: John Wiley & Son, 1981, p. 59
- [3] Ohmori, S., et al., "Experiments on Aeronautical Satellite Communications Using ETS-V Satelliet," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 28, No. 3, July 1992, pp. 788-796
- [4] Radio Regulations, Articles 11, 27 and 28.

4 Charakteristiky satelitného spoja a modulácie pre prenos

Hlavné komponenty prenášaného signálu zahŕňujú nosnú vlnu a modulačný signál. Nosná vlna je spojitá sínusová vlna, ktorá neobsahuje informáciu. Modulačný signál je oznamovací signál, ktorý je prenášaný na nosnej vlně. Môže modulovať (zmeniť) amplitúdu, frekvenciu a fázu nosnej vlny, čo vedie k rôznym modulačným schémam: amplitúdová modulácia (AM), frekvenčná modulácia (FM) a fázová modulácia (PM). Demodulátor na prijímacom konci dokáže oddeliť oznamovací signál.



Obr. 4.1 Nosné vlny, modulačné signály a modulované signály

od nosnej vlny pomocou demodulačného procesu, ktorý závisí od modulačnej schémy použitej na prenos. Na obr. 4.1 sú zobrazené rôzne modulačné procesy. Modulácie umožňujú prenos oznamovacích signálov na nosnej frekvencii. Môžu byť použité na zabezpečenie mnoho násobného prístupu na rádio frekvenčných pásmo vo frekvenčnej oblasti.

Mimo modulačného signálu, podmienky satelitného propagačného kanálu môžu tiež spôsobiť zmeny amplitúdy, frekvencie alebo fázy nosnej frekvencie. Takže, môže spôsobiť prenosové chyby. Na opravu čo najväčšieho množstva chýb, ktoré sa vyskytli počas prenosu je potrebné mať kódovací systém opravy chýb.

4.1 Charakteristika satelitného spoja

Oproti káblu, sa nedá kvalita satelitného spoja riadiť. Satelitné spoje môžu spôsobiť prenosové poruchy, ktoré závisia od nasledujúcich činiteľov:

- Prevádzková frekvencia: keď dochádza k tlmeniu signálu plynovou absorpciou, tak závažnosť troposférického porúch sa zvyšuje s frekvenciou.
- Elevačný uhol antény a polarizácia: dĺžka prenosovej cesty prechádzajúcej cez troposféru sa mení inverzne s elevačným uhlom. Podľa toho, prenosové straty, šum a depolarizácia sa tiež zvyšujú so znižujúcim sa elevačným uhlom. Tlmenie dažďom je mierne závislé od polarizácie. Depolarizácia je tiež polarizačne citlivá, najcitlivejšia je pri kruhovej polarizácii.
- Nadmorská výška pozemskej stanice: v prenosovej ceste od vyššie položených staníc je v satelitnom spoji menej troposféry, preto je aj sv satelitnom spoji menej zhoršení.
- Šumová teplota pozemskej stanice: predstavuje pomer šumovej teploty prostredia (oblohy) k šumovej teplote systému, teda vplyv šumu prostredia (oblohy) na pomer signál/šum dostupného spoja.
- Lokálna meteorológia: množstvo a vlastnosti zrážok v blízkosti pozemskej stanice sú hlavnými činiteľmi pri určovaní frekvencie a väčšiny prenosových výpadkov.
- Hodnota účinnosti (G/T): hodnoty účinnosti vyjadruje efektívnosť prijímača; G je celkový zisk v decibeloch a T je šumová teplota vyjadrená v decibeloch vzhľadom k 10 K. Preto je G/T vyjadrená v decibeloch, s pridaným symbolom dB/K na označenie Kelvinovej stupnice.

Strata vo voľnom priestore je hlavná výkonová strata vzhľadom na dlhý čas šírenia sa signálu satelitným spojom. Aj keď je väčšia ako všetky ostatné straty, aj tieto môžu zohrať dôležitú úlohu v pridaných dB. Na frekvenciách 10 GHz a viac môžu byť významné straty v dôsledku atmosférickej absorpcie a dažďa. Na týchto frekvenciách, sa elektromagnetické vlny navzájom ovplyvňujú a rezonujú s molekulami atmosférických plynov, čo spôsobuje útlm signálu. Najhlavnejší rezonančný útlm sa vyskytuje na frekvencii 22,235 GHz v dôsledku

vyparovania vody a medzi 53 až 65 GHz v dôsledku prítomnosti kyslíka. Strata na ostatných frekvenciách je zvyčajne malá (menej ako 1 dB). Tieto atmosférické straty sa dajú vypočítať a zahrnúť do energetickej bilancie satelitného spoja pre určenie ich vplyvu na celkovú kvalitu. Na nižších frekvenciách ako 1 GHz, dominujú predovšetkým straty spôsobené viaccestným šírením a scintiláciou. Faradayová rotácia sa stane značnou vďaka celkovému počtu elektrónov v atmosfére, ale použitím správnej polarizácie sa dajú vo vysokoziskových komunikáciách, tieto straty riadiť.

4.2 Modulačné techniky

Ako príklad môžeme matematicky opísať nosnú vlnu nasledovne:

$$c_r(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$$

Kde A_c je amplitúda nosnej vlny a f_c je nosná frekvencia.

Amplitúdovo modulovanú vlnu môžeme zapísať ako:

$$s(t) = [A_c + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

kde $m(t)$ je signál a k_a je amplitúdová citlivosť modulátora.

Frekvenčne modulovanú vlnu môžeme opísať ako:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi(f_c + k_f m(t))t]$$

kde k_f je frekvenčná citlivosť modulátora.

Fázovo modulovanú vlnu môžeme zapísať nasledovne:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$$

kde k_p je fázová citlivosť modulátora.

Vo frekvenčne modulovanej vlne, kde $\theta_f(t) = 2\pi(f_c + k_f m(t))t$, je vidieť, že $m(t)$ spôsobuje zmenu frekvencie $\Delta f = k_f m(t)\Delta t$, ktorá je ekvivalentná zmene fázy $\Delta\theta_f = 2\pi(f_c + \Delta f)\Delta t = 2\pi[f_c + k_f m(t)]\Delta t$, takže:

$$\frac{d\theta_f(t)}{dt} = 2\pi f_c + 2\pi k_f m(t) \text{ a } \theta_f(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(t) dt$$

t.j. frekvenčne modulovaná vlna je vytvorená použitím nosnej frekvencie a integráciou oznamovacieho signálu.

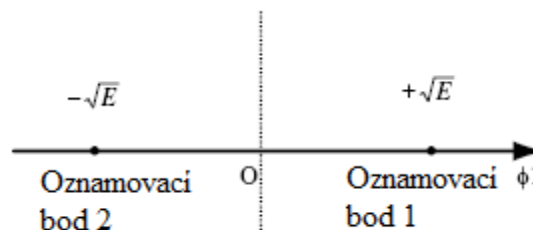
Vo fázovo modulovanej vlne, $\theta_p(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t)$, t.j. fázovo modulovaná vlna je vytvorená použitím nosnej frekvencie a oznamovacieho signálu. Teda fázovo modulovaná vlna môže byť odvodená z frekvenčne modulovanej vlny a naopak. Fázová modulácia a frekvenčná modulácia sú tiež nazývané uhlové modulácie.

4.2.1 Fázové kľúčovanie (PSK)

Keďže podmienky satelitného spoja sa môžu meniť počas prenosu pre digitálny prenos, tak nadmorská výška prenosu sa tiež môže meniť s podmienkami linky. Je ťažké použiť AM. FM je ťažko realizovateľná a nie je dostatočne účinná pri využití šírky pásma. V porovnaní s AM a FM schémami, má PM výhody ako FM a navyše je ľahko realizovateľná. Preto sa pre satelitný prenos používa PM. Pre tento účel bolo vyvinutých mnoho rôznych schém PM líšiacich sa výkonom, frekvenciou a efektívnosťou realizácie.

Najjednoduchšiu moduláčnú schému predstavuje BPSK, ktorá je schopná prenášať jeden bit v perióde nosnej frekvencie. Čím je vyšší rád modulácie, tým je väčšia efektívnosť šírky pásma. Napríklad QPSK je schopná preniesť dva bity v perióde nosnej frekvencie pre tie isté E_b/N_0 hodnoty, ale na úkor chybového výkonu.

Proces demodulácie resp. detekcie sa nazýva koherentná demodulácia alebo koherentná detekcia, keď je oscilátor presne koherentný alebo synchronný vo frekvencii či fáze, s nosnou vlnou použitou pre moduláciu. Inak sa tento proces nazýva nekoherentná demodulácia alebo nekoherentná detekcia, kde sa použijú na demoduláciu rôzne techniky využívajúce prispôbené filtre.



Obr. 4.2 Signálovo-priestorový diagram pre koherentnú BPSK

4.2.2 Binárne fázové kľúčovanie (BPSK)

V koherentnom binárnom PSK (BPSK) systéme je dvojica signálov použitá na zastúpenie binárnych symbolov 0 a 1 definovaná nasledovne:

$$\begin{cases} s_1 = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \\ s_2 = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \end{cases}$$

Tieto môžu byť uvedené v signálovo-priestorovom diagrame so základnou funkciou jednotkovej energie:

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

Na obr.. 4.2. je znázornený signálovo-priestorový diagram pre koherentnú BPSK

4.2.3 Kvadrátúrny PSK (QPSK) modulačný systém

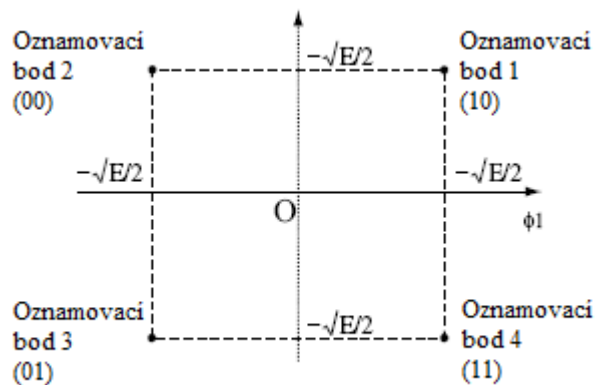
Podobne aj pri koherentnom kvadrátúrnom PSK (QPSK) systéme, sú 4 signálové vektory opísané nasledovne:

$$s_i = \begin{bmatrix} \sqrt{E} \cos\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right) \\ -\sqrt{E} \cos\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \quad i=1,2,3,4$$

Tieto môžu byť reprezentované v signálovo-priestorovom diagrame s dvomi ortogonálnymi základným funkciami jednotkovej energie.

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad \text{a} \quad \phi_2 = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \sin(2\pi f_c t)$$

Na obr.4.2 je ukázaný signálovo-priestorový diagram pre koherentné QPSK.



Obr. 4.3: Signálovo-priestorový diagram pre koherentné QPSK

4.2.4 Gaussovo – filtrované minimálne kľúčovanie (GMSK)

Pre zlepšenie využitia šírky pásma a chybovosti sa môžu použiť dve techniky : minimálny fázový posun a tvarovanie obdĺžnikového impulzu Gaussovým filtrom..

Nech W označuje 3 dB základné pásmo filtra pre tvarovanie impulzov. Prenosová funkcia $H(f)$ a impulzová odozva $h(t)$ impulzového filtra sú definované nasledovne:

$$H(f) = \exp\left(-\frac{\log 2}{2} \left(\frac{f}{W}\right)^2\right)$$

a

$$h(f) = \sqrt{\frac{2\pi}{\log 2}} \exp\left(-\frac{2\pi^2}{\log 2} W^2 t^2\right)$$

Odozvy Gaussovho filtra na obdĺžnikový impulz jednotkovej amplitúdy a trvania T_b (centrované v začiatku) sú dané v nasledujúcom tvare:

$$g(t) = \int_{T_b/2}^{T_b/2} h(t-\tau) d\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{\log 2}} W \int_{T_b/2}^{T_b/2} \exp\left(-\frac{2\pi^2}{\log 2} W^2 (t-\tau)^2\right) d\tau$$

Impulzová odozva $g(t)$ predstavuje frekvenčne tvarovaný impulz GMSK modulátora, s bezrozmernými súčinnmi čas-šírka pásma WT_b hrajúce úlohu návrhového parametra.

Keď sa súčin WT_b znižuje, tak sa zväčšuje časové rozprestretie frekvenčne tvarovaného impulzu. Obmedzovacia podmienka $WT_b = \infty$ zodpovedá obvyčajnej MSK a keď je WT_b menšia ako jednotka, tak sa v prípustnom pásme GMSK signálu koncentruje čoraz viac vysielaného signálu.

4.3 Bitová chybovosť (BER): parameter kvality modulačných schém

Prírodné sa bitová chybovosť vyskytuje v satelitnom kanáli počas prenosu. Bitová chybovosť závisí od pomeru signál/šum na vstupe prijímača. Pre prijateľnú úroveň BER sa musí zabezpečiť na strane prijímača určitý minimálny pomer S/N a tomu zodpovedajúci pomer signál/šum musí byť udržiavaný na vysielači.

Vzťah medzi C/N a BER kanála je mierou výkonnosti pre digitálny spoj. Vypočíta sa z pomeru výkonu nosnej vlny a výkonu šumu C/N_0 pre konkrétnu modulačnú schému podľa nasledujúcich vzťahov:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0} - \log_{10}(\text{Dátová_rýchlosť})$$

alebo

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} - \log_{10}(\text{Dátová_rýchlosť} \cdot \text{šírka pásma}) \quad (4.37)$$

Pomer prenosovej rýchlosti a šírky pásma R/B sa nazýva spektrálna účinnosť alebo efektívna šírka pásma danej modulácie. Pre danú šírku pásma musí byť hodnota E_b/N_0 dostatočne veľká, aby sa dosiahla prenosová rýchlosť s dobrým chybovým výkonom v termínoch bitovej chybovosti alebo pravdepodobnosti bitovej chyby. Na výpočet symbolovej chybovosti existujú chybové funkcie. Počet bitov na symbol je $\log_2(M)$, kde M označuje počet kódovaných úrovní modulačnej schémy. Bitová chybovosť p_b a symbolová chybovosť P_s sú vo vzájomnom vzťahu podľa nasledujúceho vzorca:

$$p_b = \frac{P_s}{\log_2(M)} \quad (4.38)$$

Teoreticky sa dá chybová výkonnosť vypočítať pomocou Gausovho rozloženia pravdepodobnosti ako:

$$P(X > \mu_x + \partial_x) = Q(y) = \int_y^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz$$

$$Q(0) = 1/2, \quad Q(-y) = 1 - Q(y), \quad \text{ke } y \geq 0$$

$$\text{erfc}(-y) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^\infty e^{-z^2} dz = 2Q(\sqrt{2}y)$$

V tab. 4.1 sú ukázane chybové výkonnosti spoločné pre známe modulačné schémy.

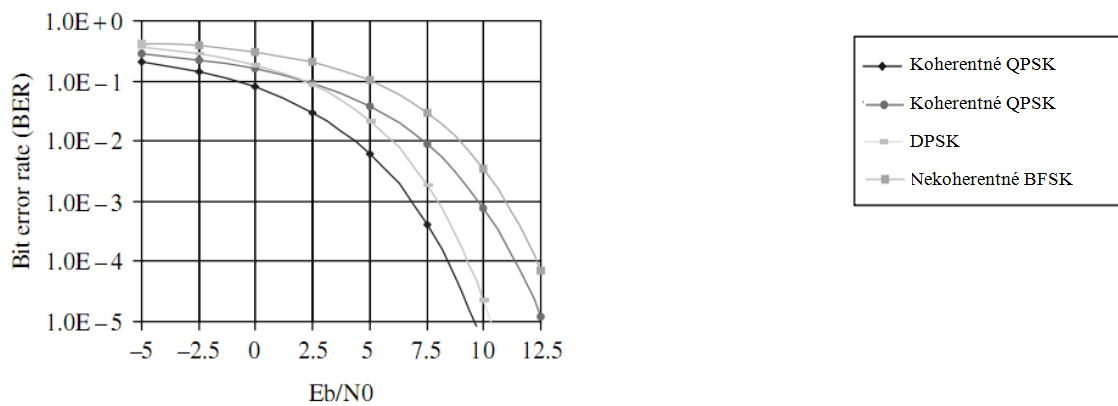
Na obr. 4.3 sú zobrazené niektoré výsledky, ktoré boli vypočítané pomocou vzťahov uvedených v tab. 4.1.

4.4 Satelitné siet'ovanie na fyzickej vrstve

V rámci referenčného protokolového modelu sa satelitné siet'ovanie začína z fyzickej vrstvy. Fyzická vrstva prijíma dáta zo spojovej vrstvy, potom prenáša rámec v tvare bitového toku (strímu) prostredníctvom satelitu. V závislosti od realizácie satelitného komunikačného zariadenia, môže transparentný satelit jednoducho postúpiť rádiový signál zo vzostupného spoja na zostupný, alebo rádiový signál môže byť spracovaný palubným procesorom (OBP) a ďalej postúpený na zostupný spoj. Moderné satelity majú dokonca viac technicky zložitejšie komunikačné zariadenia obsahujúce prepojovacie a smerovacie funkcie.

Tab. 4.1: Modulačné metódy

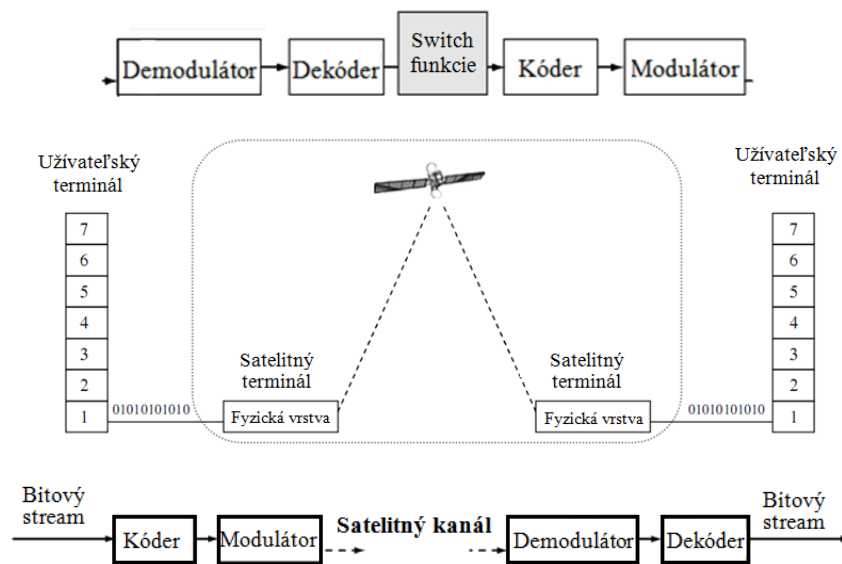
Modulačné schémy	P_E (symbol)
Koherentné QPSK Koherentné BPSK Koherentné MPSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_0})$
MSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/N_0})$
GMSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha E_b/2N_0})$
Kde α je konštantou časovo závislou na šírke pásma	
Koherentné BFSK	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{E_b/2N_0})$
Nekoherentné DPSK	$\frac{1}{2} \exp(-E_b/N_0)$



Obr. 4.4: Šumová výkonnosť modulačných schém

Ďalej sa zameriame sa na fyzickú vrstvu slúžiacu na prenos a príjem bitových tokov a rádiových signálov cez satelit. Na obr. 4.15 sú zobrazené funkcie fyzickej vrstvy satelitného sieťovania v kontexte protokolového referenčného modelu. Ako je vidieť užívateľský terminál generuje bitový tok. Kóдеры spracovávajú tok s kódovacou funkciou s korekciou chýb a s funkciou kanálového kódovania. Modulátor využíva kódovaný signál korekciou chýb s Procesom kódovania bitového toku s korekciou chýb kódovacej funkcie a funkciou kódovania kanála. Modulátor prijíma kódovaný signál, ktorým moduluje nosnú vlnu, aby sa tak preniesol signál cez satelitný spoj. Na druhej strane satelitnej siete nastáva opačný postup spracovania signálu ešte pred dodaním bitového toku k ďalšiemu užívateľskému terminálu V rámci satelitnej siete je spracovanie pre užívateľa transparentné, čo zahŕňa rôzne funkcie ako OBP alebo aj medzi satelitné spojenie.

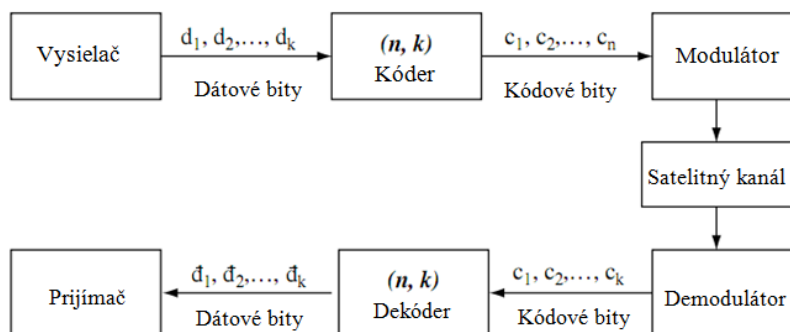
V káblovej sieti môže byť digitálny bitový tok kódovaný do signálov v základnom pásme a prenášaný priamo po kábli. Avšak satelit využíva pre prenos rádiové spoje, preto je nutná modulácia, ktorá umožní prenášať signál cez rádiový kanál alebo cez nosný signál. Navyše kódovanie opravy chýb sa používa pred kanálovým kódovaním, aby sa opravili možné prenosové chyby. Zlepšenie kvality prenosu sa dosiahne zmenšením pravdepodobnosti chyby.



Obr. 4.5: Bloková schéma fyzickej vrstvy funkcií satelitných sietí

4.5 Dopredná chybová korekcia (FEC)

FEC technika zavádza redundanciu do prenášaných dát. Čo sa využíva sa pri prijímaní dát prijímačom, kde sa pomocou redundancie zisťujú a opravujú chyby spôsobené prenosom znázornené na obrázku 4.6. FEC kódy sa skladajú z celého radu tried. Stručne si opíšeme len niektoré z nich včítane lineárnych blokových kódov, cyklických, trellisových, turbo a konvolučných kódov.



Obr. 4.6: Kódovanie pomocou FEC

4.5.1 Lineárne blokové kódy

Blokové kódy sú bezpamäťovými kódmi, kde k vstupných binárnych signálov sa kóduje na n výstupných binárnych signálov, kde $n > k$ kvôli redundancii.

Položme $m = [m_0, m_1, \dots, m_{k-1}]$ sú bity správy, $b = [b_0, b_1, \dots, b_{n-k-1}]$ a P sú $k \times (n - k)$ koeficientmi známe pre vysielateľ aj prijímač, kde paritné bity vieme vygenerovať nasledujúcim spôsobom.

$$b = mP \quad (4.39)$$

Ak kódové slovo $c = [b/m]$ je odvysielané, sme schopní objaviť a následne opraviť chybu pomocou vzorca (4.39).

Príkladom lineárneho kódera je Hammingov kóder (n, k) , kde dĺžka bloku je $n = 2^r - 1$, počet bitov správy $k = 2^r - r - 1$ (alebo $k + r - 1 = 2^r$) a hodnota paritných bitov je $n - k = r$.

Bose-Chaudhuri-Hocquenghem kód (BCH) je trieda lineárnych blokových kódov s parametrami: dĺžka bloku $n = 2^m - 1$, počet bitov správy $k \geq (n - mt)$ a minimálna vzdialenosť $d_{\min} = 2t + 1$, kde m je ľubovoľné celé číslo a $t = (2^m - 1)/2$ je maximálna hodnota detekcie chyby.

Reed-Solomon kód (RSC) patrí do podskupiny nebinárnych BCH kódov. Ľubovoľný RSC kóder (n, k) používa na zakódovanie m bitových symbolov do blokov pozostávajúcich z $n = (2^m - 1)$ symbolov = $m(2^m - 1)$ bitom. Pri t -násobnej oprave RSC kódu obsahuje parametre: dĺžka bloku je $n = (2^m - 1)$ symbolov, veľkosť správy je k symbolov, paritná veľkosť je $(n - k) = 2t$ symbolov a minimálna vzdialenosť je $d_{\min} = 2t + 1$ symbolov.

4.5.2 Cyklické kódy

Nech $g(X)$ je polynóm najnižšieho stupňa $(n - k)$ nazývaný generujúci polynóm cyklického kódu definovaný nasledovne:

$$g(X) = 1 + \sum_{i=1}^{n-k-1} g_i X^i + X^{n-k}$$

Nech $m(X) = m_0X^1 + m_1X^2 + \dots + m_{k-1}X^{k-1}$ a $b(X) = b_0X^1 + b_1X^2 + \dots + b_{n-k-1}X^{n-k-1}$, potom môžeme rozdeliť $X^{n-k}m(X)$ generujúcim polynómom $g(X)$, aby sme získali zvyšok $b(X)$ a pripočítaním $b(X)$ k $X^{n-k}m(X)$ sa získa $c(X)$. Cyklické kódovanie sa často využíva na zisťovanie chýb, pretože má schopnosť detekovať chybový zhuk. Nazýva sa tiež cyklický redundantný kontrolný kód (Cyclic redundancy check code) CRC .

V tab.4.2 sú uvedené vybrané používané CRC kódy. Binárne (n, k) CRC kódy sú schopné nájsť nasledovné vzorové chyby:

- Všetky chyby dĺžky rovnaj alebo menšej ako $(n - k)$.
- Časť chýb dĺžky rovnaj $(n - k + 1)$, kde podiel sa rovná alebo je väčší ako $1 - 2^{-(n-k-1)}$.

Tab. 4.2 CRC kódy

Kód	Generátor polynómu $g(X)$	$n - k$
CRC-12 kód	$1 + X + X^2 + X^3 + X^{12} + X^{16}$	12
CRC-12 kód (USA)	$1 + X^2 + X^{15} + X^{16}$	16
CRC-ITU kód	$1 + X^5 + X^{12} + X^{16}$	16

- Všetky kombinácie z $(d_{\min} - 1)$ alebo menej chýb, kde d_{\min} je minimálna vzdialenosť lineárneho blokového kódu. Vzdialenosť d_{\min} je definovaná ako rozdielové číslo polohy páru kódových vektorov taktiež nazývané aj Hammingová vzdialenosť.
- Všetky nepárne chybové vzorky generujúceho polynómu $g(X)$ majú v kóde páry počet nenulových koeficientov.

4.5.3 Trellisové kódovanie a konvolučné kódy

Trellisové kódy využívajú pamäť na zapamätanie si $(K - 1)$ vstupných signálov bezprostredne predchádzajúcich cieľovému bloku vstupných signálov. Tieto $(K - 1) + L = (K + L - 1)$ vstupné binárne signály sa používajú na generovanie $n[(K - 1) + L]$ výstupných signálov korešpondujúcich s L vstupnými signálmi. Preto je kódová rýchlosť rovná $L / [n(K + L - 1)]$.

Konvolučné kódovanie je podskupinou trellisových kódov. Konvolučný kóder môže spájať do konečnej finálnej dĺžky $(k - 1)$ bitov správy. V čase j , keď časť sekvencie správy obsahuje najčerstvejšie k bity $(m_{j-k+1}, m_{j-k+2}, \dots, m_{j-1}, m_j)$, kde m_j je aktuálny bit. Konvolučný dekodér berie do úvahy využívanú pamäť, kedy sa pokúša odhadnúť najpodobnejšiu postupnosť dát, ktoré produkujú prijatú postupnosť bitov kódu. Tento postup je považovaný za

najbezpečnejší pre dekódovanie konvolučných kódov. V roku 1967 Andrew Viterbi vynášiel techniku dekódovania konvolučných kódov využívajúcu túto metódu, ktorá sa odvtedy stala štandardom na dekódovanie konvolučných kódov.

4.5.4 Zreťazené kódy

Lineárne blokové kódery sú účinnejšie na opravu chýb a konvolučné kódery sú účinnejšie na odstránenie náhodných chýb, avšak môžu produkovať chyby, ak je tých náhodných chýb príliš veľa. V roku 1974, Joseph Odenwalder kombináciou týchto dvoch kódovacích techník dospel k vytvoreniu zreťazených kódov.

Usporiadanie blokov je nasledovné: blok kódu je používaný ako interný kód, potom nasleduje konvolučný kód, ako externý kód pre kódovanie; na dekódovanie, ako prvý nasleduje vonkajší konvolučný kód, a ako druhý nasleduje vnútorný blok kódu.

Výkonnosť kódovania môže byť zvýšená, ak prekladacie techniky zmierňujú oddeľovanie medzi dvoma kódovanými etapami, ktoré by sa mohli riešiť efektívne pre dlhé bloky kódu.

Vkladacie techniky sú mapovacie vstupno-výstupné funkcie, ktoré obmieňajú poradie bitov alebo symbolov, takže vloženie bitového toku je nezávislé od pôvodného bitového toku, a oddeľovanie chýb môže byť rozdelené do jednej náhodnej neprekladanej chyby bitového toku. Zariadenie alebo funkčný blok techniky prekladania sa nazýva interliver.

4.5.5 Turbo kódy

Turbo kódy sú najsilnejšie FEC, vyvinuté v roku 1993 Claudom Berrym. Umožňujú prenos komunikácie bližšie k Shannonovej hranici. Turbo kód sa skladá z dvoch kodérov a jedného interlivera, aby vonkajšie informácie, ktoré sú použité rekurzívne, maximalizovali pravdepodobnosť toho, že dáta sú správne dekódované. Každý z týchto dvoch kódov môže byť súčasťou akéhokoľvek súčasného kódera. Nebudeme zachádzať do detailov turbo kódov, budeme si iba ilustrovať koncept týchto turbo kódov a dekódov na obr. 4.7 a 4.8.

Kóder je jednoduchý a priamy. Dekodér je zložitejší, kde sú extrinzické informácie využívané rekurzívne. Najvhodnejšia ukážka tejto koncepcie je zavedenie mäkkého odhadu $x=[d_1,d_2,d_3,d_4]$ v dekodéri 1, vyjadreného ako logaritmus pomeru pravdepodobnosti:

$$l_1(d_i) = \log \left(\frac{P(d_i = 1 | x, y, \tilde{l}_2(x))}{P(d_i = 0 | x, y, \tilde{l}_2(x))} \right) \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$l_2(d_i) = \log \left(\frac{P(d_i = 1 | x, y, \tilde{l}_1(x))}{P(d_i = 0 | x, y, \tilde{l}_1(x))} \right) \quad i=1, 2, 3, 4$$

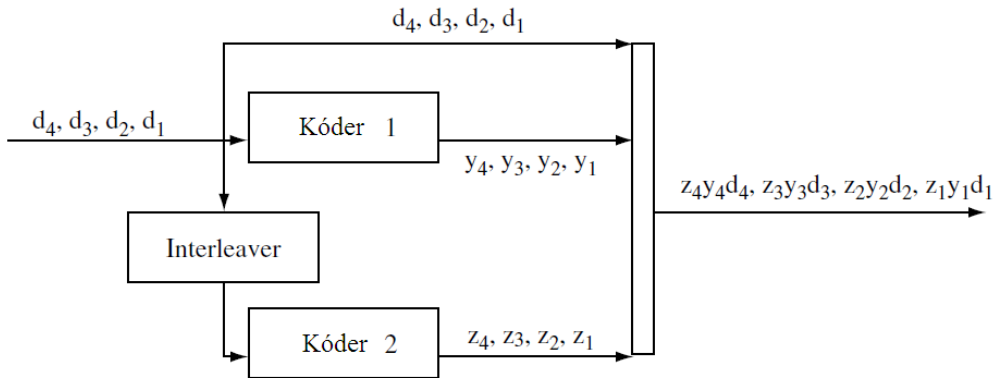
$$l_1(x) = \sum_1^4 l_1(d_i), \tilde{l}_1(x) = l_1(x) - \tilde{l}_2(x)$$

$$l_2(x) = \sum_1^4 l_2(d_i), \tilde{l}_2(x) = l_2(x) - \tilde{l}_1(x)$$

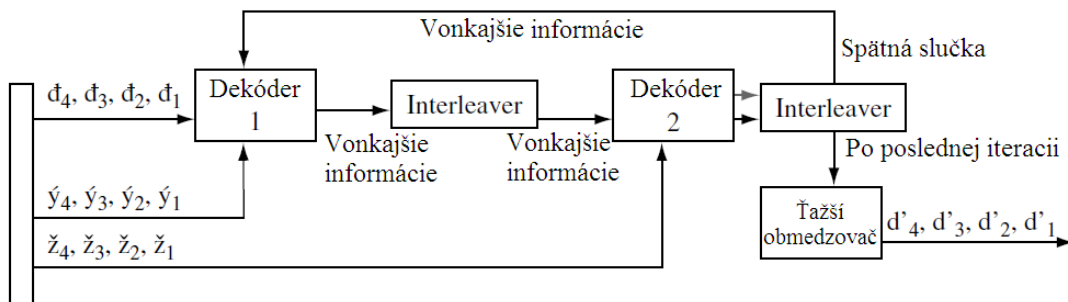
kde $l_2(x)$ je nastavené na 0, pre prvú iteráciu. Odhad správy $x' = [d'1, d'2, d'3, d'4]$ sa vypočíta tvrdým obmedzením podľa nasledujúceho vzťahu pre logaritmus pomeru pravdepodobnosti $l_2(x)$ na výstupe dekódera 2 :

$$\hat{x} = \text{sign}(l_2(x))$$

kde signum funkcia funkcie pôsobí na každý prvok $l_2(x)$ individuálne.



Obr. 4.7: Bloková schéma turbo kódéra



Obr. 4.8: Blokový schéma turbo dekódera

4.5.6 Výkonnosť FEC

S využitím techniky FEC dokáže vo väčšine prípadov prijímač dekódovať dáta, aj keď boli pri prenose poškodené. V prípade, že je príliš veľa dát poškodených, prijímač nedokáže obnoviť tieto dáta, pretože existuje určitá tolerančná úroveň prípustnosti chýb. Videli sme, že E_b/N_0 je parameter ovplyvňujúci chybovú výkonnosť satelitného prenosu pre dané kódy a dostupnú šírku pásma. FEC umožňuje prijímaču tolerovať satelitné spojenie s vyššími prenosovými chybami ako pre nekódované údaje, pokiaľ sa jedná o chybovú výkonnosť. Je to veľmi užitočné, pretože niekedy za určitých podmienok satelitného prenosu je možné len veľmi ťažko dosiahnuť určitú úroveň výkonnosti, vzhľadom na obmedzený prenášaný výkon.

Môžeme uviesť nasledujúci príklad: predpokladajme, že R je rýchlosť prenosu informácie, R_c je rýchlosť prenosu kódovaných dát, definovaná pre (n, k) blokový kód, kde n bitov je posielaných

pre k informačných bitov, pre ktorú platí $R_c = (R n / K)$. Závislosť požadovaného výkonu medzi kódovanými a nekódovanými dátami pri rovnakej chybovosti je vyjadrená nasledovne:

$$(C/R_c)/N_0 = (k/n)(C/R)/N_0 = (k/n)(E_b/N_0)$$

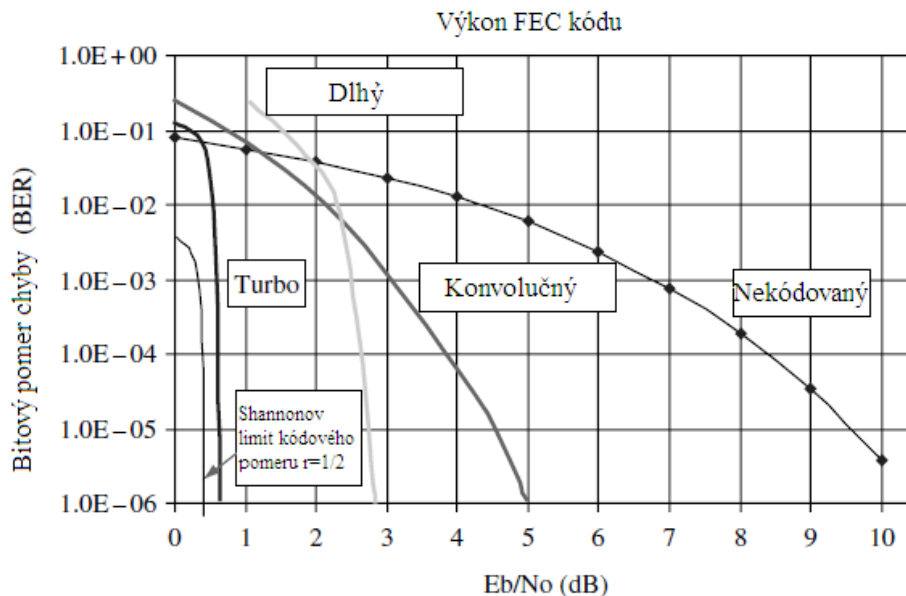
Tieto kódy, na úkor požadovanej väčšej šírky pásma alebo väčších režijných nákladov (pri zníženej priepustnosti), poskytujú kódovací zisk, aby bola zachovaná požadovaná kvalita spoja pri rovnakej dostupnej hodnote E_b/N_0 . Bez toho aby sme vykonali detailnú matematickú analýzu, uvedieme na obr.4.9 porovnanie výkonnosti FEC kódov.

4.6 Techniky viacnásobného prístupu

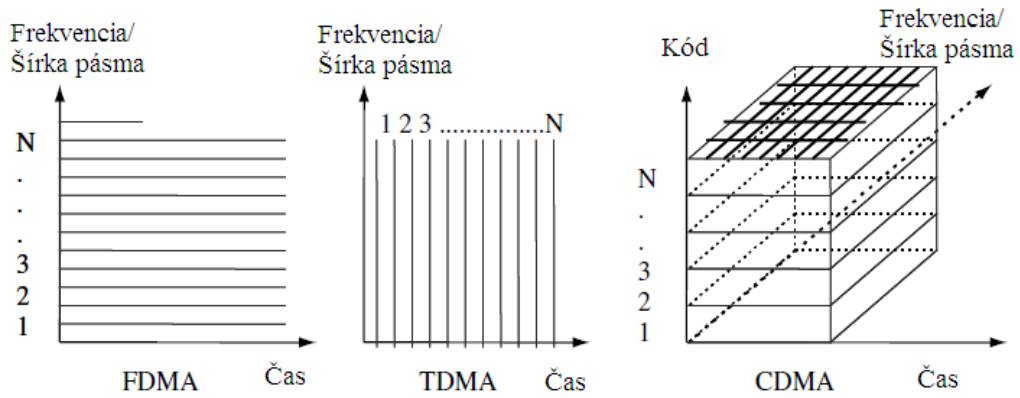
V satelitných komunikáciách sa používa viacnásobný systém prístupu k zdieľanému médiu. Prístupový režim sa vzťahuje na zdieľanie spoločných kanálov medzi viacerými užívateľmi poskytovaných služieb. Existujú tri hlavné formy viacprístupových systémov, ako je znázornené na obrázku 4.10:

- Viacnásobný prístup s frekvenčným delením (FDMA);
- Viacnásobný prístup s časovým delením (TDMA);
- Viacnásobný prístup s kódovým delením (CDMA).

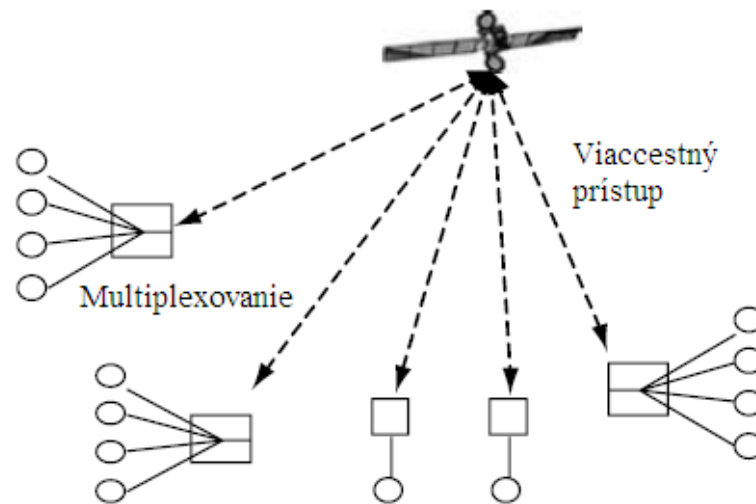
Multiplexovanie je odlišný spôsob od viacnásobného prístupu: je to koncentračná funkcia, ktorá zdieľajú frekvenčnú šírku pásma z rovnakých miest, zatiaľ čo viacnásobný prístup zdieľa tú istú šírku pásma, ale z rôznych miest, ako je to znázornené na obr. 4.11.



Obr. 4.9: Porovnanie výkonnosti FEC kódov



Obr. 4.10: Viacnásobné techniky prístupu FDMA, TDMA a CDMA



Obr. 4.11 Porovnanie konceptu multiplexovania a viacnásobného prístupu

4.6.1 FDMA

FDMA je tradičná technika, kde niekoľko pozemských staníc vysiela súčasne na rôznych frekvenciách na transpondér. FDMA je atraktívny vďaka svojej jednoduchosti pre prístup z pozemských staníc. FDMA, ktorý využíva systém prenosu jedného kanála na jednej nosnej frekvencii (SCPC) sa bežne používa v prístupových sieťach pre telefóniu tenkých ciest, pre VSAT systémy a mobilné terminálové služby. FDMA sa tiež využíva pre multiplexovanie viacerých kanálov zdieľajúcich jednu nosnú frekvenciu pre tranzitné siete. Tento systém však nie je vhodný pre aplikácie s meniacimi sa požiadavkami na šírku pásma. Je flexibilný pre použitie s rôznymi požiadavkami na šírku pásma.

Keď sa v tranzitných sieťach využíva prenos viacerých kanálov na jednej nosnej, pri použití systému FDMA vznikajú vážne problémy týkajúce sa intermodulačných produktov (IMPs), v dôsledku čoho je potrebné znížiť saturačný vyvolaný výkon o niekoľko dB (output back-off), aby sa prekonal problém nelinearity pri veľkom vysielanom výkone. Výsledná redukcia výkonu môže spôsobovať problémy najmä malým terminálom.

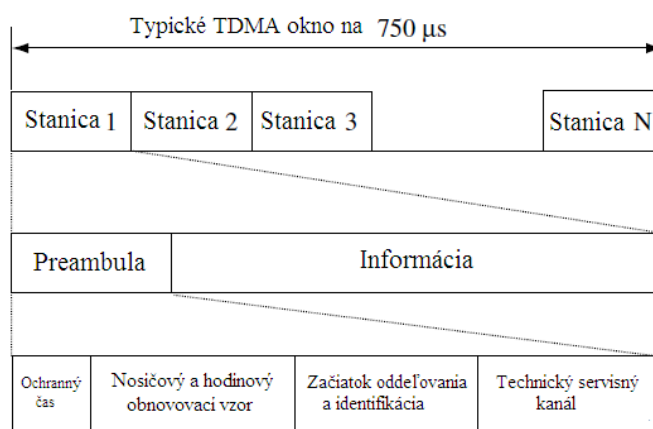
4.6.2 TDMA

V TDMA, každá pozemská stanica má pridelený časový úsek pre prístup na celú frekvenčnú šírku pásma transpondéra pre prenos informácií. Šírky pásma pre prenos informácií. Každý časový úsek môže byť použitý na prenos užívateľských informácií, synchronizácie a riadiacích informácií. Synchronizácia je dosiahnutá pomocou referenčného časového zhluku. TDMA je vhodnejší pre digitálne procesy a pre digitálnych signálov. Na obr. 4.24 je ukázaný charakteristický príklad TDMA.

Iba jedná TDMA nosná frekvencia pristupuje na satelitný transpondér v danom čase a celý výkon zostupného spoja je dostupný pre prístup. TDMA dovoľuje zvýšiť účinnosť využitia výkonu a taktiež aj využitia šírky frekvenčného pásma ak sú straty v dôsledku vytvárania ochranných časových slotov držané na minimálnej hodnote, keď sa používajú presnejšie časovacie techniky. Táto technika má široké využitie pre tranzitné siete vďaka vysokému využitiu šírky pásma pri vysokej prenosovej rýchlosti.

Samozrejme, že TDMA zhluky prenášané pozemskými terminálmi sa nesmú navzájom rušiť. Preto každá pozemská stanica sa musí najprv lokalizovať a potom riadiť počas prenosu fázovanie zhluku.

Každý zhluk musí dosiahnuť satelitný transpondér v predpísanom čase vzhľadom k referenčnému časovému zhluku. Toto zabezpečí, že žiadne dva zhluky sa nebudu prekryvať a že ochranný čas medzi každými dvomi zhlukmi je dostatočne krátky, aby sa dosiahla vysoká prenosová účinnosť, ale dostatočne dlhý aby nedošlo ku kolízii medzi časovými slotmi, pretože žiadne hodiny nie sú absolutne presné.



Obr. 4.12 Typický príklad TDMA satelitnej schémy

Synchronizácia je proces poskytovania časových informácií pre všetky stanice a pre riadenie TDMA zhlukov tak, aby zostali v predpísaných časových slotoch. Toto všetko musí pracovať, aj keď každá pozemná stanica musí mať fixný vzťah s GEO satelitom, pretože GEO satelity sú umiestnené na nominálnych zemepisných dĺžkach a sú typicky určené pre pohyb v okne so stranami 0,002 stupňov viditeľných zo stredu zeme. Okrem toho, satelity sa líšia rôznou nadmorskou výškou v dôsledku výstrednosti obežnej dráhy. Satelit sa tak môže pohybovať kdekoľvek v rámci kvádra so stranami $(75 \times 75 \times 85) \text{ km}^3$ vo vesmíre. Náhodný pohyb satelitu spôsobí zmenu vzdialenosti medzi pozemskou stanicou a satelitom asi 85 km, čo spôsobí zmenu spätočného času (round trip) asi $500 \mu\text{s}$ a zmenu frekvencie signálov známu ako Dopplerov jav.

4.6.3 CDMA

CDMA je prístupová metóda využívajúca techniku rozprestretého spektra, kde každá pozemná stanica používa jedinečnú rozprestierajúcu postupnosť na prístup k zdieľanej frekvenčnej šírke pásma. Všetky tieto kódy sú navzájom ortogonálne. Aby bolo možné uspokojiť veľké množstvo užívateľov, postupnosť pozostáva z veľkého počtu bitov, čo má za následok širokopásmové signály od všetkých užívateľov. Táto metóda je tiež známa ako viacnásobný prístup pomocou rozprestretého spektra (SSMA). Vlastnosť rozprestretého spektra je tá, že jeho využitie je možné za prítomnosti vysokých úrovní nekorelovaného rušenia, a to je dôležitou vlastnosťou zamedzujúcou vzájomnému rušeniu účastníkov vo vojenských komunikáciách. Širokopásmová rozprestierajúca funkcia je odvodená od pseudonáhodnej kódovej sekvencie a výsledný prenášaný signál následne obsadzuje podobnú šírku pásma. Na strane prijímača je vstupný signál korelovaný s rovnakou rozprestierajúcou funkciou zosynchronizovanou so signálom, aby bolo možné reprodukovat' pôvodné dáta. Na výstupe prijímača majú malé reziduálne korelačné príspevky od neželaného používateľa za následok aditívny šum, ktorý je známy ako vlastné rušenie. Keď počet užívateľov systému bude rásť, bude sa zvyšovať aj zvyšuje sa aj celková úroveň šumu a zvýši sa tak aj chybovosť systému. Tým je dané obmedzenie na maximálny počet simultánnych kanálov, ktoré je možné zriadiť v rámci toho istého celkového frekvenčného pridelenia. CDMA umožňuje postupné znižovanie výkonnosti so zvyšujúcim sa počtom pripojení.

4.6.4 Porovnanie FDMA, TDMA a CDMA

Stručné porovnanie FDMA, TDMA and CDMA sa nachádza v tab. 4.3. Pri satelitných sieťach sa viac zameriavame na vlastnosti týkajúce sa efektívneho využitia šírky pásma a energetických zdrojov, teda v konečnom dôsledku sa staráme o kapacitu, ktorú môžu zabezpečiť techniky viacnásobného prístupu.

4.7 Vymedzenie šírky pásma

Schémy viacnásobného prístupu poskytujú mechanizmy na rozdelenie šírky pásma na vhodné veľkosti pre požadované aplikácie a služby. Schémy pridelenia šírky pásma poskytujú mechanizmy na pridelenie šírky pásma v zmysle frekvenčného rozsahu a času. Schémy pridelenia šírky pásma možno typicky rozdeliť do troch skupín: pevne (fixne) pridelený prístup; viacnásobný prístup pridelený na požiadanie (DAMA) a náhodný prístup. Tieto metódy je možné použiť na splnenie potrieb rôznych druhov užívateľskej prevádzky v zmysle časových trvaní a prenosových rýchlostí. Tieto schémy je možné použiť individuálne alebo v kombinácii, a to podľa aplikácie, akú požadujeme.

Tab. 4.3: Porovnanie vlastností hlavných metód viacnásobného prístupu

Charakteristika	FDMA	TDMA	CDMA
Využitie šírky pásma	Jeden kanál na nosnú (SCPC)	Viac kanálov na nosnú - čiastočné pridelenie	SCPC, čiastočné alebo úplné pridelenie

Potlačenie interferencií	Obmedzené	Obmedzené frekvenčnými skokmi	Môže potlačiť interferencie až na úroveň šumu
Intermodulačné javy	Najcitlivejšie (oneskorenie prístupu sa vyžaduje najviac)	Menej citlivé (oneskorenie prístupu sa vyžaduje menej)	Najmenej citlivé (oneskorenie prístupu sa vyžaduje najmenej)
Dopplerov frekvenčný posun	Obmedzuje šírku pásma	Obmedzuje dobu zhlukov	Odstránený v prijímači
Flexibilita spektra	Používa najmenšiu šírku pásma na nosnú	Rozumné použitie šírky pásma na nosnú	Najväčšie požiadavky na spojitý segment
Kapacita	K dispozícii základná kapacita	Môže poskytnúť zvýšenie kapacity pomocou skákania	Kapacita sa nedá určiť, pretože nie je známe prevádzkové zaťaženie

4.7.1 Pevne pridelený prístup

Pri pevne pridelenom prístupe je pripojeniu terminálu trvalo pridelená určitá šírka pásma počas celej životnosti terminálu alebo na veľmi dlhé časové obdobie (roky, mesiace, týždne alebo dni). To znamená, že keď sa pripojenie nevyužíva, sloty sa nevyužívajú (t.j. sú zbytočné). Napríklad, pre tranzitné siete sa šírka pásma alokuje pomocou pevného pridelenia na základe dlhodobých predpovedí požiadaviek využiteľnosti siete.

4.7.2 Prístup pridelený na požiadanie

Pridelenie na požiadanie alokuje šírku pásma iba podľa potreby. Má dve premenné: časové trvanie a dátovú rýchlosť. Čas môže byť pevne daný alebo premenný. Pre daný časový interval môže byť dátová rýchlosť pevne daná alebo premenná. Pri pridelení s pevne danou rýchlosťou je šírka pásma pevne daná, to znamená, že nie je veľmi efektívna, ak sa dátová rýchlosť mení vo veľkom rozsahu. Pri pridelení s premennou dátovou rýchlosťou sa alokovaná šírka pásma mení s meniacou sa dátovou rýchlosťou. Ak systém nepozná meniace sa štruktúry, je zložitá splniť požiadavky na prevádzku. Dokonca, aj keď sa použije signalizačná informácia, oneskorenie spôsobené šírením v satelitných sieťach komplikuje reagovanie na krátkodobé potreby. Bežne sa táto schéma používa pre potreby krátkeho časového obdobia v zmysle hodín a minút. Tiež umožňuje pridelenie šírky pásma v závislosti od okamžitých prevádzkových podmienok. Aby bolo možné vyhovieť kombinácii typov prevádzky, šírku pásma možno rozdeliť do niekoľkých sekcií, pričom každá pracuje v samostatnej schéme pridelenia šírky pásma. Systém monitoruje prevádzkové podmienky a dynamicky robí úpravy podľa prevádzkových

podmienok. Toto sa tiež nazýva schéma dynamického pridelovania alebo schéma adaptívneho pridelovania.

4.7.3 Náhodný prístup

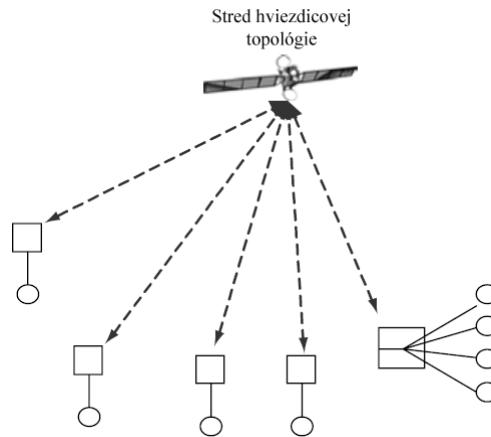
Pokiaľ sú požiadavky na šírku pásma veľmi krátkodobé, ako napr. pri dátových bitoch rámcu, efektívne využitie šírky pásma sa stane nepraktické a pre akýkoľvek plán pridelenia vzniká príliš veľká réžia. Z toho dôvodu je jasnou voľbou náhodný prístup. Umožňuje rôznym terminálom vysielat' súčasne. Keďže je vysielanie veľmi krátke, vysielanie má veľmi vysokú úspešnosť prenosu dát v prípadoch nízkeho prevádzkového zaťaženia. Vysielania môžu navzájom kolidovať. Pravdepodobnosť vzniku kolízií sa zvyšuje s narastaním prevádzkového zaťaženia. Keď sú dáta počas prenosu poškodené z dôvodu kolízie, je nutné ich opätovne preniesť. Systém tiež potrebuje korekciu chýb v paketoch alebo korekciu v prípade straty paketu, ktorá sleduje prenášané dáta alebo potvrdenia prijímacieho zariadenia. Takýto plán je založený na pláne sporov. Spory treba riešiť, aby sa zvýšili šance na úspešný prenos. Spravidla ak sa vyskytne kolízia, vysielajúce terminály prestanú vysielat' počas náhodnej časovej doby a zvýšia ich back-off interval na vyššiu hodnotu, pokiaľ sa po vyriešení sporu opäť vyskytne kolízia. Oneskorenie prístupu postupne efektívne znižuje prevádzkové zaťaženie na rozumnú, prevádzkyschopnú úroveň. Náhodný prístup môže dosiahnuť rozumnú priepustnosť, ale nemôže dať žiadne záruky dostupnosti pre jednotlivé terminály, kvôli charakteru náhodného prístupu. Typické príklady schém náhodného prístupu sú aloha a synchronizovaná aloha. Tiež môže pracovať s inými schémami.

4.8 Problémy v satelitných sieťach

Po tom, ako sme diskutovali pripojenia medzi pozemnými stanicami a satelitmi, teraz budeme diskutovať o tom, ako prepojiť satelity do sietí. V prípade transparentných satelitov možno satelit považovať za akési zrkadlo "ohnutý" spoj na oblohe, aby bolo možné vzájomne prepojiť pozemné stanice. V prípade satelitov so spracovaním na palube (OBS) alebo prepínaním na palube (OBS) možno satelit považovať za uzol na oblohe. Bez straty zovšeobecňovania budeme satelity považovať za sieťové uzly na oblohe.

4.8.1 Jednoskokové pripojenie k satelitu

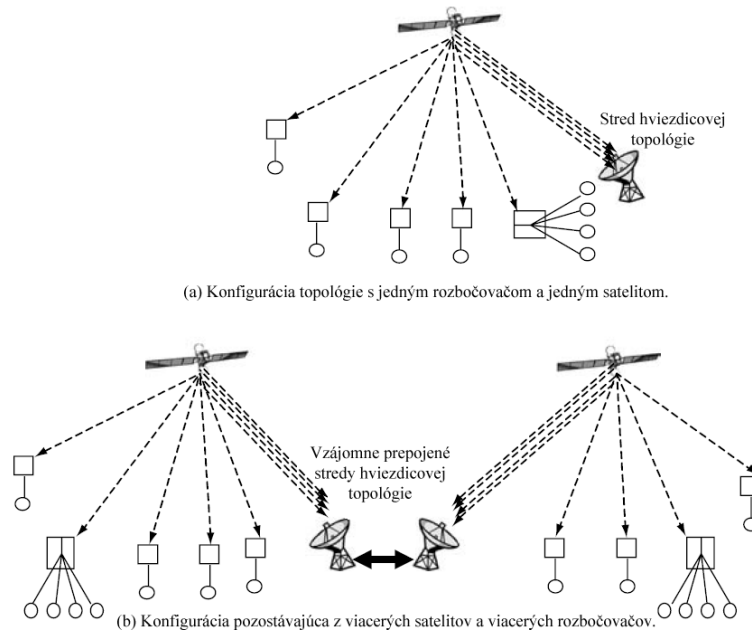
V tomto type konfigurácie je akékoľvek koncové spojenie smerované cez satelit iba raz. Každý satelit je nastavený ako "ostrov", ktorý umožňuje sieťovým uzlom na Zemi vzájomne sa prepojiť prostredníctvom tohto ostrova. Topológia satelitných sietí tvorí hviezdu, pričom satelit je v strede, ako ukazuje obr. 4.13.



Obr. 4.13: Topológia s jedným skokom so satelitom uprostred

4.8.2 Viacskokové pripojenie k satelitú

V tomto type konfigurácie je koncové spojenie smerované v satelitnej sieti viac ako raz, cez ten istý satelit alebo cez rôzne satelity. V prvom rade sa často používa vo VSAT sieťach, kde je signál medzi dvomi terminálmi príliš slabý na vytvorenie priamej komunikácie a na zosilnenie signálu medzi komunikujúcimi terminálmi sa použije veľká centrálna stanica (HUB).. V druhom rade, jeden skok nemusí stačiť na dosiahnutie k vzdialeným terminálom, teda sa na pripojenie použije viac skokov. Topológia satelitnej siete tvorí hviezdu s pozemskou centralnou stanicou v strede hviezdice alebo viacerých hviezd, pričom centrálna stanica sú navzájom prepojené, aby vzájomne pospájali jednotlivé satelity, ako ukazuje obr. 4.14.



Obr. 4.14: Topológia s viacerými skokmi s centrálnou stanicou uprostred

4.8.3 Medzisatelitné linky (ISL)

Aby sme zmenšili pozemný segment v sieťových pripojeniach, zavádzame koncept medzisatelitných spojov. Bez ISL by sa počet pozemských staníc zvyšoval, aby spájali dokopy viac satelitov, konkrétne pre LEO a GEO konštelácie, kde sa satelity neustále pohybujú po oblohe. Topológia siete sa tiež mení s pohybom konštelácie.

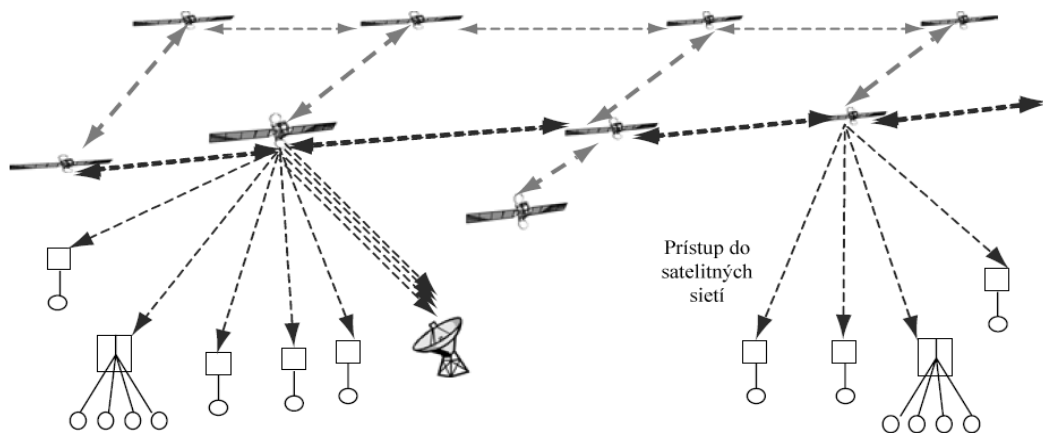
Keďže sú pozície medzi satelitmi relatívne stabilné, môžeme satelitné konštelácie navzájom prepojiť a vytvoriť tak sieť na oblohe. To nám umožní pristupovať k satelitnej sieti na oblohe zo Zeme s menším počtom staníc potrebných na prepojenie všetkých satelitov do siete, ako ukazuje obrázok 4.15. Ďalšia výhoda použitia ISL je tá, že satelity môžu so sebou navzájom priamo komunikovať, pokiaľ sú v priamej viditeľnosti, a teda zníži sa tak prevádzka medzi Zemou a oblohou v rámci obmedzeného frekvenčného spektra, a to odstránením potreby viacerých skokov medzi Zemou a oblohou. Avšak toto vyžaduje sofistikovanejšie a zložitejšie satelity so spracovaním/prepínaním/smerovaním na palube, aby bolo možné podporovať ISL. To umožňuje dokončenie komunikácií v oblastiach, kde satelity nevidia pozemsku bránovú stanicu, na rozdiel od jednoduchých „bent-pipe“ satelitov, ktoré sa správajú ako jednoduché transpondéry.

Pre kruhové obežné dráhy, sa ustálili v tej istej rovine relatívne pozície čelných a zadných ISL.

Pre satelity v rôznych obežných rovinách ISL mení relatívne pozície, pretože cesty s priamou viditeľnosťou medzi satelitmi menia uhol a dĺžku, keď sa obežné dráhy oddeľujú, a konvergujú pri skrížení obežných dráh, vďaka čomu vznikajú:

- vysoké relatívne rýchlosti medzi satelitmi;
- problémy s riadením sledovania, keď sa antény musia otáčať; a
- jav Dopplerovho posunu.

Na eliptických obežných dráhach môže satelit vidieť, že relatívne pozície satelitov "pred ním" a "za ním" značne narastajú alebo sa znižujú po celej obežnej dráhe, a na kompenzáciu tohto javu sú potrebné vnútorrovinné spoje s riadeným ukazovaním provy a kormy, zatiaľ čo medzirovinné vzájomné spoje medzi kvázistacionárnymi apogeami (kvázi GEO konštelácia) sa jednoduchšie spravujú.



Obr. 4.15: Satelitné siete s medzisatelitnými spojmi (ISL)

Možno vidieť, že je to kompromis medzi zložitou na oblohe alebo na zemi, t.j. je možné navrhnuť satelitnú sieť bez ISL alebo s ISL s veľmi malým počtom pozemných staníc alebo stredným počtom pozemských staníc na zvýšenie konektivity medzi satelitnou a pozemnou sieťou.

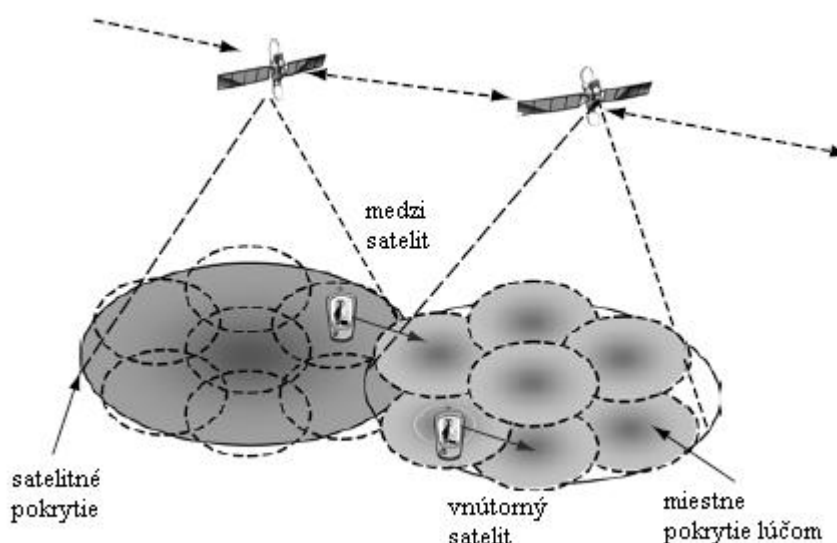
4.8.4 Odovzdávanie

Zatiaľ čo odovzdávanie komunikácií je dobre zrozumiteľné v terestriálnych mobilných sieťach, odovzdávanie v negeostacionárnych satelitných sieťach pridáva ďalšiu zložitosť k návrhu satelitnej siete, kvôli relatívnej činnosti medzi satelitmi a medzi satelitmi a pozemskými stanicami.

Odovzdávanie je potrebné na udržanie spojenia od zdroja k cieľu. Satelitné pokrytie pohybujúce sa spolu so satelitmi a spojmi musí byť odovzdané od jedného satelitu k ďalšiemu (medzisatelitné odovzdávanie). Pre viacúčtové satelity, je odovzdávanie tiež potrebné medzi krátkymi lúčmi (lúčové odovzdávanie alebo medzisatelitné odovzdávanie) a eventuálne k ďalšiemu satelitovi (medzisatelitné odovzdávanie) ako je ukázané na obrázku 4.16. Keď ďalší lúč alebo satelit nemá nečinné spojenie na prevzatie odovzdávajúcich spojení, spojenie sa stratí, čo môže spôsobiť ukončenie spojovo orientovaných služieb; tento prípad je označovaný ako zlyhanie odovzdania. Predčasné odovzdanie zvyčajne vyústi do nepotrebného odovzdania a oneskorené odovzdanie vyústi do zvýšenia pravdepodobnosti núteného ukončenia. Odovzdanie sa môže začať na základe intenzity úrovne signálu a/alebo meraní vzdialenosti polohy.

Dva scenáre pre odovzdanie pre satelitný prenos dát sú: vnútroúrovňový satelitný prenos a medziúrovňový satelitný prenos.

Vnútroúrovňový satelitný prenos predpokladá, že účastník sa pohybuje od lúča k lúču v oblasti pokrytia satelitom S. Brána vie, že účastník sa blíži k hranici medzi satelitom S a satelitom T, pretože vie kód polohy účastníka a polohu satelitu. Brána pošle správu satelitovi S, aby sa pripravil na odovzdanie účastníka a ďalšiu správu satelitovi T, aby sa pripravil na akceptovanie účastníka.



Obr. 4.16 Koncept vnútrosatelitného a medzisatelitného odovzdania

Brána potom odošle správu na stanicu cez satelit S zosynchronizovaný s novým satelitom T. Odovzdanie je ukončené, keď satelit pošle správu na stanicu, v ktorej informuje, že je použitá nová frekvencia. Brána je inteligentný celok v tomto prípade odovzdania.

Medziúrovňový satelitný prenos je rovnaký ako vnútroúrovňový okrem toho, že namiesto odovzdania pripojenia k satelit v tej istej obežnej dráhe, odovzdá na satelit na inej dráhe. Dôvodom na vykonanie odovzdania na satelit v inej rovine je, že žiadny satelit v rovnakej rovine nie je schopný pokryť účastníka alebo tam nie sú prístupné kanály, aby bolo možné vykonať odovzdanie. Iný dôvodom môže byť, že satelit v inej rovine môže poskytnúť lepšie služby vzhľadom k rozmanitosti priestoru, ako satelity s nižšou nadmorskou výškou, ktoré majú problémy s tienením.

Čas potrebný na spustenie a realizáciu odovzdania musí byť veľmi krátky. Okrem toho, odovzdanie by nemalo degradovať kvalitu služby pre spojenie.

S orbitálnou rýchlosťou satelitov a veľkosťou pokrytia, čas potrebný na prekročenie oblasti prekrytia pokrytej satelitmi je relatívne krátky. Avšak, vzhľadom k charakteristikám satelitov, môže byť terminál pokrytý aspoň dvoma satelitmi. To ponúka možnosť optimalizácie odovzdania, s ohľadom na kvalitu služieb pre každé pripojenie, a obsluhu väčšieho množstva spojení.

S rozvojom technológií a koncových spojení s funkciami GPS, je možné, že satelitné terminály budú tiež môcť poskytovať väčšiu pomoc procesom odovzdávania.

4.8.5 Vnútroanténové a medzianténové odovzdanie

Odovzdanie lúča má dva scenáre: vnútroanténové odovzdanie a medzianténové odovzdanie.

Vnútroanténové odovzdanie predpokladá, že odberateľ v lúči používa frekvenciu 1 a je spojený so satelitom S. Ako sa lúč blíži k ďalšej geografickej oblasti, frekvencia 1 už nemusí byť k dispozícii. Existujú pre to dva možné dôvody. Prvý z nich sú vládne predpisy, tj určitý súbor frekvencií nie je k dispozícii v blížiacom sa regióne. Ďalším dôvodom je rušenie, ktoré môže byť spôsobené tým, že keď sa satelit S pohybuje príliš blízko k ďalšiemu satelitovi použije rovnakú frekvenciu. V tomto prípade, aj keď účastník nie je stále v lúči A (satelit S), satelit bude posielat správu na mobilné jednotky na zmenu frekvencie - na frekvenciu 2 s cieľom zachovať komunikačné spojenie. Satelit predstavuje v tomto prípade odovzdania.inteligentný subjekt

Scenár medzianténového odovzdania umožňuje bráne zemských staníc (GES), alebo terminálu zemských staníc (TES) priebežne sledovať rádiový výkon (RF) frekvencie 1 použitého v lúči A. Tiež monitorujú vysokofrekvenčný výkon dvoch susedných kandidátskych odovzdaných lúčov B a C, cez všeobecný vysielač kanál (informačný kanál). Stanica určuje, kedy je odovzdanie založené na sile signálu RF. Ak lúč signálu B sa stane silnejší ako signál použitý v lúči A, stanica bude inicializovať žiadosť o odovzdanie na satelite, aby bol používateľ prepnutý na lúč B. Satelit priradí novú frekvenciu 3 k stanici, pretože dva susedné lúče nemožno použiť na rovnakej frekvencii (typicky 3 -, 6 - a 12-lúčové vzory sú používané pre efektívnu frekvenciu opätovného použitia a pokrytia). Medzianténové odovzdanie môže byť veľmi časté, ak lúče sú malé a / alebo satelit sa pohybuje rýchlo. Môže tam byť aj inteligentný subjekt v tomto prípade odovzdania.

4.8.6 Zemské pevné pokrytie verzus satelitné pevné pokrytie

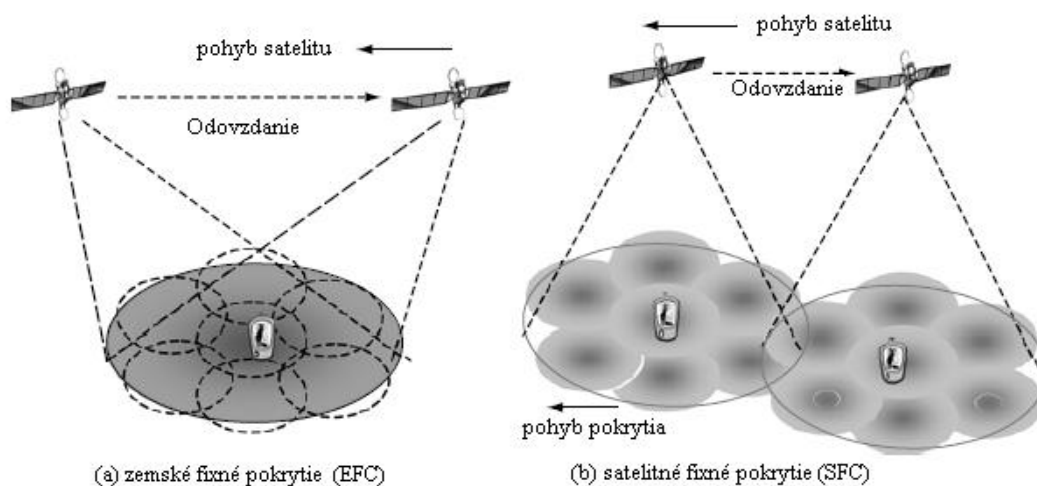
Problém prekrytia je posudzovaný podľa konštelácie. Konštelácie satelitov môžu byť riešené ako zemské pevné pokrytie (EFC) alebo satelitné pevné pokrytie (SFC), ako je znázornené na obr. 4.15. V EFC, každá oblasť pokrytia satelitnými lúčmi je fixovaná vo vzťahu k Zemi, teda relatívne umožňuje dlhšiu dobu pre odovzdanie. V kontraste, každá oblasť pokrytia SFC sa pohybuje spolu so satelitom, a preto je fixovaná vo vzťahu k satelitovi, ale pohybuje sa vo vzťahu k Zemi. K dispozícii je pomerne krátka doba pre odovzdanie, pretože prekrytie medzi pokrytím dvoma satelitmi môže byť veľmi malé a pohybuje sa veľmi rýchlo.

Problémy, ktoré sa vyskytujú v EFC sú spôsobené nadmerným rozdielom v oneskorení pri šírení rádiového signálu každého satelitu. Rozdiel, vzhľadom k rôznym satelitným miestam, vedie k strate poradia, stratám alebo duplikácii pokrytia podľa pozície satelitov vzhľadom k Zemi.

Výhoda viac anténových satelitov je, že každý satelit môže slúžiť celej oblasti pokrytia s radom vysokoziskových snímacích lúčov, z ktorých každý osvetľuje jedinou malú plochu naraz. Úzka šírka zväzku umožňuje efektívne opätovné použitie spektra a výslednej vysokej kapacity systému, vysokú hustotu kanálov a nízky výkon vysielača. Avšak, ak táto malá vzorka lúča dopadá na zemský povrch rýchlosťou satelitu, terminál bude mať veľmi krátky čas na komunikáciu pred ďalším odovzdaním. Ako v prípade terestriálnych bunkových systémov, časté odmietnutia, majú za výsledok neefektívne využitie kanála, vysoké náklady na spracovanie a nižšiu kapacitu systémov.

V EFC, každý satelit spravuje kanál zdrojov (frekvenčné a časové sloty spojené s každou oblasťou pokrytia), v súčasnej slúžiacej oblasti. Tak dlho, kým zostáva terminál v rovnakej oblasti pevného pokrytia, zachováva pridelený rovnaký kanál úlohu počas trvania hovoru, bez ohľadu na to, koľko satelitov a lúčov je zapojených. Znovupridelený kanál sa stane skôr výnimkou ako pravidlom, keďže eliminuje veľa frekvenčného riadenia a odmietnutia odovzdania.

Databáza obsiahnutá v každom satelite definuje typ služieb povolených v rámci každej oblasti pokrytia. Malé pevné lúče umožňujú zabrániť rušeniu od satelitných konštelácií, alebo od konkrétnej geografickej oblasti a kontúrov oblasti služieb na národné hranice. Bolo by to ťažké



Obr. 4.15 Satelitné konštelácie zemského pevného pokrytia a satelitného pevného pokrytia

dosiahnuť s veľkými lúčmi alebo lúčmi, ktoré sa pohybujú so satelitom. Aktívne antény sa zvyčajne používajú na upevnenie lúčov na zemi, zatiaľ čo satelity letia vysokou rýchlosťou.

4.8.7 Smerovanie cez sústavu satelitov

Okrem ISL a väzieb medzi satelitmi a pozemskými stanicami, smerovanie nájde cesty k poskytnutiu end-to-end spojenia s využitím liniek. Priame smerovanie priamo ovplyvňuje využívanie sieťových zdrojov a kvality služieb poskytovaných pripojením.

Smerovacie metódy v rámci konštelácií závisia od návrhu konštelácii. Topológia z LEO konštelácií satelitnej siete je dynamická. Pripojenie k sieti medzi ľubovoľnými dvoma bodmi je tiež dynamické. Satelity sa pohybujú nad rotujúcou Zemou v čase. Každý satelit udržiava rovnaké postavenie v porovnaní s inými satelitmi v jeho orbitálnej rovine. Jeho poloha a oneskorenie vzhľadom k pozemským terminálom a satelitom v iných rovinách sa neustále mení, ale predvídateľne. Okrem zmien v topológii siete, ako je prevádzkový tok siete, trasy sa tiež menia s časom. Všetky tieto faktory ovplyvňujú smerovanie od zdrojového k cieľovému pripojeniu alebo paketu.

Maximálne oneskorenie medzi dvoma koncovými bodmi, vrátane skokov cez satelit je obmedzené reálnym časom šíriaceho sa oneskorenia. Tieto obmedzenia obmedzujú počet preskokov v systémoch využívajúcich ISL. Satelitné zlyhanie môže vytvoriť komunikačné ostrovy v rámci siete LEO. Algoritmus sieťového smerovania musí vyhovieť týmto poruchám.

Vďaka satelitným orbitálnym dynamikám a zmenám oneskorení, sa očakáva, že veľa LEO systémov používa nejakú formu adaptívneho smerovania poskytujúceho end-to-end konektivitu. Adaptívne smerovanie neodmysliteľne predstavuje zložitosť a zmeny oneskorenia. Okrem toho, adaptívne smerovanie má za následok, že pakety budú mimo poradia. Tieto pakety budú musieť byť nanovo usporiadané v prijímači.

Ako všetky satelitné uzly aj ISL majú rovnaké vlastnosti, preto je vhodné oddeliť satelitnú a pozemskú časť trasy. To umožňuje rôzne algoritmy smerovania, ktoré majú byť využívané efektívne a môžu byť transparentne prispôbené pre charakteristiky siete.

Smerovacie algoritmy môžu byť distribuované alebo centralizované. V centralizovaných smerovacích algoritmoch, všetky satelity hlásia informácie o konštelačnom velení a riadení, ktoré potom vypočíta smerovacie grafy a odovzdá informácie späť do satelitov pre pripojenie alebo smerovanie paketov.

V distribuovaných smerovacích algoritmoch, všetky satelity menia metriku siete (napr. prenosové oneskorenie, podmienky prevádzkového zaťaženia, dostupnosť šírky pásma a priepustnosť uzla, atď.) a každý satelit sa snaží vypočítať svoje vlastné smerovacie grafy. Do úvahy môžu byť tiež brané QoS parametre ako sú oneskorenie a požiadavky na šírku pásma. Smerovacie algoritmy by mali byť tiež schopné porovnávať medzi QoS pre užívateľské aplikácie a efektívnosťou pre sieťové zdroje.

Vzhľadom na pohyb satelitov a užívateľských terminálov, začiatkové a koncové body oboch ciest sa môžu meniť s časom a tiež s ISL cestou. Preto smerovanie v satelitnej sieti je pomerne zložitejšie, než smerovanie v pozemskej sieti.

4.8.8 Vzájomná spolupráca

Sieťovanie je konečná fáza pre satelitné siete a poskytuje pripojenie priamo na užívateľské terminály alebo pozemské siete. Okrem spojenia fyzickej vrstvy kvôli šírke pásma a rýchlosti prenosu, musia byť tiež vzaté do úvahy vyššie vrstvy protokolov. Podľa možných rozdielov medzi protokolmi použitými v satelitných sieťach, pozemských sieťach a satelitných termináloch, môžu byť použité nasledujúce techniky pre sieťovanie:

- Protokolové mapovanie je technika používaná pre prevod funkcií a hlavičiek paketov medzi rôznymi protokolmi
- Tunelovanie je technika používaná na spracovanie jedného protokolu, keď dáta majú byť prenášané v tunelujúcom protokole. Tunelovaný protokol je spracovaný len na konci tunela.
- Multiplexovanie a demultiplexovanie sú techniky používané pre multiplex niekoľkých dátových tokov do jedného toku a demultiplexovanie jedného dátového toku do viacerých tokov.
- Tvarovanie prevádzky je technika používaná na tvarovanie charakteristik prevádzkových tokov, ako sú rýchlosti a časovania, ktoré sú prispôbené transportnej sieti.

4.8.9 Dostupnosť satelitov a diverzita

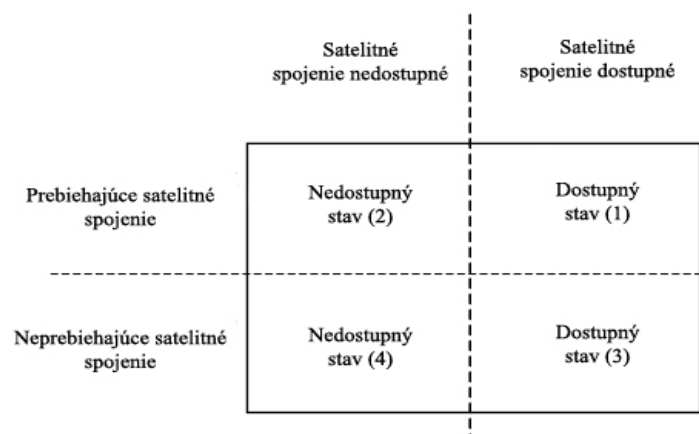
Celková dostupnosť satelitnej siete ($A_{\text{celkové}}$) závisí od dostupnosti satelitu (A_{satelitu}), dostupnosti satelitného spojenia ($A_{\text{šírenia}}$) a dostupnosti satelitných zdrojov ($A_{\text{preťaženia}}$).

$$A_{\text{celkové}} = A_{\text{satelitu}} \times A_{\text{šírenia}} \times A_{\text{preťaženia}}$$

Z hľadiska spoľahlivosti, by časť sieťového pripojenia mala mať nasledovné vlastnosti:

1. Zlomok času, počas ktorého je v stave vypnuté (tj nemôže podporiť pripojenie) by mal byť čo najnižší.
2. Akonáhle je nadviazané spojenie, mala by byť nízka pravdepodobnosť, že bude zastavené z dôvodu nedostatočného prenosu dát alebo predčasne pozastavené kvôli výpadku sieťovej časti.

Dostupnosť časti pripojenia k sieti je definovaná ako zlomok času, pre ktorú je časť pripojenia schopná podporovať spojenie. Naopak nedostupnosť je zlomok času, po ktorú nie je časť pripojenia schopná podporiť pripojenie (t.j. je v stave vypnuté). Spoločný model dostupnosti je znázornený na obrázku 4.18.



Obr. 4.18 Model dostupnosti satelitnej siete

Tento model využíva štyri stavy korešpondujúce v kombinácií schopnosti siete udržať spojenie v dostupnom stave a aktuálneho využitia spojenia. Z modelu sú preto zrejmé dva nezávislé pohľady:

2. Perspektíva služby, kde je dostupnosť priamo spojená so schopnosťou vnímania používateľa. To je reprezentované na obrázku 4.30 v stavoch 1 a 2, a to aj v prípade zapnutia/vypnutia zdroja pokiaľ je používateľ sústredený len na dostupnosť pripojenia pri pokuse o prenos paketov.
3. Perspektíva siete, kde je dostupnosť charakterizovaná nezávisle od užívateľského správania. Všetky štyri stavy sú zobrazené na obrázku 4.18.

K dispozícii sú dva parametre dostupnosti definované nasledovne:

4. Pomer dostupnosti (AR): definovaný ako čas, počas ktorého je časť pripojenia v dostupnom stave nad pozorovacou periódou, či je spojenie použité alebo nie.
5. Stredná doba medzi výpadkami (MTBO): definovaná ako priemerná dĺžka časového intervalu, počas ktorej je k dispozícii pripojenie z hľadiska prevádzky. Po sebe idúce časové intervaly dostupnosti, počas ktorých sa ich používateľ pokúsi použiť, sú zlúčené.

Diverzita je technika používaná na zlepšenie dostupnosti satelitného spojenia. Existujú rôzne typy diverzity. Tu si rozoberieme iba dva typy:

1. Diverzita Zem-satelit používa naraz viac ako jeden satelit počas komunikácie. To umožňuje zlepšenie fyzickej dostupnosti, znížením vplyvu tienenia cesty medzi terminálom a satelitom budovami a tým, že poskytuje redundanciu na fyzickej alebo spojovej vrstve. Diverzita je tiež využívaná pre mäkké prechody, t.j. staré spojenie je ukončené až po úspešnom vytvorení nového pripojenia.
2. Satelitná sieťová diverzita poskytuje redundanciu pri zlyhaní satelečných spojov alebo satelitov. To je možné len vďaka veľkému množstvu satelitov s blízkym rozmiestnením.

Ak to má vplyv na smerovanie v rámci ISL siete, tak to môže mať významný vplyv na koncové spojenia.

4.9 Doplnkové čítanie

[1] Haykin, S., Communication Systems, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[2] ITU, Handbook on Satellite Communications, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

4.10 Cvičenie

1. Vysvetlite funkciu rôznych typov modulačných techniky a uveďte dôvody pre ktoré je fázová modulácia najvhodnejšia pre satelitný prenos.

-
2. Vysvetlite kódovacie systémy korekcie chýb.
 3. Vysvetlite ako sa dokáže turbo kód svojou výkonnosťou priblížiť k Shanonovej hranici.
 4. Vysvetlite rozdiel medzi viacnásobným prístupom a multiplexovaním.
 5. Vysvetlite princípy rôznych systémov pridelovania zdrojov šírky pásma
 6. Diskutujte problémy návrhu satelitného sieťovania.
 7. Vysvetlite koncepciu kvality služby (QoS) na fyzickej vrstve pokiaľ ide o bitovú chybovosť a techniku zlepšenia QoS.
 8. Vysvetlite kvalitu satelitného sieťovania pokiaľ ide o dostupnosť a techniky používané na zlepšenie satelitnej dostupnosti.

5 Antény pre mobilné satelitné komunikačné systémy

5.1 Úvod do teórie antén

Anténa je veľmi dôležitou súčasťou rádiokomunikačného reťazca začínajúceho vysielačom a končiaceho prijímačom. Typické usporiadanie je také, že vysielač napája prostredníctvom napájajúcej vysielačnej antény, ktorá vyžaruje elektromagnetickú energiu do voľného priestoru. Je teda úlohou vysielačnej antény premeniť energiu vedenej vlny po napájajúcej na energiu vlny vyžarovanej do voľného priestoru. Na druhej strane rádiokomunikačného reťazca je prijímacia anténa, na ktorú dopadá elektromagnetická vlna vyžarovaná vysielačnou anténou. Úlohou prijímacej antény je premeniť energiu dopadajúcej vlny na energiu vlny vedenej po napájajúcej do záťaže, ktorou môže byť napríklad vstupná impedancia prijímača.

Antény sú elektricky vodivé štruktúry, zvyčajne kovové, a patria obyčajne k pasívnym prvkom rádiokomunikačného reťazca. Vyznačujú sa reciprocitou, čo znamená, že výkonová charakteristika je rovnaká pre vysielačnú aj prijímaciu anténu. Teoreticky je teda možné použiť rovnakú anténu pre vysielačnú i prijímaciu anténu. Z praktického hľadiska sa však konštruujú vysielačné antény tak, aby dokázali pracovať s veľkými výkonmi, ktoré sú potrebné pri pokrytí väčších území. Naopak, pri prijímacích anténach sa nevyžadujú také nároky na spracovávaný výkon. Skôr sa pri ich konštrukcii uplatňuje potreba čo najväčšej účinnosti premeny dopadajúcej elektromagnetickej vlny s ohľadom na čo najmenšie rozmery antény.

Z hľadiska štruktúry je možné na anténu hľadieť ako na prvok elektrického obvodu, ktorý má vlastnú kapacitanciu (ukladá energiu elektrického poľa) a induktanciu (ukladá energiu magnetického poľa). Schopnosť naviazať energiu vlny vedenej po vedení do antény závisí od jej naladenia. Na odladenie vlastností sa používajú rôzne simulačné programy, ktoré sú nevyhnutné pri návrhu parametrov. Základná podstata návrhu spočíva vo vytvorení antény, ktorá ako elektrický prvok, bude mať iba hodnotu rezistencie a teda vplyv elektrického a magnetického poľa sa bude navzájom kompenzovať.

Všeobecne antény možno roztriediť do skupín podľa rôznych hľadísk (Obr. 5.1)

- podľa frekvenčného pásma
- podľa schopnosti sústrediť vyžarovanie do určitého smeru
- podľa funkcie, ktorú antény plnia
- podľa šírky pásma, v ktorom môžu pracovať bez podstatnej zmeny elektrických parametrov, atď.

K zásadnému triedeniu však patrí predovšetkým rozdelenie antén podľa charakteru zdroja elektromagnetických vln

- líniové antény

- plošné antény

U *líniových antén* vzniká elektromagnetické pole v dôsledku striedavého prúdu pretekajúceho cez relatívne tenký vodič. Najčastejšie je vodič priamy, antény sa potom nazývajú lineárne antény, lebo vyžarujú lineárne polarizované elektromagnetické pole. Líniové antény možno rozdeliť do dvoch podskupín

- *antény so stojatou vlnou* – v tomto prípade sa prúdová vlna odráža od konca anténového vodiča, ktorý je v stave nakrátko alebo naprázdno a vytvára tak stojaté vlnenie
- *antény s postupnou vlnou* – v tomto prípade je anténa na konci zaťažená vlastnou vlnovou impedanciou a na vodiči tak vzniká len postupná prúdová vlna

Plošné antény vyžarujú elektromagnetické vlny z veľkej plochy – apertúry (nazývajú sa aj sekundárne zdroje elektromagnetického poľa)

Chyba! Objekty sa nedajú vytvoriť úpravami kódov polí.

Obr. 5.1 Všeobecné rozdelenie antén podľa rôznych kritérií

5.2 Základné parametre antén

5.2.1 Zisk

Zisk antény [1] sa líši od zisku zosilňovača, pretože anténa neobsahuje žiadne aktívne obvody, a nemôže teda zvýšiť silu signálu. Zisk antény udáva v decibeloch, ako sa tvar vyžiareného poľa líši od ideálnej antény, ktorá má izotropný vyžarovací uhol a je bezstratová (jednotka dBi). Ideálna izotropná anténa, ktorú v skutočnosti nie je možné zostrojiť, vyžaruje výkon všetkými smermi rovnakou intenzitou. Ak P_{in} je výkon vstupujúci do izotropnej antény, výkonová hustota na jednotku plochy P_{ideal} vo vzdialenosti $r(m)$ od antény je daná vzťahom:

$$P_{ideal} = \frac{P_{in}}{4\pi r^2} \quad (\text{watt/m}^2) \quad (5.1)$$

Avšak ak vysielaná výkonová hustota je $F(\theta, \Phi)/r^2$ v smere (θ, Φ) vo vzdialenosti $r(m)$ od antény, zisk antény môže byť vyjadrený nasledujúcou rovnicou:

$$G_a(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi) / r^2}{P_{\text{ideal}}} = \frac{F(\theta, \phi) / r^2}{P_{\text{in}} / (4\pi r^2)} = \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}} \quad (5.2)$$

Zisk definovaný vzťahom (5.2) sa nazýva absolútnym ziskom, alebo smerovým ziskom, ktorý je definovaný iba smerovosťou (vyžarovacím uhlom) antény bez zohľadnenia strát v anténnom systéme, ako napr.: straty impedančným neprispôbením, napájacie straty, alebo straty rozptylom. Ak nasmerovanie je vymedzené a zisk nie je daný ako funkcia (θ, Φ) , tak je predpokladaný maximálny zisk. Zisk je obyčajne vyjadrovaný v decibelovej miere (dB) a niekedy je označovaný ako dBi, čo znamená, že zisk musí byť definovaný v porovnaní s izotropnou anténou.

V skutočných anténach musíme vziať do úvahy vyžiarený výkon P_{out} . Skutočné vyžarovanie z antény tu nie je ekvivalentné vstupnému výkonu P_{in} , ktorý je dodávaný do antény ako vo vzťahu (5.2). Je to preto, že antény vo všeobecnosti majú mnoho strát spôsobených napájacími linkami a ich impedančným neprispôbením. Zisk definovaný pomocou (5.2), kde P_{in} je nahradený P_{out} , sa nazýva efektívnym ziskom, alebo pracovným ziskom. Môžeme ľahko pochopiť, že absolútny (smerový) zisk je väčší ako efektívny, pretože $P_{\text{in}} \geq P_{\text{out}}$. Definícia efektívneho zisku nezahrňuje straty spôsobené polarizačným neprispôbením, ako výsledok axiálneho pomeru antén s kruhovou polarizáciou.

Vzťah medzi absolútnym ziskom a fyzickými rozmermi antény je daný nasledovne:

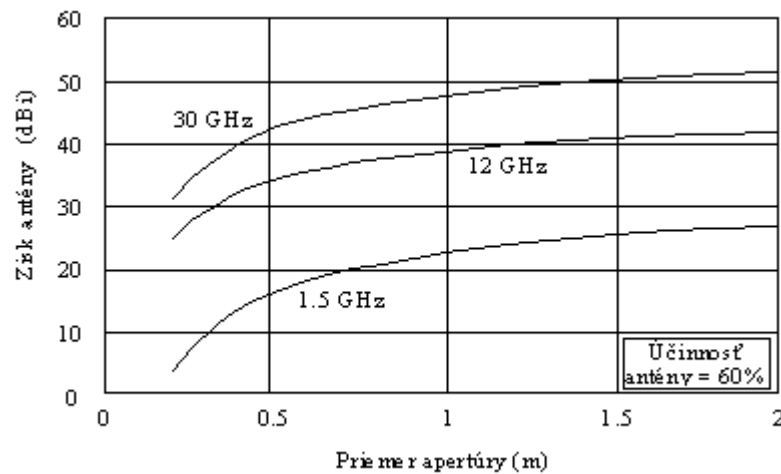
$$G_a = \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta A \quad (5.3)$$

kde A a η označujú apertúru a účinnosť antény. Apertúra je plocha antény, ktorá zachytáva prechádzajúcu elektromagnetickú vlnu. Súčin $A\eta$ vyjadruje efektívnu vyžarovaciu plochu antény. Použitím (5.3) môžeme vidieť, že kompaktné antény s malými apertúrami musia mať malé zisky. Ak apertúrou je parabola s malým priemerom môžeme napísať:

$$G_a = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \quad (5.4)$$

V decibelovej miere to vyjadríme nasledovne:

$$G_a = 10 \log \left[\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \right] \quad (\text{dB}) \quad (5.5)$$



Obr. 5.2 Vzťah medzi ziskom a priemerom antény.

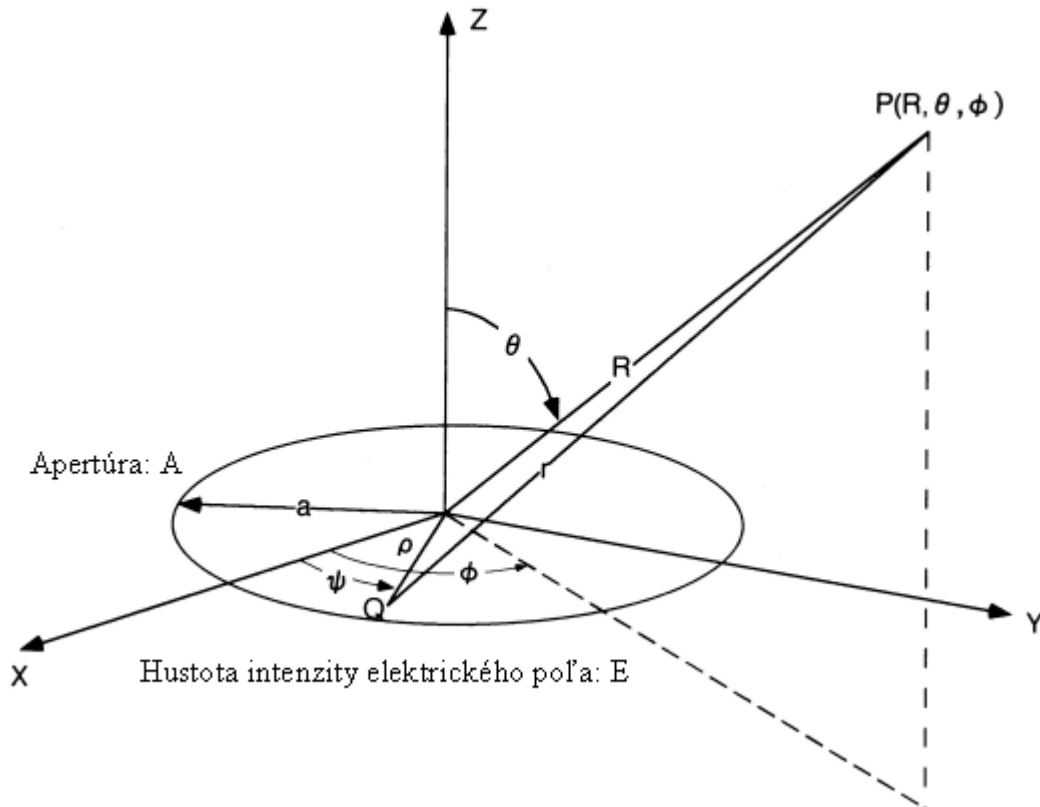
Obr. (5.2) udáva vzťah medzi anténnym ziskom a rozmerom antény. S rovnakým rozmerom zisk narastá, keď použijeme vyššie frekvencie, pretože rozmer antény sa stáva väčším v porovnaní s vlnovou dĺžkou rádiových vln.

Na obr. 1.2 máme tri frekvenčné pásma. L – pásmo (1.5 GHz), Ku – pásmo (12 GHz) a Ka – pásmo (30 GHz). Hodnota účinnosti 60% je zovšeobecnená pre antény apertúrneho typu, akými sú napríklad parabolické antény. Môžeme nájsť, že zisk antény s priemerom 1 m, ktorá pracuje v pásme 1.5 GHz je okolo 21 dBi, čo je typická hodnota pre lodné antény v INMARSAT systéme (INMARSAT - A).

5.2.2 Vyžarovací diagram, šírka zväzku a postranné laloky

Výpočet vyžarovania je v princípe možný ak, elektromagnetické pole môže byť kvantitatívne vyčíslené vo všetkých bodoch povrchu antény. V tejto kapitole sa budeme zaoberať vyžarovacím diagramom [1] kruhovej apertúry, vzhľadom na to, že antény apertúrneho typu sú obvykle používané v mobilných satelitných komunikáciách, zvlášť v námorníctve. Ako ukazuje Obr. 5.3, ak apertúra S je buď rovnakou elektrickou intenzitou E na jednotku plochy, o rovnakej fáze a amplitúde, vyžiarené elektrické pole je dané:

$$\begin{aligned}
 E(\theta, \varphi) &\propto E \int_0^{2\pi} \int_0^a \rho^{jkpr \sin \phi \cos(\phi - \varphi)} d\rho d\varphi \propto 2 \frac{J_1(k a \sin \theta)}{(k a \sin \theta)} \\
 &= 2 \frac{J_1\left(\pi \frac{D}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{D}{\lambda} \sin \theta}
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$



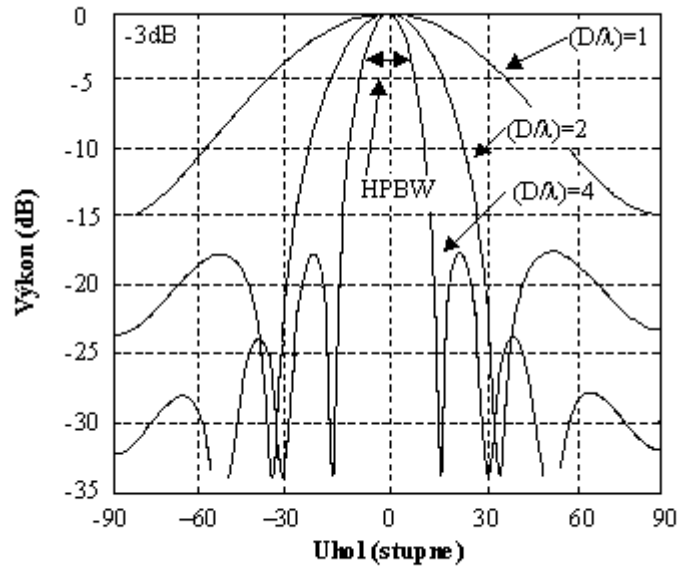
Obr. 5.3 Súradnice pri výpočte apertúry budenej rovnakou fázou a amplitúdou

kde $J_1(x)$ je 1.rád besselovej funkcie [2], a $k (=2\pi/\lambda)$ a $a (=D/2)$ označujú vlnové číslo a množné číslo apertúry. Ostatné vyjadrenia označujú vzdialenosti a uhly v súradniciach zobrazených na obrázku 5.3.

Obrázok 5.4 zobrazuje *vyžarovací diagram* antény s kruhovou apertúrou vypočítaný podľa (5.6). Vyžarovací diagram definujeme ako závislosť amplitúdy a fázy zložiek elektromagnetického poľa antény na uhlových súradniciach na guli s konštantným polomerom.

Hodnoty vyžarovaného výkonu a fyzikálnej apertúry sú normalizované podľa maximálneho výkonu a vlnovej dĺžky. Čím väčšie sú antény, tým sú užšie ich lúče a v oblastiach mimo osi sa začnú objavovať *postranné laloky* [8]. S rovnomerne vybudenými apertúrami, hodnota prvého postranného laloku je teoreticky okolo -17.6 dB. V praxi sa rozdelenie poľa apertúry zužuje od stredu ku okraju, aby sa znížili veľkosti postranných lalokov a zmenšila

hodnota úniku po okrajoch antény. Pri zúženom rozdelení sa efektívny priemer apertúry D_e stáva menší ako fyzikálny priemer D , teda $D_e = \eta_d D$, kde η_d je účinnosť priemeru apertúry.



Obr. 5.4 Vyžarovací diagram antény s kruhovou apertúrou

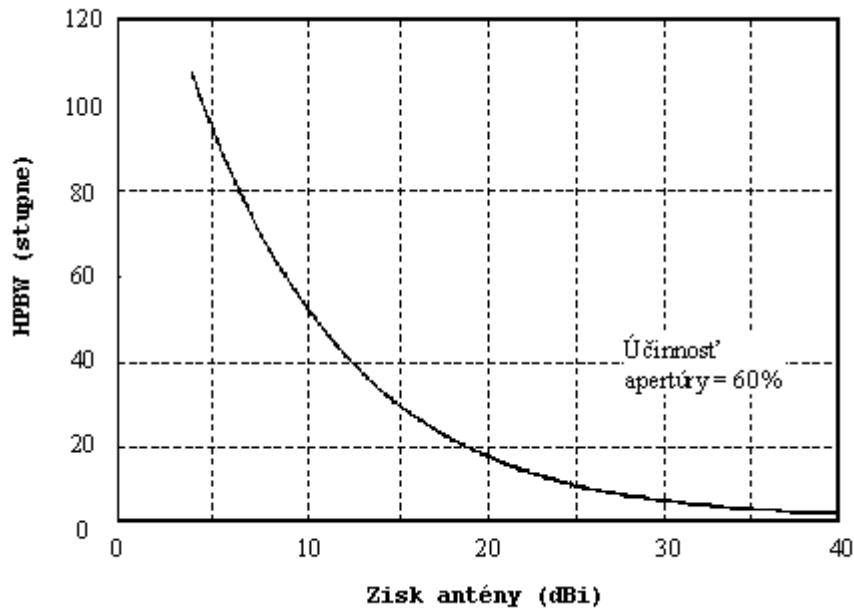
Šírka zväzku [6] je určená polovicou hustoty výkonu šírky zväzku (HPBW) ako $2\theta_{HP}$, kde θ_{HP} je uhol, pri ktorom poklesne hustota výkonu na polovičnú hodnotu (o 3dB). HPBW získame polynomicou aproximáciou z (5.6):

$$\begin{aligned} \text{HPBW} &= 2\theta_{HP} \\ &\approx 56 \times \frac{\lambda}{\eta_D D} \\ &\approx 70 \times \frac{\lambda}{D} \quad (\text{stupne}) \end{aligned} \quad (5.7)$$

kde $\eta_D = 0.8$ bolo zvolené ako všeobecná hodnota pre skutočné antény. Podľa (5.4) a (5.7), vzťah medzi ziskom a HPBW je:

$$\text{HPBW} = 70\pi \sqrt{\frac{\eta}{G_a}} \quad (5.8)$$

Obrázok 5.5 zobrazuje závislosť medzi HPBW a ziskom apertúry antény, vypočítaného podľa (1.8), v ktorom účinnosť apertúry je 60% ($\eta_D = 0,8$).



Obr. 5.5 Závislosť medzi ziskom a HPBW apertúry antény

5.2.3 Polarizácia a axiálny pomer

Ak sú elektrické a magnetické zložky poľa v rovine striedavé, dostávame tak rovinne-polarizovanú vlnu, alebo zjednodušene rovinnú vlnu. V rovinných vlnách sú elektrické a magnetické zložky ortogonálne a sú tiež kolmé na smer šírenia vlny. Elektromagnetické vlny, vyžarované anténou, umiestnenou ďaleko od prijímacej antény, sú v blízkosti prijímacej antény považované za rovinné vlny. Ak sa rovinná vlna šíri pozdĺž z-ovej osi a elektrická zložka E je na $x \rightarrow z$ roviny, E bude mať nasledujúcu x-ovú zložku:

$$E_x = E_a e^{j(\omega t - kz + \phi_a)} \quad (5.9)$$

kde E_a , a , k a ϕ_a označuje maximálnu amplitúdu elektrickej zložky, uhlovú frekvenciu ($=2\pi f$), vlnové číslo a počiatočnú fázu. Táto vlna je nazývaná lineárne- (vertikálne) polarizovanou. Podobne pre lineárne- (horizontálne) polarizovanú vlnu, ktorej elektrická zložka je na $y \rightarrow z$ roviny, môžeme napísať:

$$E_y = E_b e^{j(\omega t - kz + \phi_b)} \quad (5.10)$$

kde E_b a ϕ_b sú maximálna amplitúda a počiatočná fáza vlny. Uvažujme vlnu E, ktorá je zložená z E_x a E_y . Potom môžeme napísať:

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{x}E_x + \mathbf{y}E_y \quad (5.11)$$

kde \mathbf{x} a \mathbf{y} sú jednotkové vektory na x -ovej a y -ovej osi. Rovnica (5.11) je všeobecný výraz rovinnej vlny šíriacej sa v smere osi z a táto vlna sa nazýva elipticky-polarizovaná vlna.

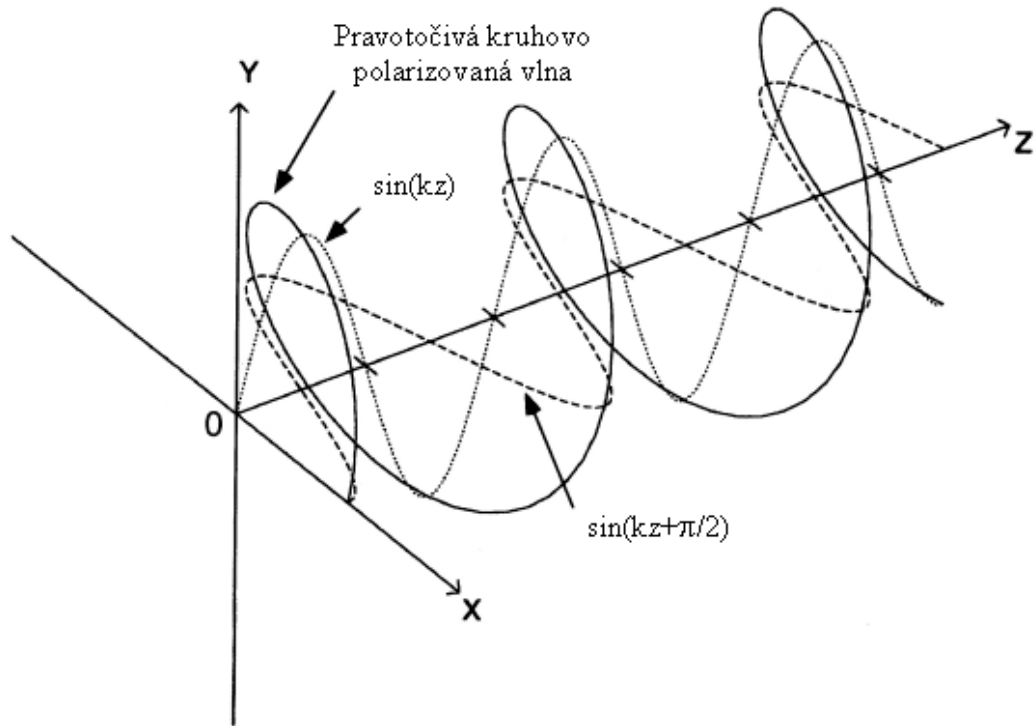
Ak E_x a E_y spĺňajú nasledujúcu podmienku, že amplitúdy sú rovnaké a fáza sa líši o $\pi/2$, potom :

$$E_a = E_b = E, \quad \phi_a = 0, \quad \phi_b = \pi/2 \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}| &= E \left| e^{j(\omega t - kz)} \right| \left| e^{j\pi/2} \right| \\ &= E \end{aligned} \quad (5.13)$$

Rovnica (5.13) ukazuje, že vektor elektrickej zložky rotuje okolo osi z a jeho amplitúda je konštantná. Táto polarizovaná vlna je nazývaná kruhovo-polarizovaná vlna, ktorá sa skladá z dvoch ortogonálnych lineárnych polarizovaných vln s fázovým posunom o $\pi/2$.

Obrázok 5.5 zobrazuje kruhovo-polarizovanú vlnu [7], šíriacu sa v smere osi z . Elektrické pole y -ovej zložky predbieha o $\pi/2$ pole x -ovej zložky. Ak sa elektrická vlna vzdáva od miesta pozorovania, elektrický vektor pri šírení v smere osi z rotuje v smere hodinových ručičiek. Je treba poznamenať, ako je možné vidieť zo vzťahu 5.9, že elektrická vlna je funkciou času (t) a priestoru (z). V mieste pozorovania s postupom času rotuje vektor elektrickej vlny proti smeru hodinových ručičiek.



Obr. 5.6 Kruhovo polarizovaná vlna pozdĺž osi z

Táto vlna je nazývaná ľavotočivá kruhovo-polarizovaná vlna. Je veľmi dôležité, aby smery priestorového a časového otáčania boli opačné. To zodpovedá aj faktu, že znamienka pre čas (t) a priestor (z) vo vzťahu 5.9 sú rôzne. V elektroinžinierstve, vrátane satelitných komunikácií, sa rotujúca vlna pohybuje vždy z miesta pozorovania, teda pozorovateľ sleduje odchádzajúcu vlnu pri pohľade na zadnú časť antény. Ak sa vlna pohybuje smerom ku pozorovateľovi, rotuje opačne.

Ak v predchádzajúcich rovniciach amplitúdy a fázy, medzi dvoma vlnami, nie sú rovnaké alebo rovné $\pi/2$, tak taká vlna sa nazýva elipticky-polarizovaná vlna.

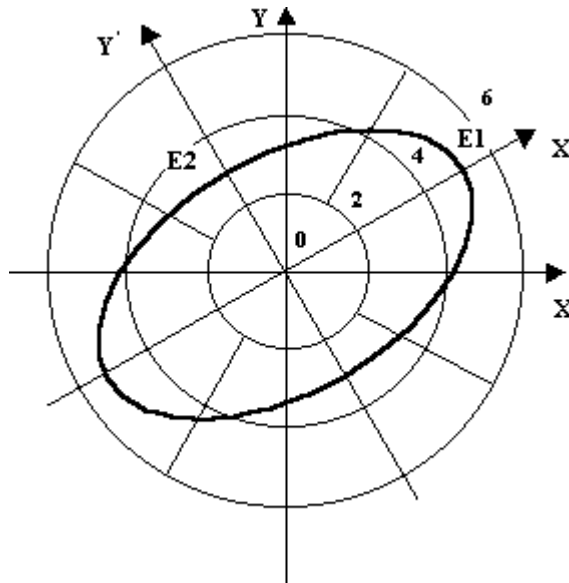
Obrázok 5.7 zobrazuje typ okamžitej elektrickej zložky vektora obyčajnej eliptickej vlny. $X'-Y'$ osi sú zvolené tak, aby zodpovedali hlavnej a vedľajšej osi. Vo všeobecnosti súradnice $X-Y$ a $X'-Y'$ nie sú rovnaké a uhol medzi dvoma súradnicami je funkciou amplitúd a fáz z (1.9) a (5.10).

Axiálny pomer (AR) [1] je daný ako pomer hlavnej osi elektrickej zložky ku vedľajšej osi:

$$|AR| = |E_1 / E_2| \quad (1 \leq |AR| \leq \infty) \quad (5.14)$$

Znamienko AR označuje smer rotácie, avšak pri vyjadrovaní kruhovo-polarizovaných vln sa obvykle používa absolútna hodnota. AR môže byť vyjadrený v dB, výrazom:

$$[AR] = 20 \log(|E1/E2|) \quad (\text{dB}) \quad 0 \leq [AR] \leq \infty \quad (5.15)$$



Obr. 5.7 Celková eliptická polarizácia

Napríklad, axiálny pomer lúča zobrazený na obrázku 5.6 je $1,67 = 5/3$ (4,4dB). Hodnoty $AR=1$ (0dB) a $AR=\infty$ (∞ dB) zodpovedajú kruhovej polarizácii a lineárnej polarizácii vln. AR je určený účinnosťou antény a teda je to jeden z najdôležitejších parametrov kruhovo-polarizovaných antén. Je zrejme, že AR závisí na smere s ohľadom na os antény. Najlepší (najmenší) je v hlavnom smere vyžarovania antény, a ďalej ku okrajom antény sa zhoršuje.

5.2.4 Polarizačné neprispôsobenie

V mobilných satelitných komunikáciách sa používajú kruhovo-polarizované vlny, aby sa predišlo potrebe sledovania polarizácie. Ale v praxi kruhovo-polarizované antény vysielajú elipticko-polarizované vlny a nie ideálne kruhovo-polarizované vlny s AR 0dB. Táto charakteristika je rovnaká pre obe, vysielacie aj prijímacie antény. Z tohto dôvodu dochádza k vzniku *polarizačného neprispôsobenia* [1]. Ak predpokladáme, že AR z vysielacej a prijímacej antény sú AR_a a AR_b , tak minimálne a maximálne výkonové straty vplyvom polarizačného neprispôsobenia sú vypočítané nasledujúcimi rovnicami:

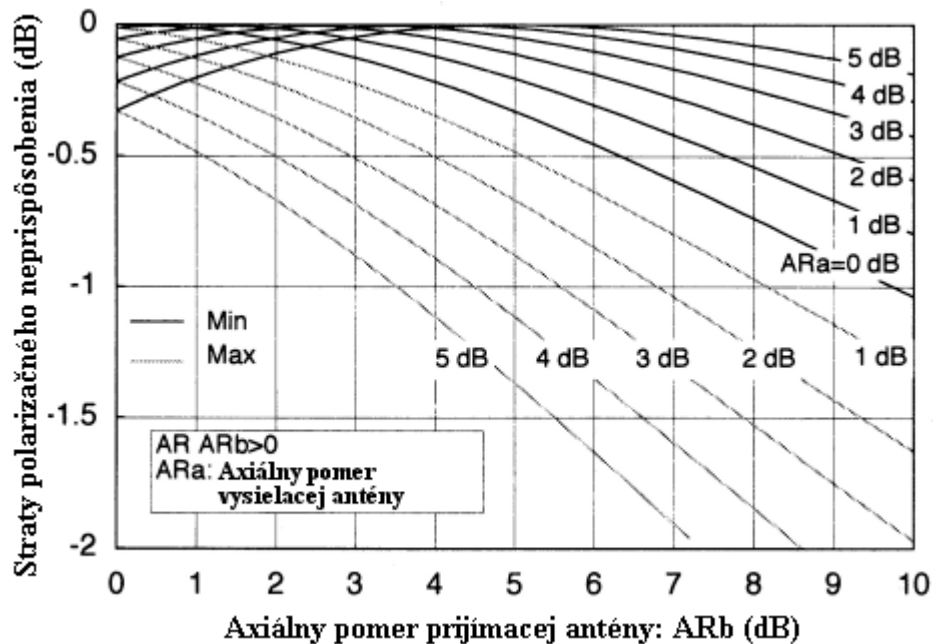
$$P_{\min} = \frac{(1 + AR_a \cdot AR_b)^2}{(1 + AR_a^2) \cdot (1 + AR_b^2)} \quad (5.16)$$

$$P_{\max} = \frac{(AR_a \cdot AR_b)^2}{(1 + AR_a^2) \cdot (1 + AR_b^2)} \quad (5.17)$$

$$0 \leq P_{\max}, P_{\min} \leq 1 \quad (5.18)$$

pričom berieme do úvahy znamienko AR. Ak vysielacie a prijímacie antény majú rovnako rotujúcu polarizáciu, $AR_a \cdot AR_b \geq 0$ a ak majú opačnú polarizáciu $AR_a \cdot AR_b \leq 0$.

Obrázok 5.8 zobrazuje straty polarizačným neprispôsobením, vypočítané podľa (5.16), (5.17) a (5.18). Úsečky a súradnice označujú axiálne pomery z prijímacej antény a straty polarizačným neprispôsobením. Parametre sú axiálne pomery z vysielacej antény, ktoré majú zvolené hodnoty 0, 1, 2, 3, 4 a 5dB. V prijímaných hodnotách výkonu sa vyskytujú maximá a minimá. Toto je fyzikálne vysvetlenie skutočnosti, že prijímaný výkon sa stáva maximálny vtedy, keď hlavná a vedľajšia os sa zhodujú a prijímaný výkon sa stáva minimálny vtedy, keď hlavná a vedľajšia os sú ortogonálne.



Obr. 5.8 Straty polarizačným neprispôsobením medzi vysielacími a prijímacími anténami s axiálnymi pomermi AR_a a AR_b

Všeobecne, axiálne pomery parabolických antén sú dosť malé, menej ako 2dB. Pre antény na palube satelitov sa AR považuje za dostatočne nízky, pretože sú väčšinou parabolické a ich sklon voči Zemi je dostatočne malý, okolo 17 stupňov. Napriek tomu sa ale v mobilných satelitných komunikáciách považujú fázované sústavy antén za najvhodnejšie pre použitie na lietadlách a malých autách. Ako bude spomenuté neskôr, fázované antény majú svoje nevýhody, týkajúce sa AR, obzvlášť vtedy, keď zväzok sníma väčší uhol.

5.3 Základné antény používané v MSKS

5.3.1 Anténa s krížovým dipólom

Dipólová anténa s polvlnovou dĺžkou ($\lambda/2$) je najviac používaná a taktiež veľmi populárna v anténových systémoch, tak ako parabolická anténa v mobilných satelitných komunikáciách. Polvlnový dipól je líniová anténa, na ktorej sa mení hodnoty amplitúdy prúdu s polovicou sínusovej vlny, pričom má maximum v strede dipólu.



Obr. 5.9 Praktické prevedenie antény s krížovým dipólom

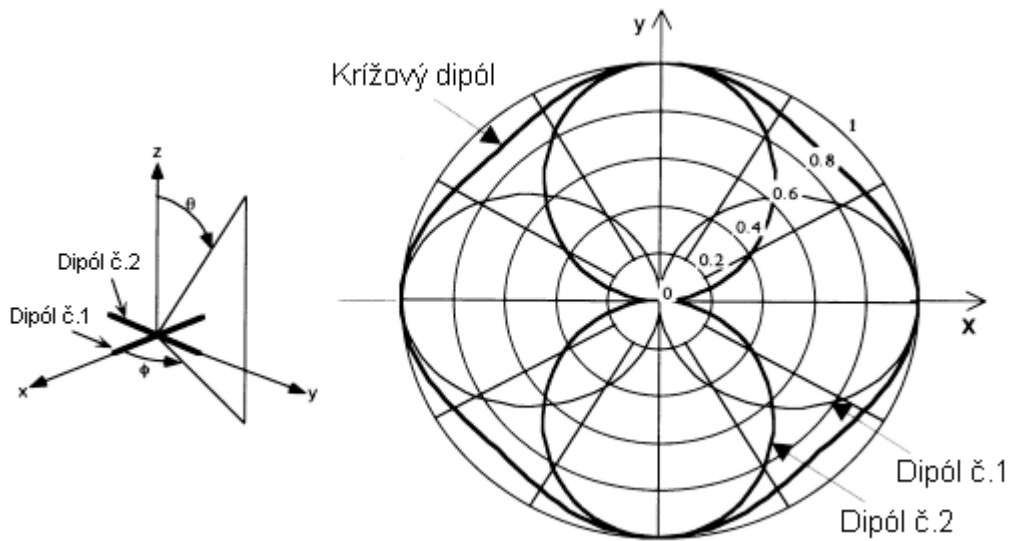
Vyžarovací diagram polvlnového dipólu č.1 je zobrazený na obrázku 5.10 a vypočítame ho podľa vzťahu [3]:

$$D_{1\Phi}(\Phi) = \left| \frac{\cos[(\pi/2)\cos\Phi]}{\sin\Phi} \right| \quad (5.19)$$

Podobne, vyžarovací diagram dipólu č.2 je daný vzťahom:

$$D_{2\Phi}(\Phi) = \left| \frac{\cos[(\pi/2)\sin\Phi]}{\cos\Phi} \right| \quad (5.20)$$

Diagramy $D1_\phi(\phi)$ a $D2_\phi(\phi)$ sú vyobrazené hrubými a tenkými čiarach vo vnútri súradnicového systému. HPBW je okolo 78.



Obr. 5.10 Súradnicový systém a vyžarovací diagram dipólu a křížového dipólu

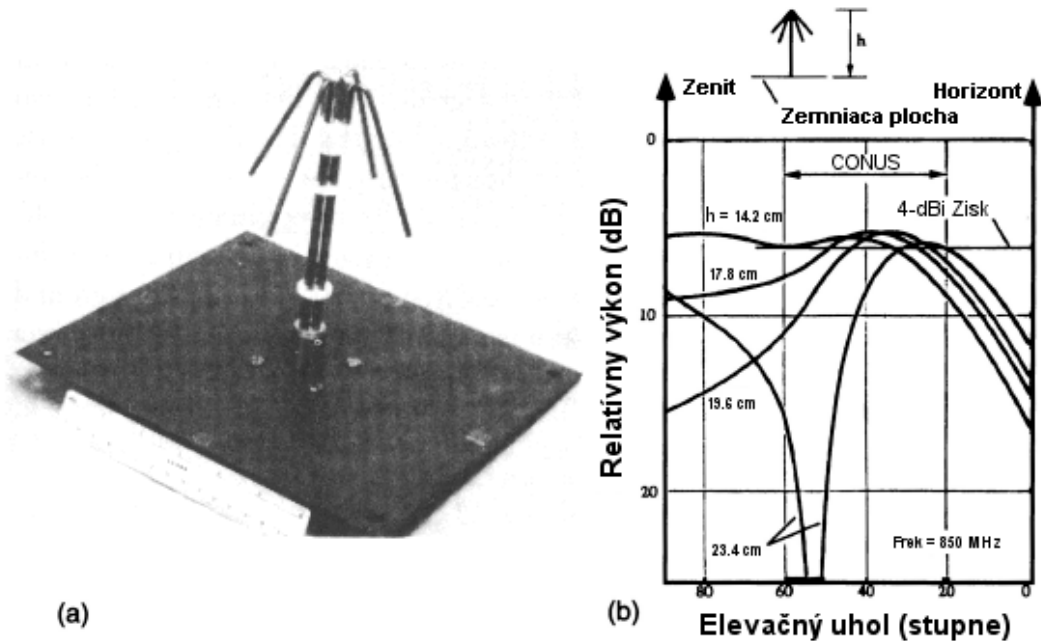
Pretože dipólová anténa vyžaruje lineárne-polarizované vlny, potom *anténa s křížovým dipólom* je používaná na generovanie kruhovo-polarizovaných vln. Dva dipóly sú geometricky ortogonálne (x a y osi na obrázku 5.10), a sú napájané rovnakou amplitúdou s fázovým rozdielom $\pi/2$. Vyžarovací diagram antény s křížovým dipólom je tiež znázornený pomocou hrubej čiary na obrázku 5.10, ktorý je skoro *všesmerový* v horizontálnej rovine. Dipólová anténa potrebuje symetrizačný (prispôsobovací) člen pre pripojenie ku koaxiálnemu káblu, ktorý je neprispôsobený. Ďalej je potrebný 3dB-ový výkonový delič pre rovnaké výkonové budenie s fázovým rozdielom $\pi/2$ pre každý dipólový element.

Smerovosť $D_{\text{dipole}}(\Phi)$ antény s křížovým dipólom môže byť získaná zo vzťahov (1.19) a (5.20) nasledovne:

$$D_{\text{dipole}}(\Phi) = \left| \frac{\cos[(\pi/2)\cos \Phi]}{\sin \Phi} + j \frac{\cos[(\pi/2)\sin \Phi]}{\cos \Phi} \right| \quad (5.21)$$

Anténa s křížovým dipólom má maximálny zisk v hlavnom smere vyžarovania (t.j. v smere osi z , podľa obrázku 5.10). V mobilných satelitných komunikáciách, najmä v pozemných mobilných komunikáciách, elevačné uhly nie sú 90° okrem miesta presne pod satelitom. Na optimalizovanie vyžarovacieho diagramu, dipóly antény sú ohnuté k zemi, tak ako to ukazuje obrázok 5.11 a takáto anténa sa nazýva *prekřížená ohnutá dipólová anténa* [1]. Prekřížená ohnutá dipólová anténa je veľmi vhodná pre pozemné mobilné satelitné komunikácie, kde požadované uhlové pokrytie je úzke so skoro konštantnou eleváciou. Pri nastavovaní výšky

medzi dipólovými elementmi a zemiacou rovinou a uhla zakrivenia dipólov, môžu byť zisk a elevácia optimalizované pre daný rozsah pokrytia. Obrázok 5.11. ukazuje vyžarovací diagram antén vytvorených firmou Jet Propulsion Laboratory (JPL), ktoré sa používajú v celých kontinentálnych Spojených štátoch (CONUS). Majú zisk 4 dBi.



Obr. 5.11 (a) Anténa s ohnutým krížovým dipólom a (b) jej vyžarovací diagram

5.3.2 Skrutkovicová anténa

Skrutkovicová anténa [9] môže ľahko generovať kruhovo polarizované vlny bez prispôbovacieho člena alebo 3dB-ového výkonového deliča, ktoré sú požadované na budenie súmerne napájaných dipólov alebo kruhovo-polarizovaných krížových dipólov.

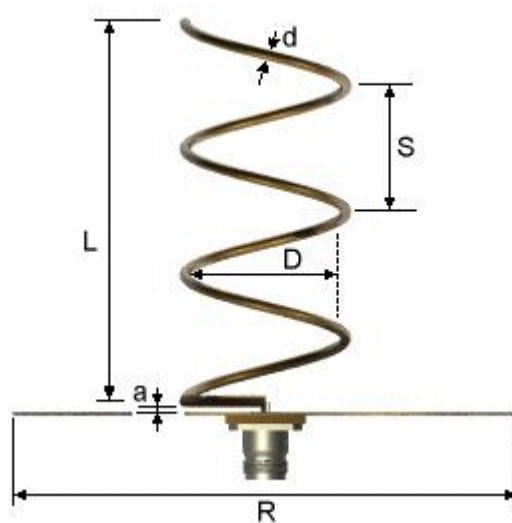
Taktiež dokáže pracovať v oveľa širšom frekvenčnom spektre, pretože je to typ antény s postupnou vlnou.



Obr. 5.12 Praktické prevedenie skrutkovicovej antény

Na obrázku 5.13 je zobrazená skrutkovicová anténa so zemniacou rovinou s priemerom R , dĺžkou L , priemerom skrutkovice D a zdvihom S . Priemer zemniacej roviny je obvykle väčší ako jedna vlnová dĺžka. Priemer skrutkovice D sa volí ako 0,32 násobok a zdvih ako 0,22 násobok λ . Počet závitov je $N = L/S$. Obvod skrutkovice (πD) je 0,75 až 1,25 násobok λ . Pozdĺž z-ovej osi môžu byť vysielané kruhovo-polarizované vlny s dobrým axiálnym.

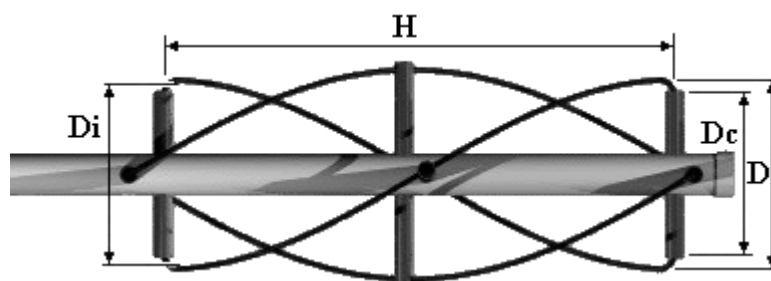
Zisk skrutkovicovej antény závisí od počtu závitov N . Typická hodnota zisku je 8 dBi a hodnota HPBW je 50° pre $N = 10 \sim 12$.



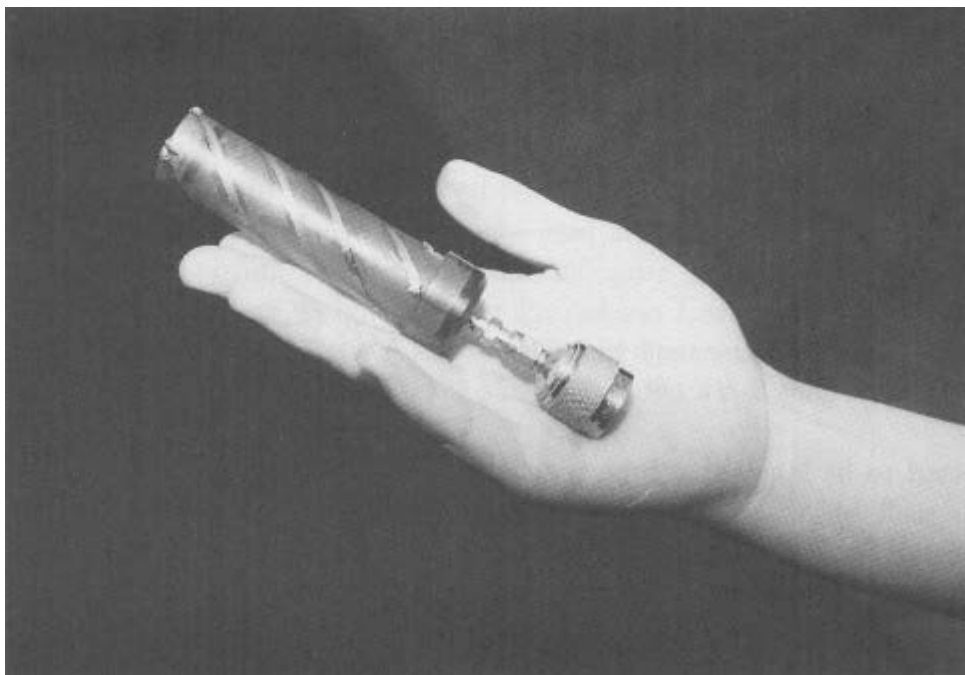
Obr. 5.13 Skrutkovicová anténa a jej rozmery

Ako mobilné antény je veľmi výhodné používať *kvadrifilárne skrutkovicové antény* [10]. Kvadrifilárne *skrutkovicové* antény sa skladajú zo štyroch stočených, rovnako veľkých skrutkovic na obvode valca, ktoré sú napájané signálmi s rovnakou amplitúdou s fázami 0° , 90° , 180° a 270° . Táto anténa má dve prednosti oproti jednoduchým skrutkovicovým anténam. Prvou je zvýšenie šírky pásma. Môže generovať kruhovo-polarizované vlny vo frekvenčnom rozsahu 0,4 až 2,0 vlnovej dĺžky obvodu skrutkovice. Druhou prednosťou je nižšia frekvencia pre osové operácie. Základnou nevýhodou je zvýšenie zložitosti napájacieho systému.

Na obrázku 5.14 je skrutkovicová anténa s dĺžkou H , priemerom skrutkovice D , vnútorným priemerom D_i a kompenzovanou dĺžkou horizontálneho oddeľovača D_c . Veľkosť zemniacej roviny je 3-násobok obvodu skrutkovice. Dĺžka H sa zvyčajne volí ako 0,35 násobok λ a priemer skrutkovice 0,16 násobok λ . Obrázok 5.15 zobrazuje kvadrifilárnu skrutkovicovú anténu, vyrobenú pre GPS systém, pracujúcu na frekvencii 1.2 GHz.



Obr. 5.14 Kvadrifilárna skrutkovicová anténa a jej rozmery



Obr. 5.15 Praktické prevedenie kvadrifilárnej skrutkovicovej antény pre GPS

5.3.3 Mikropásiková patch anténa

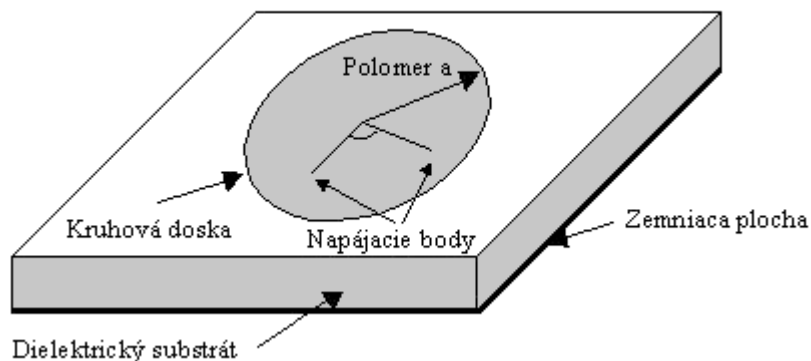
Mikropásiková patch anténa [1] má veľmi malé rozmery a dobrú mechanickú pevnosť, preto je najlepším riešením pre malé autá a lietadlá, kde je požadovaná čo najmenšia zmena aerodynamických vlastností vplyvom umiestnenia antény na povrchu lietadla. Zvyčajne sa element antény volí v tvare kruhovej platne nanesej na tenkom dielektrickom substráte uloženom na zemniacej doske. Používajú sa však aj elementy tvaru obdĺžnika.

Na obrázku 5.16 je zobrazená kruhová patch anténa, ktorá je vhodná pre použitie na automobile. Je v magnetickom prevedení, čo umožňuje jej jednoduché upevnenie na streche automobilu. Rozmery antény sú veľmi malé, priemer je 10 cm.



Obr. 5.16 Praktické prevedenie kruhovej patch antény

Obrázok 5.17 ukazuje základnú konfiguráciu kruhovej patch antény, ktorá má dva napájacie body pre generovanie kruhovo-polarizovaných vln.



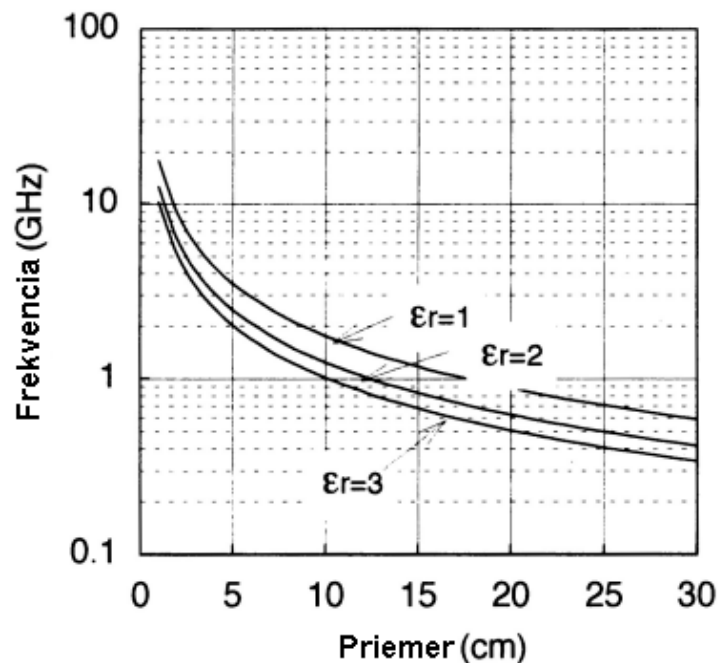
Obr. 5.17 Základná konfigurácia kruhovej mikropásikovej patch antény s dvoma napájacími bodmi

Rezonančná frekvencia vybudená základným módom TM_{11} je daná:

$$f = \frac{1.84 * c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.22)$$

kde a , c a ϵ_r sú polomer kruhovej plochy, rýchlosť svetla a relatívna permitivita substrátu. Obrázok 5.18 ukazuje závislosť medzi frekvenciou a priemerom kruhovej patch antény.

V pozemských mobilných komunikáciách je za lepší typ považovaná mikropásiková anténa budená vyšším módom (TM_{21}), pretože môžeme optimalizovať jej zisk v elevačných uhloch k satelitu, rovnako ako pri anténe s krížovým dipólom. Rezonančná frekvencia kruhovej patch antény budenej vyšším módom je daná vzorcom 5.22 len koeficient 1,84 je nahradený hodnotou 3,05. Z toho vyplýva, že oblasť dosahu kruhovej patch antény budenej vyšším módom je približne 1.7 krát väčšia.



Obr. 5.18 Vzťah medzi frekvenciou a priemerom kruhovej patch antény

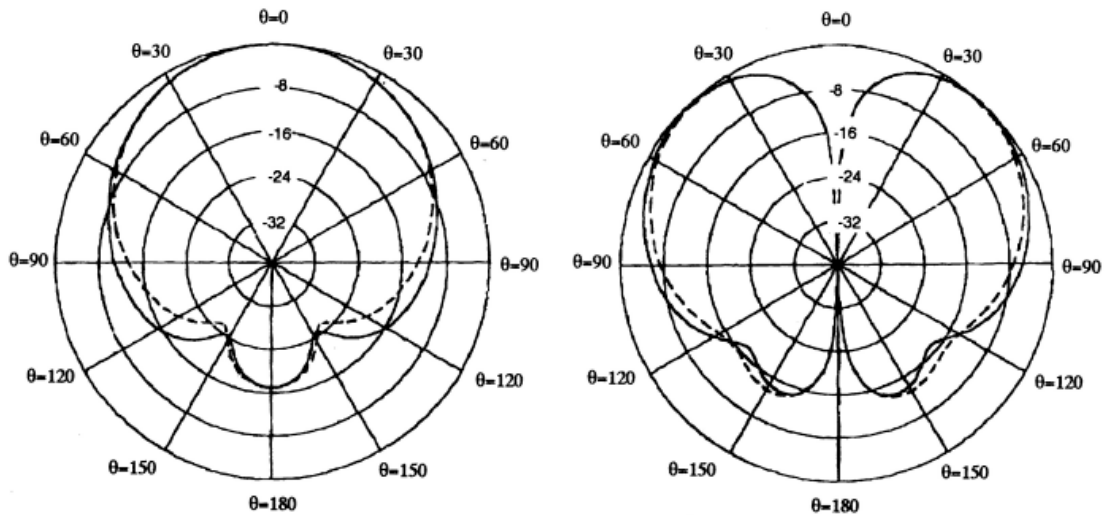
Intenzita elektrického poľa vo vzdialenosti r TM_{nm} módu budenia kruhovej patch antény v sférických súradniciach môže byť vypočítané z nasledujúcich rovníc:

$$E_0 \propto \cos n\theta [J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)]$$

$$E_\phi \propto \cos \theta \sin n\phi [J_{n+1}(k_0 a \sin \theta) - J_{n-1}(k_0 a \sin \theta)] \quad (5.23)$$

kde k_0 a $J_n(x)$ označujú číslo vlny v priestore šírenia a n -tý rád Besselovej funkcie.

Obrázok 5.19 ukazuje typický vyžarovací diagram pre základný mód (vľavo) a pre vyšší mód (vpravo) kruhovej patch antény, ktorej zisk je okolo 6-8 dBi.



Obr. 5.19 Typický vyžarovací diagram pre základný mód (vľavo) a vyšší mód (vpravo) kruhovej patch antény zobrazený v polárnych súradniciach.

5.3.4 Fázovaná anténová sústava

Niekoľko antén môže byť usporiadaných v priestore do sústavy, pre dosiahnutie požadovaného tvaru vyžarovacieho diagramu a smerovosti. Tento typ antény sa nazýva anténová sústava, ktorá pozostáva z viac ako dvoch prvkov. Každý prvok anténovej sústavy je budený rovnakou amplitúdou a fázou a anténa má pevný vyžarovací diagram. Naproti tomu, vyžarovací diagram môže byť menený fázou budiaceho prúdu každého prvku antény. Tento typ antény sa nazýva *fázovaná anténová sústava* [1], ktorá má veľa výhod v podmienkach mobilných satelitných komunikácií. Patria medzi ne kompaktnosť, nízka hmotnosť, veľmi rýchle sledovacie vlastnosti a relatívne nízka cena.

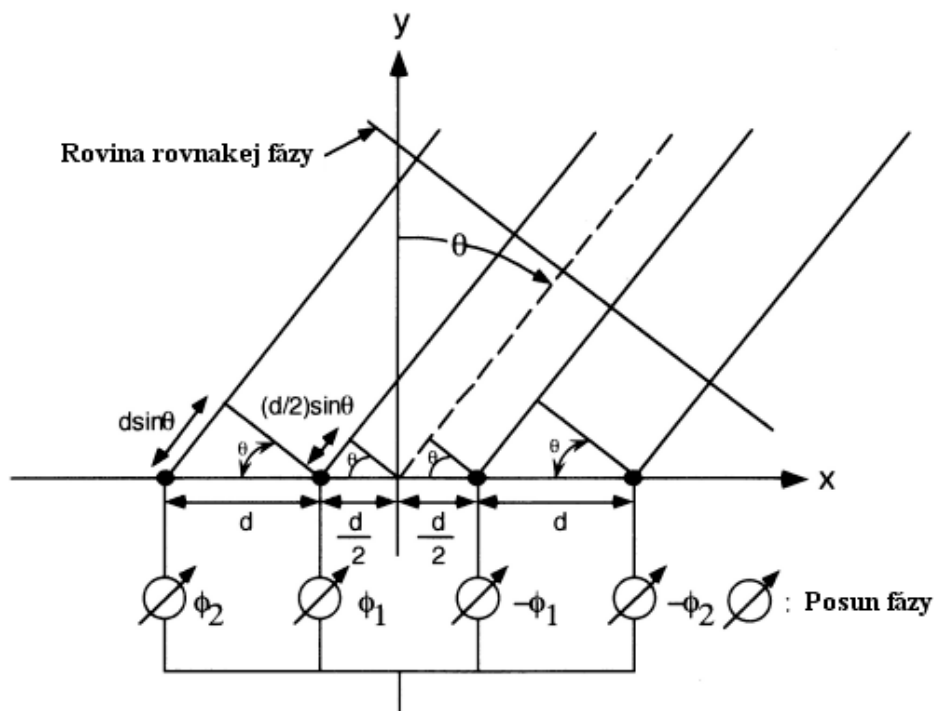
Na obrázku 5.20 je prevedenie fázovanej anténnej sústavy TracVision od firmy KVH, ktorá je vhodná pre použitie v pozemných mobilných satelitných komunikáciách. Umožňuje prijímanie satelitného signálu z geostacionárnych satelitov v pohybujúcich sa dopravných prostriedkoch na otvorených komunikáciách.



Obr. 5.20 Praktické prevedenie fázovanej anténnej sústavy

Sústavy môžu byť usporiadané v rôznych geometrických konfiguráciách. Najpoužívanejším typom v mobilných satelitných komunikáciách je planárna sústava, v ktorej sú prvky usporiadané v rovine. Táto konfigurácia umožňuje snímanie hlavného zväzku v azimutálnom aj elevačnom uhle, čo sa využíva pri sledovaní satelitu.

Obrázok 5.21 ukazuje najjednoduchšiu lineárnu fázovanú sústavu, ktorá pozostáva zo štyroch prvkov, ktoré majú rovnaké elektrické charakteristiky a sú umiestnené v rovnakej vzdialenosti d pozdĺž osi x .



Obr. 5.21 Jednoduchá lineárna fázovaná sústava, v ktorej je každý prvok budovaný rovnakou amplitúdou a rozdielnou fázou

Na obrázku 5.21, ak každý prvok je budovaný prúdom s rovnakou amplitúdou a fázou (hodnoty fázových posunov sú rovnaké), potom intenzita el. poľa vo vzdialenosti r , fázovanej antény je daná:

$$\begin{aligned}
 E(\theta) &\propto \frac{e^{-jkr}}{r} D(\theta) \left[e^{-j\left(\frac{3kd}{2}\sin\theta - \phi_2\right)} + e^{-j\left(\frac{kd}{2}\sin\theta - \phi_1\right)} \right. \\
 &\quad \left. + e^{j\left(\frac{kd}{2}\sin\theta - \phi_1\right)} + e^{j\left(\frac{3kd}{2}\sin\theta - \phi_2\right)} \right] \quad (5.24) \\
 &= \frac{e^{-jkr}}{r} 2D(\theta) \left[\cos\left(\frac{kd}{2}\sin\theta - \phi_1\right) + \cos\left(\frac{3kd}{2}\sin\theta - \phi_2\right) \right] \\
 &= \frac{e^{-jkr}}{r} D(\theta) AF
 \end{aligned}$$

kde nulová fáza je v počiatku súradnicového systému a $D(\theta)$ je vyžarovací diagram jedného prvku antény. ϕ_1, ϕ_2 vrátane ich znamienok sú hodnoty fázových posunov, ako je to znázornené na obrázku 5.21. Koeficient AF je nazývaný činiteľ sústavy. Vyžarovací diagram pre fázovanú anténu získame vynásobením vyžarovacích diagramov jednotlivých prvkov antény a činiteľa sústavy.

Napríklad činitele sústavy AF_2 a AF_4 lineárnych sústav s dvoma a štyrmi prvkami, napájaných prúdom s rovnakou fázou ($\phi_1 = \phi_2 = 0$), pričom vzdialenosť medzi prvkami je rovná polovici vlnovej dĺžky $d = \lambda/2$ sú vypočítané ako:

$$\begin{aligned}
 AF_2 &= \cos\left(\frac{\pi}{2}\sin\theta\right) \\
 AF_4 &= \cos\left(\frac{\pi}{2}\sin\theta\right) + \cos\left(\frac{3\pi}{2}\sin\theta\right) \quad (5.25)
 \end{aligned}$$

Obrázok 5.22. ukazuje diagramy činiteľov sústavy pre (a) dvojprvkovú a (b) štvorprvkovú anténovú sústavu. Vzdialenosť medzi prvkami je polovica vlnovej dĺžky. Maximálna hodnota bola získaná v smere hlavného vyžarovania (y -ová os).

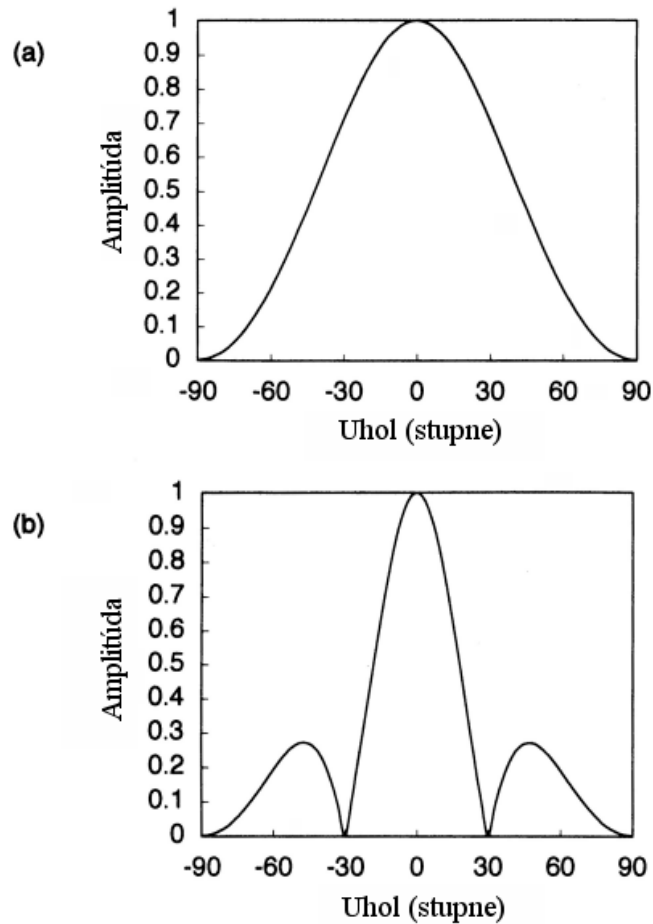
Vo vzťahu (5.22), činiteľ sústavy dosiahne svoje maximum v smere θ_0 , ak sú splnené nasledujúce vzťahy. Toto môže byť fyzikálne vysvetlené tak, že fázy čela vlny sú rovnaké, tak, ako je to na obrázku 5.21.

$$\frac{kd}{2}\sin\theta_0 - \phi_1 = \frac{3kd}{2}\sin\theta_0 - \phi_2 = n\pi \quad \text{pre } n = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (5.26)$$

V prípade že $n=0$

$$\phi_1 = \frac{kd}{2} \sin\theta_0 \quad \text{a} \quad \phi_2 = \frac{3kd}{2} \sin\theta_0 \quad (5.27)$$

To znamená, že maximálny zisk môže byť získaný v požadovanom smere a zväzok lúčov môže byť snímaný v požadovanom uhle mimo priameho smeru vyžarovania.



Obr. 5.22 Činitele sústavy pre (a) dvojprvkovú a (b) štvorprvkovú lineárnu anténu sústavu s rozmiestnením prvkov s polovicou vlnovej dĺžky

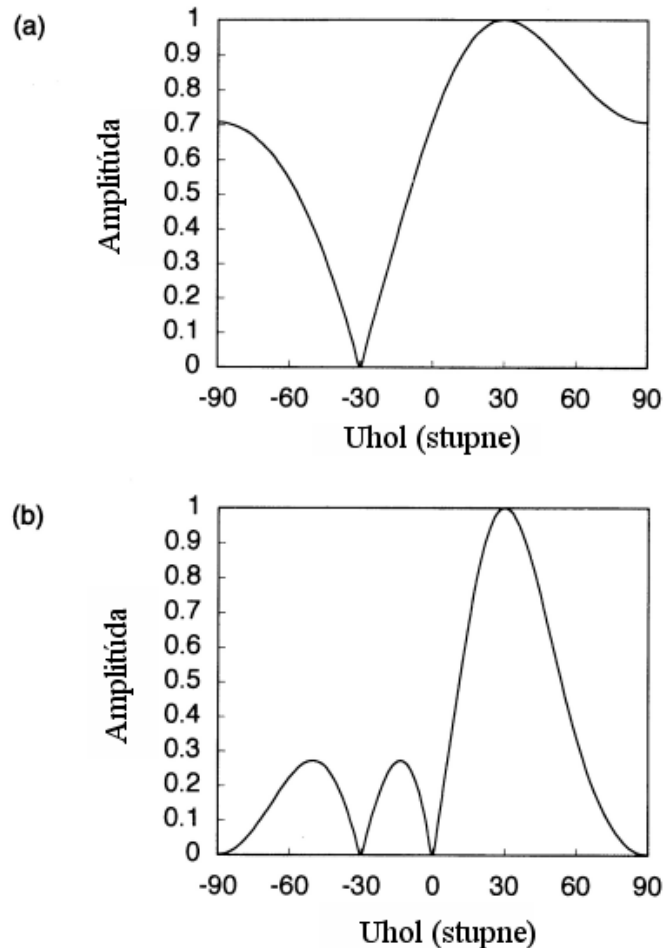
Vyžarovací diagram fázovanej anténovej sústavy s dvoma alebo štyrmi prvkami môže byť vypočítaný pomocou nasledujúcich rovníc:

$$D_2(\theta) = \cos\left[\frac{\pi}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right]$$

$$D_4(\theta) = \cos\left[\frac{\pi}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right] + \cos\left[\frac{3\pi}{2}(\sin\theta - \sin\theta_0)\right] \quad (5.28)$$

kde θ_0 je uhol smeru snímania. Predpokladá sa, že každý prvok je nesmerový a rozmiestnenie prvkov je s polovicou vlnovej dĺžky ($d = \lambda/2$).

Obrázok 5.23 zobrazuje vyžarovacie diagramy fázovanej anténovej sústavy s (a) dvojprvkovou a (b) štvorprvkovou lineárnou sústavou. Hlavný zväzok je snímaný pod uhlom 30 stupňov.



Obr. 5.23 Vyžarovací diagram fázovanej anténovej sústavy s (a) dvomi a (b) štyrmi prvkami pri snímaní hlavného zväzku pod 30 stupňovým uhlom

Pomocou riadenia budiaceho prúdu každého prvku môžeme meniť tvar vyžarovacieho diagramu pre špeciálne aplikácie. Za účelom potlačenia postranných lalokov na požadovanej úrovni, sa používa budenie s malou amplitúdou. Avšak, potlačenie úrovne postranných lalokov nemôže byť vykonané bez zníženia výkonnosti antény, teda zisku a HPBW. Jeden spôsob, ako optimalizovať nízku úroveň postranných lalokov a výkonnosť antény je pomocou Dolphovej-Čebyševovej distribúcie.

Obrázok 5.24 porovnáva vyžarovací diagram uniformne a neuniformne budenej fázovanej anténovej sústavy. V neuniformne budenej anténe, pomer amplitúd prúdov napájajúcich každý prvok je 0,7 (-3dB) , 1 (0dB) , 1 (0dB) a 0,7 (-3dB) zľava doprava pozdĺž osi

x ako je ukázané na obrázku 5.21. Zistilo sa, že pri zmešovaní budiaceho prúdu prvkov sa postranné laloky zmešujú, avšak šírka zväzku sa zväčšuje.

Z (5.25), požadovaný medziprvkový fázový rozdiel ϕ pre snímanie zväzku pod uhlom θ_0 je daný:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{2\pi d}{c} f \sin \theta_0 \quad (5.29)$$

pričom c a f predstavujú rýchlosť svetla a frekvenciu.

Keď sa frekvencia zmení o Δf , uhol snímania zväzku $\Delta\theta_0$ a uhol fázového rozdielu $\Delta\phi$ sú dané:

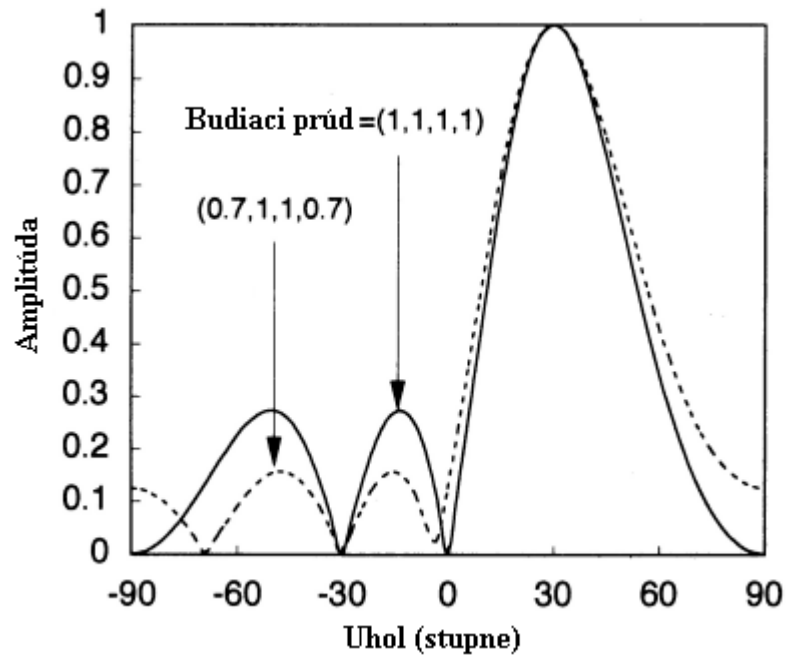
$$(\phi + \Delta\phi) = -\frac{2\pi d}{c} (f + \Delta f) \sin(\theta_0 + \Delta\theta_0) \quad (5.30)$$

Keď veľkosť fázy je pokladaná za konštantnú, alebo je závislá od frekvencie a $\Delta\phi$ sa rovná nule, potom ľavá strana (5.29) a (5.30) môžu byť porovnané nasledujúcim spôsobom:

$$f \sin \theta_0 = (f + \Delta f) \sin(\theta_0 + \Delta\theta_0) \quad (5.31)$$

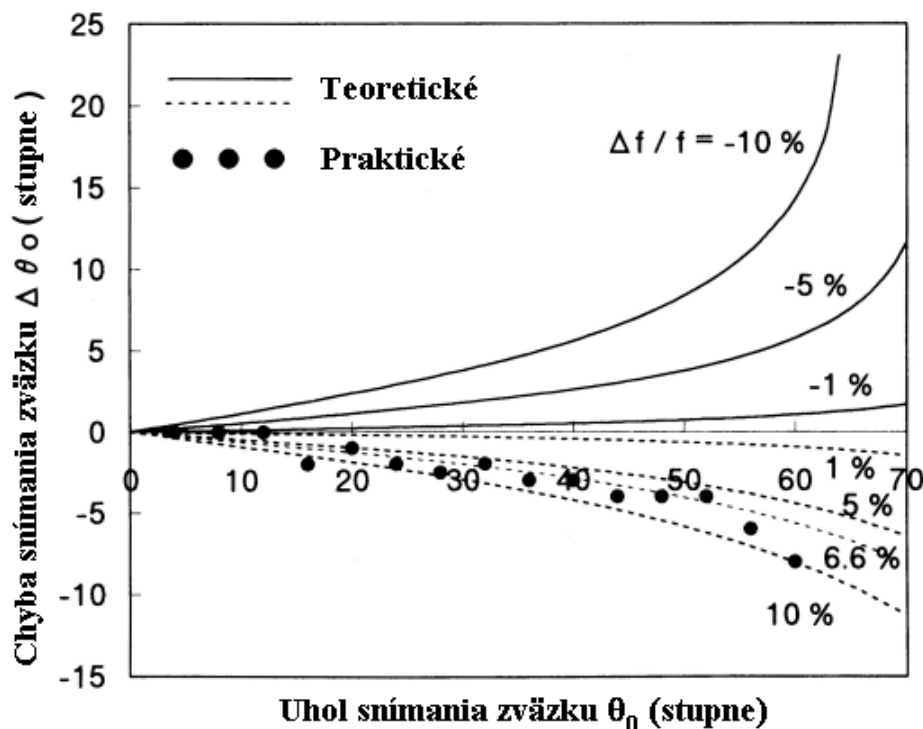
Z (5.31), hodnota $\Delta\theta_0$ je daná

$$\Delta\theta_0 = -\theta_0 + \sin^{-1} \left[\frac{\sin \theta_0}{1 + \frac{\Delta f}{f}} \right] \quad (5.32)$$



Obr. 5.24 Vyžarovací diagram uniformne budeného (plná čiara) a neuniformne budeného (bodkovaná čiara) fázového anténového poľa so štyrmi prvkami

Obrázok 5.25 zobrazuje teoreticky vypočítané výsledky z (5.32). Teoretická analýza ukazuje, že absolútna hodnota chyby snímania zväzku, keď zväčšujeme uhol snímania zväzku a rozdiel frekvencie. Taktiež bolo zistené, že ak $\Delta f \geq 0$, potom uhol snímania zväzku sa posúva k menším uhlom a ak $\Delta f \leq 0$, potom sa posúva k väčším uhlom, v porovnaní s požadovaným snímaným uhlom θ_0 pri frekvencii f . Ďalším zistením je, že chyby snímania zväzku sa znižujú, keď $\Delta f \geq 0$, ako keď $\Delta f \leq 0$. V niektorých prípadoch sa chyby snímania zväzku môžu stať závažným problémom v mobilných satelitných komunikáciách, pretože vysielacia frekvencia f_T a prijímacia frekvencia f_R sú rôzne (pre pohybujúce sa stanice, $f_T \geq f_R$) a $|(f_T - f_R) / f_R|$ je okolo 7% v L pásme (1,6/1,5 GHz) a okolo 50% v Ka pásme (30/20 GHz). Na obrázku 5.25 sú čiernymi krúžkami zobrazené experimentálne údaje odmerané pri pokusoch v ETS-V, pričom hodnota $\Delta f/f \cong 0,066$ ($f_R = 1,545$ MHz, $f_T = 1,647$ MHz).



Obr. 5.25 Teoretické hodnoty a experimentálne výsledky chýb snímania zväzku, spôsobených rozdielom frekvencie

Ako je možné vidieť, experimentálne výsledky sa celkom dobre zhodujú s teoretickými výpočtami.

Príčinou vzniku chýb snímania zväzku, ktoré sú pozorované medzi vysielacími a prijímacími frekvenciami je, že pri obidvoch frekvenciách sa používa ten istý posúvač fázy. Na elimináciu týchto chýb musí byť splnená nasledujúca rovnica, kde ϕ_R a ϕ_T predstavujú hodnoty fázového posunu pri f_R a f_T .

$$\frac{\Phi_R}{f_R} = \frac{\Phi_T}{f_T} \quad (5.33)$$

Z (5.33) je vidieť, že použitím frekvenčne závislých posúvačov fázy je možné výrazne znížiť hodnoty chýb snímania zväzku, vznikajúcich medzi vysielanou a prijímanou frekvenciou.

5.4 Požiadavky na antény prijímačov z GPS a LEO satelitov

5.4.1 Mechanické charakteristiky

5.4.1.1 Kompaktnosť a malá hmotnosť

Je samozrejme, že mobilné antény musia byť kompaktné a ľahké. Avšak kompaktná anténa má dve závažné nevýhody, ako nízky zisk a široké pokrytie lúčom. Zisk je úzko spojený so šírkou zväzku. Anténa s nízkym ziskom by mohla mať väčšiu šírku zväzku. Pretože zisk antény je teoreticky určený jej fyzickými rozmermi, zmenšenie rozmerov antény znamená zmenšenie jej zisku. Kvôli nízkemu zisku a obmedzenému dodávanému výkonu je pre mobilné antény veľmi náročné dosiahnuť dostatočnú prijímaciu schopnosť (G/T) a vysielač výkon (EIRP). Tieto nevýhody mobilných terminálov je možné kompenzovať satelitmi ktoré majú veľkú anténu a vysoko výkonný zosilňovač s dostatočným výkonom. Výkonný satelit s vysokým EIRP a G/T by mal umožnil výrobu mobilných terminálov vrátane kompaktných a ľahkých antén.

Druhou nevýhodou je to, že anténa so širokým zväzkom zvyčajne vysiela neželané signály a prijíma ich z rôznych smerov. Tie potom spôsobujú interferenciu, v iných systémoch, alebo od iných systémov. Široký lúč je tiež zodpovedný za niekoľko únikových efektov, ako napríklad odraz z povrchu mora v námorných satelitných komunikáciách, alebo viaccestný únik v pozemných mobilných satelitných komunikáciách. Od kompaktného anténového systému sa požaduje, aby zabránil úniku a interferencii.

5.4.1.2 Inštalácia

Jednoduchá inštalácia a vhodný tvar antény sú veľmi dôležitými požiadavkami v súčinnosti s kompaktnosťou a malou hmotnosťou. Požiadavky na antény, ktoré sú montované na lode, nie sú tak náročné ako požiadavky pri lietadlách a autách. Pretože aj malá loď má veľa priestoru na inštaláciu anténového systému. No, v prípade automobilov, obzvlášť malých osobných automobilov je potrebný malý rozmer a malá hmotnosť príslušenstva. Také isté sú aj podmienky v letectve, hoci tu sú prísnejšie požiadavky na uspokojenie leteckých štandardov. Malý odpor vzduchu je jednou z najdôležitejších požiadaviek pre antény v letectve [*]. Fázovaná anténová sústava je považovaná za najlepšieho kandidáta pre lietadlá a malé autá, lebo má malé rozmery a mechanickú pevnosť.

5.4.2 Elektrické charakteristiky

5.4.2.1 Frekvencia a frekvenčné pásmo

Typické frekvencie pridelené mobilným satelitným komunikáciám sú: L (1,6/1,5 GHz) a S (2,6/2,4 GHz) pásma, ktoré pracujú v súčasnosti a budú pracovať v budúcich mobilných satelitných komunikačných systémoch [4]. Budúce systémy budú využívať aj Ka (30/20 GHz) a milimetrové vlnové pásma. Požadované frekvenčné pásmo potrebné pre pokrytie vysielačích a prijímacích kanálov je vo všeobecnosti okolo 7% v L pásme a 40% v Ka pásme. Pre antény, ktoré pracujú v oboch – vysielačom aj prijímacom pásme, je veľmi náročná požiadavka, dosiahnuť šírku pásma cez 10%. Antény pre príjem signálov z GPS satelitov musia vedieť

prijímať na frekvenciách 1575,42 a 1227,60 MHz, v prijímačoch, ktoré využívajú PPS. Prijímače pracujúce len s SPS musia mať anténu naladenú iba na frekvenciu L1 pásma, teda 1575,42 MHz.

5.4.2.2 Polarizácia, axiálny pomer a postranné laloky

Aby sme sa v MSKS vyhli potrebe sledovania polarizácie, používajú sa kruhopolarizované vlny. Keď satelit aj mobilná pozemná stanica, používajú lineárne-(vertikálne alebo horizontálne) polarizované vlny, mobilná pozemná stanica musí zachovať anténu v zhode s polarizáciou. Ak je nasmerovanie mobilnej antény otočené o 90°, anténa nemôže prijímať signály zo satelitu. Ak sú použité kruhovo-polarizované vlny, musíme ešte vziať do úvahy stratu polarizačným neprispôbením, vplyvom axiálneho pomeru. Týka sa to hlavne fázovaných anténnych sústav antén.

Ako už bolo spomenuté pred tým, požadujeme, aby veľkosť postranných lalokov bola menšia ako istá maximálna hodnota. To preto aby sme sa vyhli interferencii na a z ostatných komunikačných systémov.

5.4.2.3 Zisk a pokrytie lúčom

Požadované zisky antén sú určované pri návrhu satelitného spoja, pri ktorom berieme do úvahy schopnosti satelitu a požadovanú kvalitu kanálu. Kvalita kanálu (C/N_0) závisí od G/T a EIRP hodnôt satelitu a mobilných pozemných staníc. V súčasných systémoch, ako sú OPTUS, AMSC a MSAT, je požadovaný stredný zisk od 8 – 15 dBi pre hlasové/vysokorychlostné dátové (okolo 24 Kbps) kanály. V prípade súčasného INMARSAT – A terminálu, je vyžadovaný pomerne „vysoký zisk“, okolo 24 dBi, čo je spôsobené rozdielom v schopnostiach satelitu. Antény s nízkym ziskom, okolo 0 až 4 dBi, sú použité v INMARSAT – C a iných systémoch, poskytujúcich pomalé dátové (nie hlasové) služby, okolo 600-1200 bps. GPS systém využíva antény s nízkym ziskom, pretože používa extrémne nízke dátové rýchlosti (50 bps) zo satelitov. Toto nie sú presné definície rozdielov medzi nízkym, stredným a vysokým ziskom. Avšak, v súčasnosti a blízkej budúcnosti, anténové zisky L – pásmových mobilných satelitných komunikačných systémov budú klasifikované, ako opisuje tabuľka 5.3.

Od zväzku lúčov mobilných antén požadujeme, aby pokryl vrchnú hemisféru nezávisle od pohybov stanice. Antény s nízkym ziskom majú výhody v zriaďovaní komunikačných kanálov bez sledovania satelitu, kvôli ich všesmerovému zväzku. Antény s vysokým ziskom musia satelit sledovať, lebo ich zväzok lúčov je úzko smerový.

Tab. 5.3 Rozdelenie antén pre L pásmo v MSKS

Zisk	Anténa	Typický zisk (dBi)	Typický G/T (dBK)	Typická anténa (rozmer)	Typická služba
Veľký	Smerová	20-24	-4	Parabola (1m)	Hlas/vysokorýchlostné dáta
		17-20	-8 do -6	Parabola (1m)	Lode (INMARSAT - A, B)
				Fázovaná anténová sústava (20 článkov)	Lietadlá (INMARSAT - Aero)
Stredný	Polosmerová (iba v azimute)	8-16	-18 do -10	SBF (0,4m)	Hlas/vysokorýchlostné dáta
		4-8	-23 do -8	Sústava (2-4 články)	Lode (INMARSAT - M)
				Skrutkovicová, patch	Pozemné mobilné stanice
Nízky	Všesmerová	0-4	-27 do -23	Kvadrifilárna	Nízkorýchlostné dáta (správy)
				Ohnutý krížový dipól	Lode (INMARSAT - C)
				Krížový dipól	Lietadlá
				Patch	Pozemné mobilné stanice

5.4.2.4 Sledovanie satelitu

Poznáme dva typy sledovacích systémov: mechanický a elektrický. Mechanický sledovací systém používa mechanické konštrukcie, aby udržal anténu nasmerovanú na satelit, pomocou motora a mechanického riadiaceho systému. Typickými príkladmi sú anténové systémy pre INMARSAT – A a B. Na druhej strane, elektrické sledovacie systémy sledujú satelit stálym elektrickým snímaním lúča. Tento systém má mnoho výhod, takých ako vysoká rýchlosť navádzania a nenáročnosť na údržbu. Avšak má aj nevýhody, ako sú úzke pokrytie zväzkom a slabý axiálny pomer so širokým uhlom snímania.

Z hľadiska navádzacieho algoritmu rozoznávame dva typy. Metódu otvorenej slučky a metódu uzavretej slučky. Rozdiel medzi týmito dvoma metódami je, či použijeme signál zo satelitu alebo nie. Otvorená slučka používa na výpočet nasmerovania na satelit informácie o polohe satelitu a mobilnej stanice bez použitia signálu zo satelitu. Sú používané rôzne druhy senzorov, na získanie pozície mobilnej stanice a azimutu satelitu s ohľadom na pohyb stanice. Táto metóda je efektívna za nepriaznivých podmienok úniku signálu, takých, ako majú pozemné mobilné satelitné komunikácie, kde sa zmena prijímaného signálu deje príliš rýchlo a je príliš veľká na to, aby mohla byť použitá sledovacia väzba.

Naproti tomu metóda uzavretej slučky sa využíva na sledovanie signálu zo satelitu. Aby sme mohli použiť metódu uzavretej slučky, prijímaný signál musí byť stabilný bez nepriaznivého úniku, čo sa dá očakávať v leteckých satelitných komunikáciách a námorných satelitných komunikáciách na veľkých lodiach. Je veľmi ťažké využívať túto metódu v pozemných satelitných komunikáciách.

5.5 Návrh antény

5.5.1 SuperNEC

SuperNEC [12] je simulačný program, vhodný pre platformy Windows alebo Linux, ktorý využíva pri simulácii metódu momentových elektromagnetických polí. Jednoduché grafické užívateľské rozhranie umožňuje trojrozmerný návrh štruktúr a modelov. Táto vlastnosť programu z neho robí veľmi vhodný nástroj pre návrh antén. Výstup poskytuje návrhárovi všetky potrebné informácie pre analýzu antény. Sú nimi napr. 3D a 2D vyžarovacie diagramy, Smithov diagram, väzobný diagram, diagram účinnosti atď. SuperNEC je optimalizovaný pre Intel procesory, rôzne typy rýchlych výpočtov i pre paralelný prístup pri riešení obzvlášť zložitých problémov.

Tento program bol vytvorený firmou Poynting Innovations, ktorá ho využíva pri návrhu antén, analýze, konzultačnej práci v oblasti elektromagnetických polí a štúdiách umiestnenia antén.

Obsahuje množstvo preddefinovaných zostáv antén a prvkov antén, čo je veľmi výhodné pri rýchlom návrhu a analýze antén. Umožňuje taktiež aj dopĺňanie knižnice antén užívateľom navrhnutými typmi a štruktúrami. V knižnici sa nachádzajú vhodné typy antén aj pre MSKS, akými sú napr. skrutkovicová, patch, dipólová anténa a iné.

5.5.2 Hardvérové a softvérové požiadavky

Hardvérové a softvérové požiadavky na programové prostriedky

- počítač kompatibilný s IBM PC XT/AT (Pentium a vyššie)
- operačná pamäť (aspoň 128 MB)
- operačný systém Windows 98 a vyššie
- programový balík Matlab 6 a vyššie
- grafická karta (aspoň 8 MB)
- farebný grafický displej (monitor)
- CD ROM, myš

Tieto hardvérové požiadavky sú minimálne a súvisia i s používaným programovým balíkom Matlab. Avšak, pretože SuperNEC vykonáva zložité výpočty je výhodnejšia lepšia hardvérová konfigurácia, čo vedie k značnému urýchleniu návrhu i samotnej simulácie.

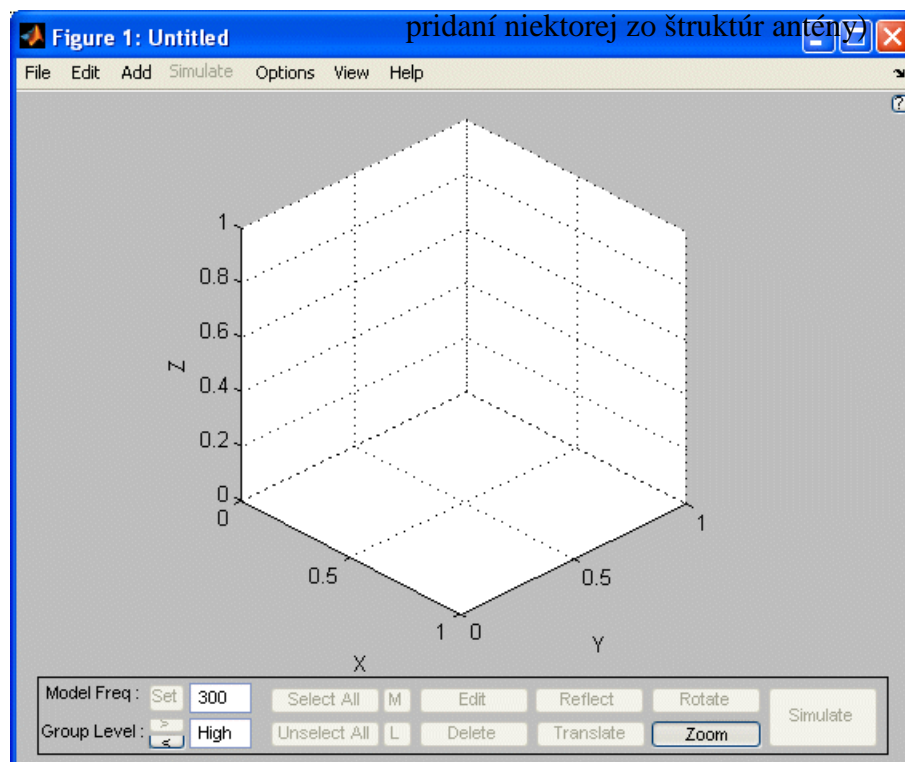
5.5.3 Vstupné užívateľské rozhranie

Vstupné užívateľské rozhranie sa spúšťa výberom SuperNEC programu. Na obrázku 5.1 je zobrazené okno vstupného rozhrania SuperNEC-u.

V trojrozmernom súradnicovom systéme môžeme navrhovať štruktúru, ktorú chceme simulovať, prostredníctvom použitia základných stavebných prvkov antén alebo v programe dostupných konštrukcií. Konštrukcie sú zložené zo základných prvkov antén a umožňujú rýchlejšiu realizáciu modelu.

Pridanie štruktúry umožňuje roletové okno Add:

Add	Primitive – pridanie základného stavebného prvku
Primitive ▶	Assembly – pridanie hotovej štruktúry
Assembly ▶	Ground – pridanie uzemnenia
Ground	Coupling – pridanie väzobného prvku (sprístupní sa po
Coupling	



Obr. 5.1 SuperNEC vstupné rozhranie

Primitive ▶	Segment – pridá segment definovanej veľkosti
Segment	UTD Plate – pridá UTD platňu
UTD Plate	
UTD Cylinder	
Load	
Source	
Network ▶	

UTD Cylinder – pridá UTD valec

Load – pridá definovanú záťaž

Source – pridá definovaný zdroj

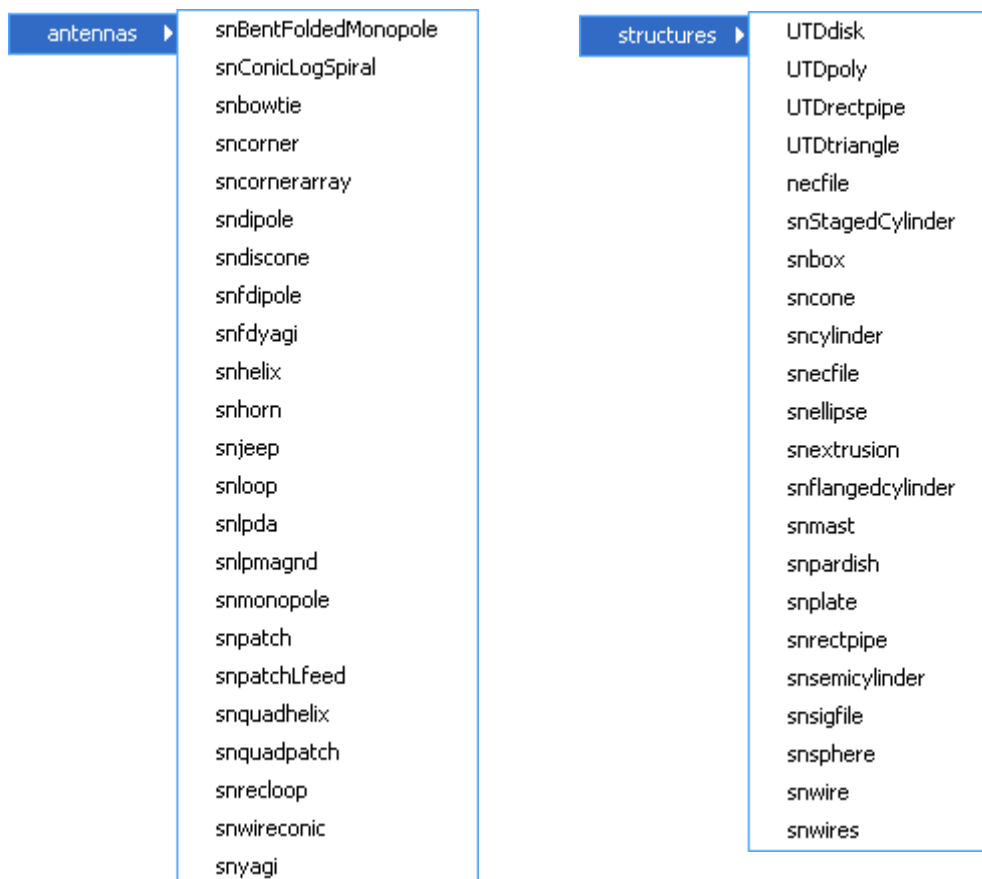
UTD predstavuje mnohostranný objekt pokrytý dielektrikom. Pri simulácii týchto objektov sa využíva jednotná teória difrakcie. Je to vysokofrekvenčná technika pre analýzu elektromagnetickej odozvy štruktúr.



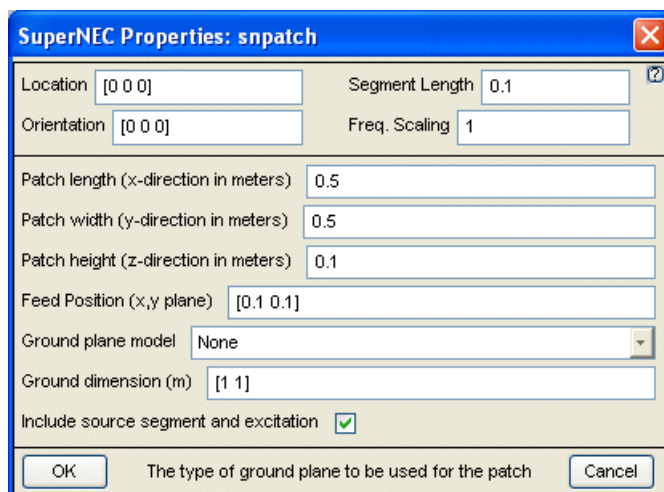
Antennas – pridanie preddefinovaných antén

Structures – pridanie preddefinovaných štruktúr

SuperNEC obsahuje nasledovný výber rôznych typov preddefinovaných antén a štruktúr, ktoré je možné používať pri modelovaní a simuláciách:



Po zvolení požadovaného typu štruktúry sa objaví okno vlastností danej štruktúry, v ktorom je potrebné zadať požadované vlastnosti. Napríklad pre náš prípad po navolení snpatch antény sa zobrazí okno na obrázku 5.2.

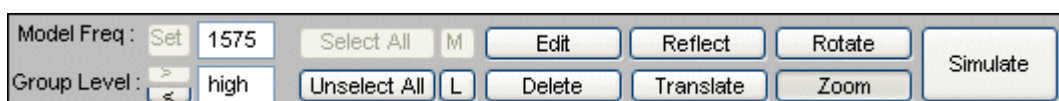


Obr. 5.2 Okno vlastností pre snpatch anténu

Tu je potrebné zadať pozíciu a orientáciu antény v súradnicovom priestore. Dĺžka segmentu a frekvenčné škálovanie má vplyv na hustotu mriežky, ktorá sa využíva pri simulácii pomocou momentovej metódy. Je treba poznamenať, že s hustejšou štruktúrou sa predlžuje čas výpočtu simulácie i samotné pracovanie s modelom. Ďalej je potrebné uviesť rozmery antény, bod napájania, veľkosť a typ zemniatej plochy.

Podobným spôsobom je riešené zadávanie parametrov pre všetky ostatné typy antén a štruktúr.

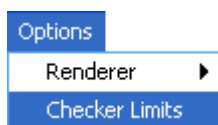
Po pridaní štruktúry do realizovaného modelu sa sprístupnia jednotlivé tlačidlá v spodnej časti hlavného pracovného okna, ktoré umožňujú manipuláciu s modelom v súradnicovej sústave.



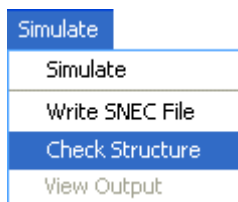
- | | |
|---------------------|--|
| Model Freq. | - nastavuje frekvenciu, pri ktorej bude navrhovaný model simulovaný. Toto nastavenie má tiež vplyv na hustotu štruktúry mriežky pre momentovú metódu. Volí sa vždy na začiatku práce s modelom a to najvyššia frekvencia, s ktorou bude daný model antény pracovať |
| Group Level | - umožňuje zmenu grupovania jednotlivých segmentov štruktúry. Program ponúka tri voľby (high, 2, low) |
| Select/Unselect All | - slúži na označenie/odznačenie celej navrhovanej štruktúry |
| Edit | je možnosť na editovanie označeného segmentu prípadne celej štruktúry |
| Delete | - zmaže označenú časť |
| Reflect | - vytvorí imaginárny zrkadlový obraz navrhnutého modelu, ktorý sa používa pri niektorých typoch antén na dosiahnutie symetrie modelu, aby bolo možné vykonať simuláciu |

Translate	- slúži na zmenu polohy modelu v súradnicovej sústave, pričom ponúka aj možnosť duplikácie navrhnutej štruktúry s možnosťou jej presunutia v sústave
Rotate	- umožňuje otočenie označeného segmentu v sústave
Zoom	- zapína/vypína blokovanie zväčšovania/zmenšovania, posúvania alebo otáčania pohľadu na súradnicovú sústavu
Simulate	- spúšťa simuláciu navrhnutej štruktúry

SuperNEC je schopný skontrolovať vlastnosti navrhnutého modelu vzhľadom na vopred nastavené limity pre modely.

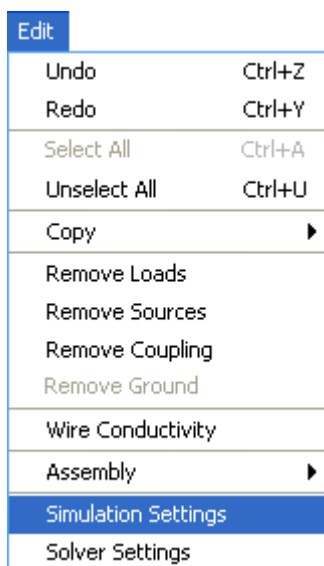


V Checker Limits sa vopred nastavujú limitné hodnoty, ktoré majú modely spĺňať. Tieto hodnoty sa potom používajú pri voľbe možnosti skontrolovať štruktúru.



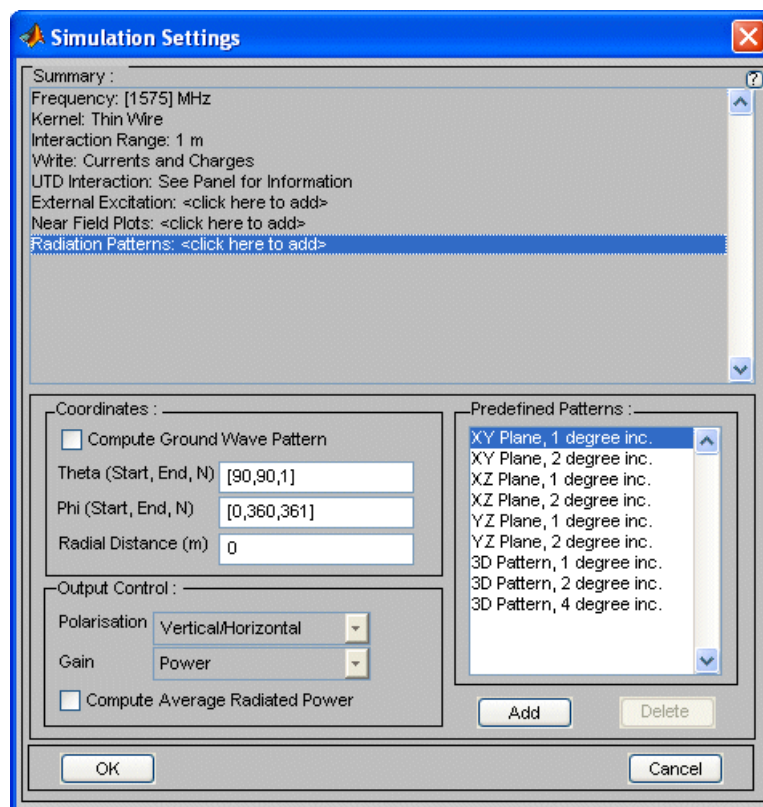
Check Structure overí vlastnosti navrhnutého modelu podľa nastavených hodnôt v Checker Limits. Pri nájdení chyby dokáže danú chybu korigovať.

Pred samotným spustením simulácie je ešte potrebné vykonať nastavenie simulačných parametrov.



Voľba nastavenia simulačných parametrov pre analýzu vlastností navrhnutého modelu

Po navolení Simulation Settings sa objaví okno parametrov simulácie, ktoré je zobrazené na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Okno nastavenia simulačných parametrov

Pred každou simuláciou je vždy potrebné nastaviť, pri akej frekvencii bude prebiehať. Ak chceme pozorovať zmenu vlastností modelu pri rôznych frekvenciách, prostredie umožňuje zadať aj rozpätie frekvencií s udaným inkrementom, ktorý sa bude pripočítavať pri každej ďalšej simulácii, až kým sa nedosiahne stanovená hraničná frekvencia ([počiatočná frekvencia : inkrement : koncová frekvencia]). Ďalej okno parametrov umožňuje meniť vlastnosti UTD objektov, voliť parametre pre zobrazenie blízkeho elektrického poľa, zobraziť charakteristiku antény pri ožiarení daným druhom elektromagnetickej vlny a voliť rôzne typy zobrazenia vyžarovacích diagramov modelu. Najčastejšie sa na zistenie vlastností vyžarovania používa 2D diagram v rovine XY a XZ a 3D diagram. Pre tieto typy je tu možnosť výberu rôznych veľkostí prírastku uhla pri výpočte. Väčší prírastok skracuje čas potrebný pre výpočet. Navolené diagramy spolu s ich vlastnosťami sa jednoducho pridajú stlačením tlačidla Add. Nastavenia simulácie sa potvrdia tlačidlom OK a môže sa pristúpiť k samotnej simulácii použitím tlačidla Simulate, ktoré bolo popísané vyššie.

Proces priebehu simulácie prebehne v okne typu DOS. Príklad priebehu simulácie je na obrázku 5.4. Postup pri výpočte je indikovaný pribúdajúcimi bodkami v riadku.


```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
c:\program files\sneq\matlab>echo off
*****
SuperNEC by Poynting Software Pty Ltd.
Version : 2.7
Build Date : Apr 6 2004

A MoM-UTD hybrid code

Input File:      C:\MATLAB7\_Diplom\1.nec
Output File:     C:\MATLAB7\_Diplom\1.out
Configuration File: c:\program files\sneq/config/mon.cfg
*****

=====
Optimized for Pentium 4 Machines
=====

Starting simulation at 1575.420044 MHz
Filling the matrix
.....
Factoring the matrix
Solving the matrix equation
Finding far fields
.....
Finding far fields
.....
Finding far fields
.....
Simulation Complete
Press any key to continue . . . _

```

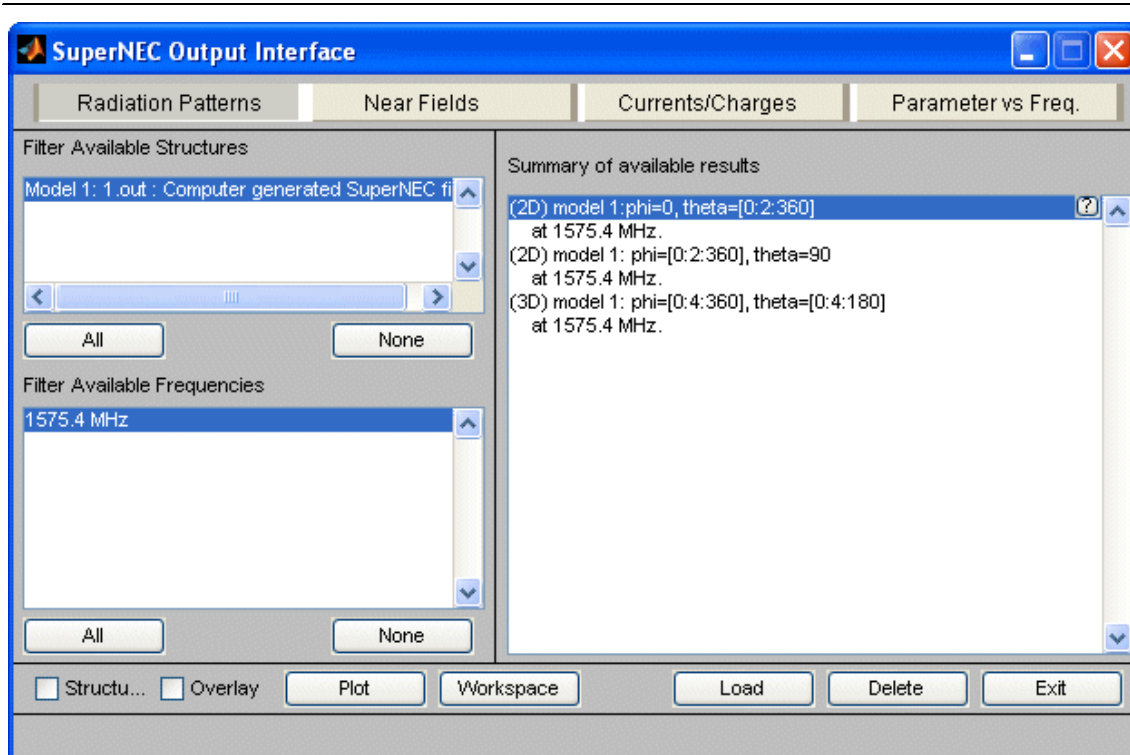
Obr. 5.4 Okno priebehu simulácie

5.5.4 Výstupné užívateľské rozhranie

Po skončení simulácie sa automaticky zobrazí okno výstupného užívateľského rozhrania, ktoré je možné vidieť na obrázku 5.5.

K zobrazeniu vypočítaných diagramov simulácie sa dostaneme tak, že si navolíme typ diagramu v hornej časti okna, v pravej časti vyznačíme zodpovedajúci diagram, ktorý chceme zobraziť a stlačíme tlačidlo Plot.

- | | |
|--------------------|--|
| Radiation Patterns | - obsahuje výsledky simulácie, ktoré sa týkajú vyžarovacích diagramov |
| Near Fields | - obsahuje výsledky, zahŕňajúce simuláciu blízkeho elektrického poľa |
| Currents/Charges | - umožňuje zobraziť výsledky, týkajúce sa rozloženia prúdu a náboja na simulovanom modeli a tiež priebeh fázy na danom modeli |
| Parameter vs Freq. | - tú výsledky jednotlivých parametrov modelu, ktoré závisia od frekvencie. Pri navolení tejto voľby máme k dispozícii dva typy výsledkov: model účinnosti a excitačný model. |



Obr. 5.5 SuperNEC výstupné rozhranie

Pri modeli účinnosti si môžeme v roletovom okne Format zvoliť zobrazovanie účinnosti antény v rôznych jednotkách, strát v sieti, strát v štruktúre, vyžiarého výkonu a príkonu.

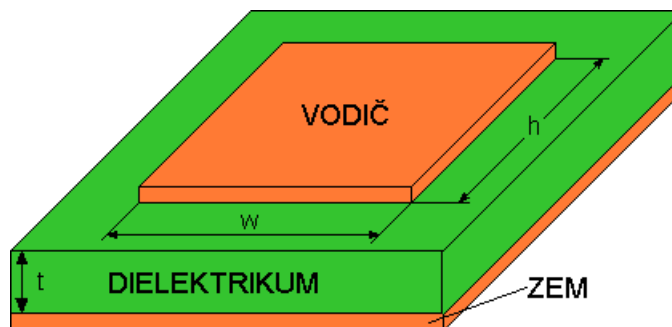
Podobne pri excitačnom modeli môžeme voliť z možností zobrazenia smithovho diagramu pre impedanciu alebo admitanciu, veľkosti, fázy, reálnej alebo imaginárnej hodnoty pre impedanciu, admitanciu a koeficient odrazu a ďalej pomeru stojatých vln (VSWR) a spätných strát.

5.6 Pravouhlá mikropásiková patch anténa

5.6.1 Vlastnosti antény

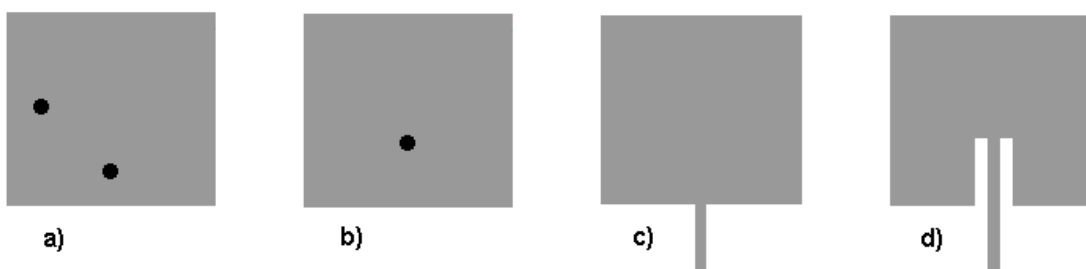
Mikropásikové antény sú v súčasných systémoch bezdrôtových komunikácií veľmi rozšíreným druhom antén. Je to dané tým, že sa tieto antény vyznačujú veľmi nízkym profilom [13], a preto môžu byť bez väčších problémov umiestňované na trupy lietadiel, steny budov a osobné automobily. Ďalšou výhodou je, že sú tieto typy antén vyrábané rovnakou technológiou ako plošné spoje, z čoho vyplýva nízka výrobná cena a dobrá reprodukovateľnosť. Je ich veľmi jednoduché integrovať priamo do mikrovlnných obvodov založených na mikropásikovej technológii, pričom tu nie je potreba žiadnych špeciálnych vedení, symetrizačných členov alebo konektorov, ako je to v prípade klasických antén.

Jedným z najpoužívanejších typov mikropásikových antén je pravouhlá mikropásiková patch anténa. Na obrázku 5.6 je zobrazený tento typ antény na dielektrickom substráte s jednobodovým napájaním, malým otvorom v zemniacej ploche, spolu s jej rozmermi [14].



Obr. 5.6 Pravouhlá mikropásiková patch anténa

Na napájanie antény [15] sa používajú rôzne spôsoby. Na obrázku 5.7 sú zobrazené štyri najpoužívanejšie napájania mikropásikovej antény.



Obr. 5.7 Napájanie antény a) dvojbodové, b) jednobodové, c) mikropásikovým vedením, d) impedančne prispôbeným mikropásikovým vedením

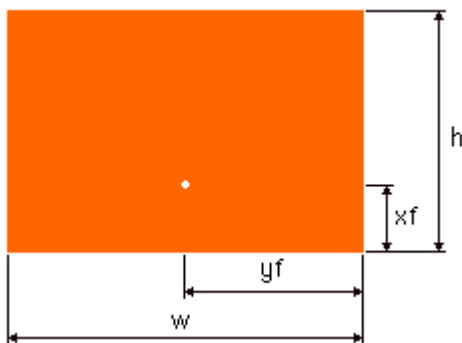
Pravouhlá mikropásiková patch anténa je typom antény s lineárnou polarizáciou. To znamená, že ak použijeme anténu, ktorej rozmery sú $w = h = \lambda/2$ a napájame ju iba v jednom bode, tak vzniká lineárne polarizovaná vlna. Pre potreby prijímania signálu z GPS satelitov je však potrebné, aby anténa pracovala s *pravotočivou kruhovou polarizáciou*. Toto sa dosahuje dvojakým spôsobom.

Prvý spôsob je, že anténa je napájaná dvojbodovo, ako je to znázornené na obrázku 5.7 a). Miesta napájania sú vzájomne pootočené o 90° a privádza sa na ne signál s rovnakou amplitúdou, pričom je potrebné meniť fázu jedného signálu o $\pm 90^\circ$, kde znamienko rozhoduje o smere otáčania polarizácie. Rozdelenie signálu na dve časti sa vykonáva Wilkinsonovým, T-článkovým alebo iným typom deličov signálu [16]. Posun fázy sa vykonáva oneskorovacím vedením. Tento spôsob má svoje nevýhody v tom, že oneskorovacie vedenie zaberá miesto na plošnom spoji, spôsobuje ovplyvňovanie vyžarovacej charakteristiky antény a je potrebný delič signálu.

Preto je vhodnejším druhý spôsob napájania - jednobodovo. Viaceré spôsoby sú zobrazené na obrázku 5.7 b), c), d). V praxi najpoužívanejšie riešenie je podľa obrázku 5.7 b). Signál sa privádza na anténu iba v jednom bode. Je potrebné generovať elektrické polia, ktoré sú vzájomne priestorovo aj elektricky otočené o 90° . To sa dosahuje tak, že jeden z rozmerov

patch antény je väčší ako druhý. Tento rozdiel spôsobuje o 90° väčšie elektrické oneskorenie v jednom smere oproti druhému.

Rozmery, podľa obrázku 5.8, pravouhlej mikropásikovej patch antény by mali pri návrhu spĺňať nasledovné vzťahy [17]:



Obr. 5.8 Rozmery navrhovanej pravouhlej mikropásikovej patch antény

Šírka antény:

$$w = \frac{\lambda}{2\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (5.1)$$

Efektívna permitivita substrátu:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{t}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

Efektívna dĺžka antény:

$$h_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (5.3)$$

Predĺženie dĺžky antény:

$$\Delta h = 0,412t \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0,3) \left(\frac{w}{t} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0,258) \left(\frac{w}{t} + 0,8 \right)} \quad (5.4)$$

Skutočná dĺžka antény:

$$h = h_{\text{eff}} - 2\Delta h \quad (5.5)$$

kde ϵ_r je relatívna permitivita dielektrického substrátu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{je vlnová dĺžka pre frekvenciu } f$$

c je rýchlosť svetla vo vákuu

t je hrúbka substrátu

Hrúbka substrátu t sa volí s ohľadom na šírku frekvenčného pásma, v ktorom má navrhovaná anténa pracovať [18].

Rozmery zemniacej plochy sú dané nasledujúcimi rovnicami:

Dĺžka zemniacej plochy:

$$H_g = 6t + h \quad (5.6)$$

Šírka zemniacej plochy:

$$W_g = 6t + w \quad (5.7)$$

Miesto napájania, teda súradnice (x_f , y_f) [19], sa určuje tak, aby v tomto bode bola vstupná impedancia antény rovná hodnote 50Ω pri rezonančnej frekvencii. Pri návrhu sa uplatňuje postup, že hodnota y_f je rovná polovici veľkosti šírky antény w a x_f zistíme tak, že na anténe hľadáme miesto s najzápornejšou hodnotou strát spôsobených odrazom.

Ďalšie dôležité parametre, ktoré je možné pre pravouhlú pach anténu vypočítať, sú šírka frekvenčného pásma B , zisk antény G a šírka zväzku [7]:

$$B = 4f_{\text{GHz}}^2 (32t_{\text{in}}) \quad (\text{MHz}) \quad (5.8)$$

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi h w}{\lambda^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (5.9)$$

$$\text{Šírka zväzku} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2} \right) \quad (5.10)$$

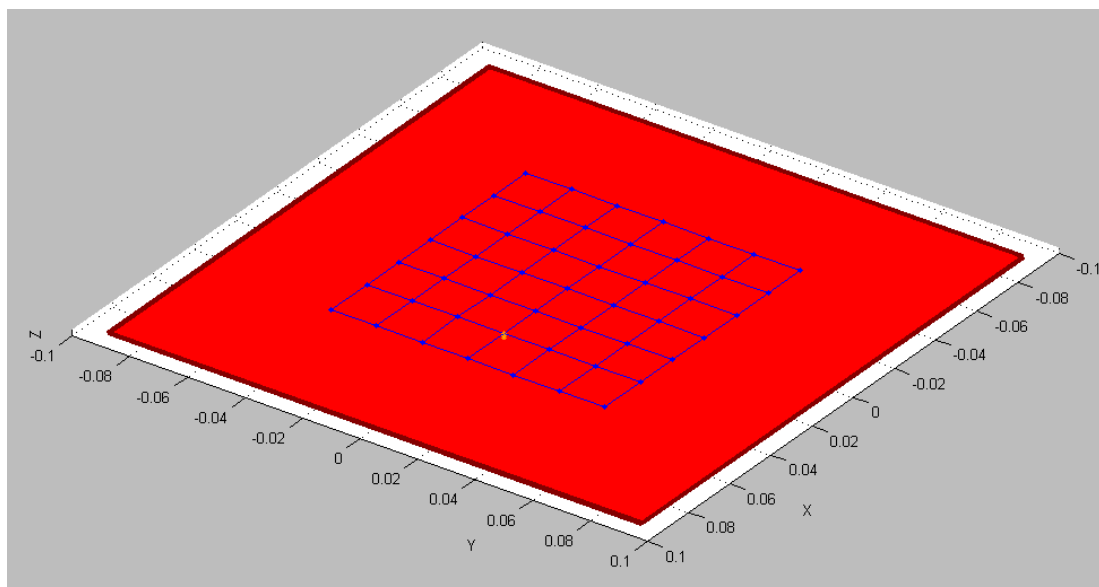
5.7 Praktický príklad návrhu antény

Podľa vzťahov z predchádzajúcej kapitoly vieme určiť jednotlivé rozmery navrhovanej pravouhlej mikropásikovej patch antény. Tieto potom použijeme v následnej simulácii antény v programe SuperNEC. Na obrázku 5.8 sú zakreslené jednotlivé rozmery pre lepšiu predstavu a uľahčenie zadávania hodnôt do simulačného programu.

Dosadením do vzťahov (5.1-7), pričom $\epsilon_r = 1$, hrúbka substrátu $t = 1,5$ mm a pre GPS frekvenciu L1, $f = 1575,42$ MHz, dostávame nasledovné rozmery:

Šírka antény:	$w = 9,515$ cm
Dĺžka antény:	$h = 9,494$ cm
Šírka zemniacej plochy:	$W_g = 10,415$ cm
Dĺžka zemniacej plochy:	$H_g = 10,394$ cm
	$x_f = 4,7575$ cm
	$y_f = 1,747$ cm

Na obrázku 5.9 je v programe SuperNEC navrhnutá anténa s danými vypočítanými rozmermi. Zemniaca plocha je v programe znázornená červenou farbou. Nad ňou je modrou farbou označená štruktúra samotnej pravouhlej patch antény, ktorá je umiestnená 1,5 mm nad zemniacou plochou. V programe je plocha antény zobrazená ako mriežka, pretože sa pri výpočtoch charakteristík využíva momentová metóda riešenia elektromagnetických polí. Táto metóda používa zjednodušenie plochy antény do zobrazovanej mriežky, čo značne urýchľuje výpočty, pri veľmi malom skreslení vypočítaných hodnôt oproti metódam, ktoré pri výpočtoch využívajú celú plochu. Žltým bodom je zobrazené miesto napájania antény.



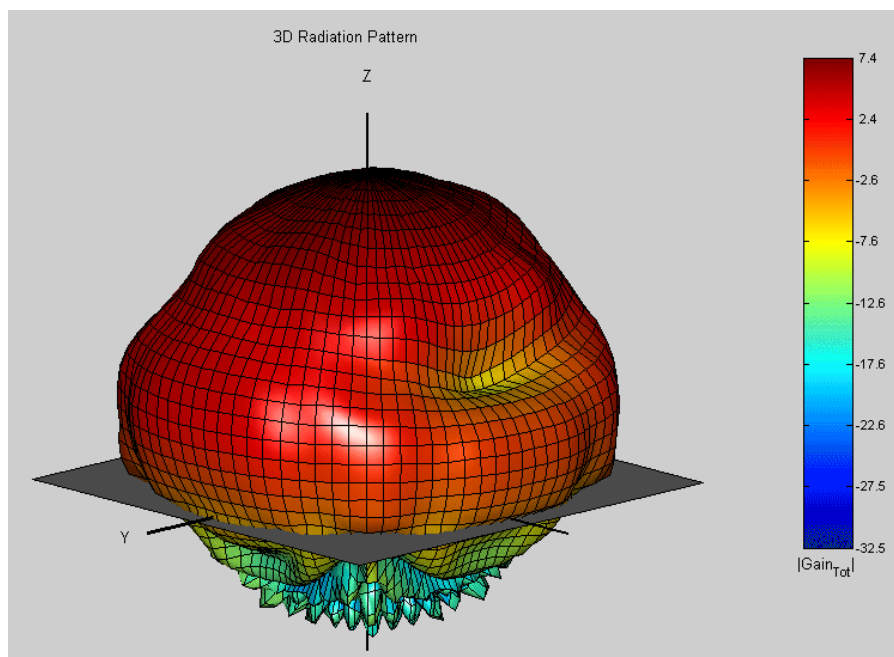
Obr. 5.9 Navrhnutá anténa v programe SuperNEC

5.8 Simulácia navrhutej antény

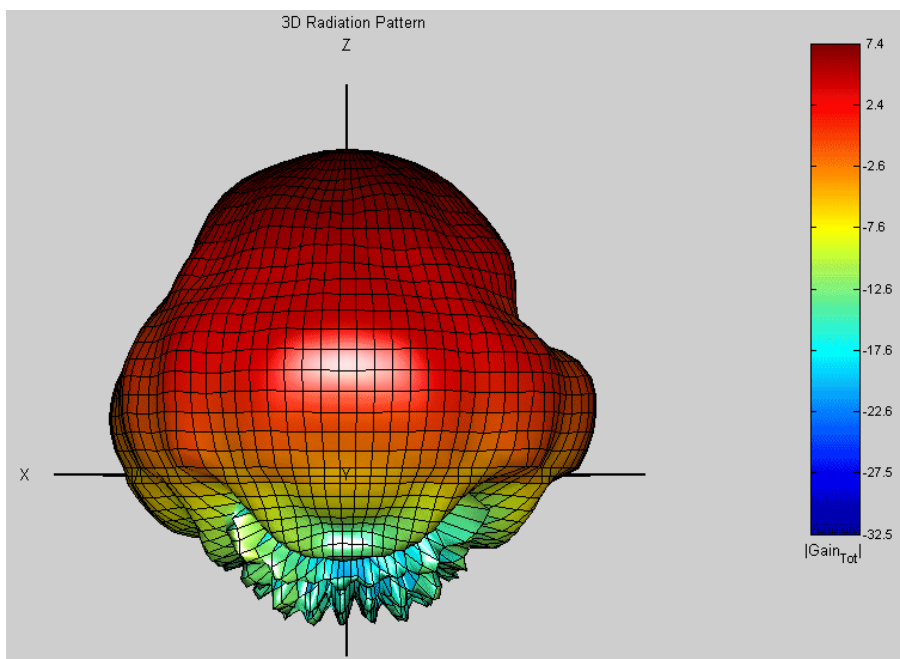
Po dosadení vypočítaných hodnôt rozmerov navrhutej pravouhlej patch antény do simulačného programu SuperNEC sme získali 3D vyžarovací diagram tejto antény. Jednotlivé pohľady na vyžarovací diagram sú na obrázkoch 5.10, 5.11 a 5.12. Ako je možné vidieť, maximálny zisk antény je v smere hlavného zväzku, pričom dosahuje maximálnu hodnotu 7,4 dBi, čo je postačujúce pre GPS antény, kde sa u komerčne dostupných pohybuje hodnota zisku od 5 – 15 dBi. Do vyžarovacieho diagramu bol pridaný aj náčrt zemniacej plochy antény pre lepšiu predstavivosť.

Z vyobrazených diagramov je možné vidieť postranné laloky, na spodnej strane zemniacej plochy. Tieto majú hodnotu menšiu ako 17,5 dBi, čo spĺňa podmienku pre veľkosť postranných lalokov MSKS a teda je týmto spôsobom obmedzená interferencia s inými systémami.

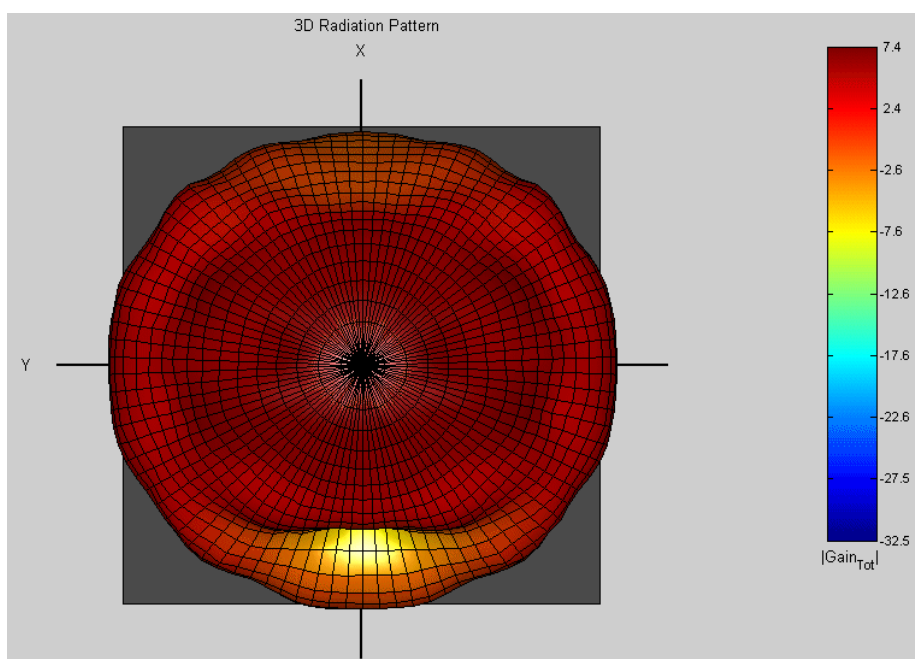
Vyžarovací diagram je všesmerový, pričom je možné si všimnúť pokles zisku antény v mieste napájania. To však nemá veľmi významný vplyv na všesmerovosť antény.



Obr. 5.10 3D vyžarovací diagram navrhutej antény

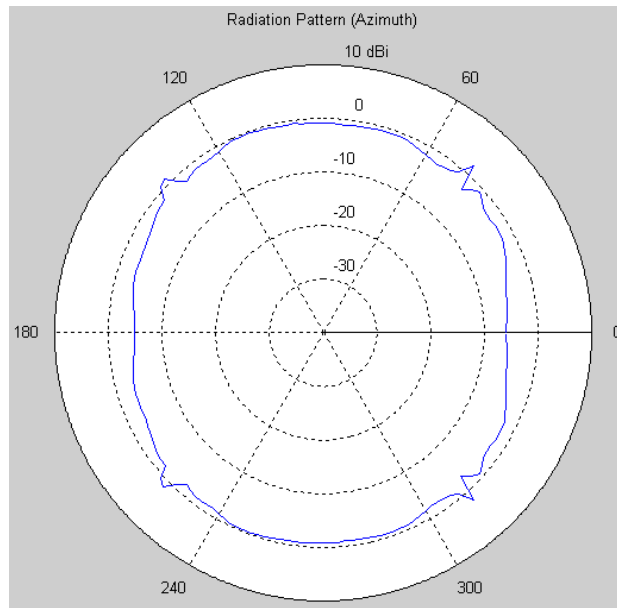


Obr. 5.11 3D vyžarovací diagram navrhutej antény – pohľad v smere osi y



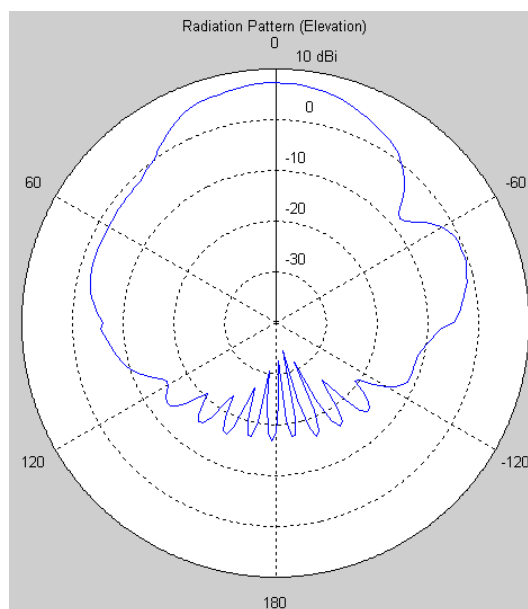
Obr. 5.12 3D vyžarovací diagram navrhutej antény – pohľad v smere osi z

Na obrázku 5.13 je zobrazený azimutálny vyžarovací diagram, ktorý znázorňuje vyžarovanie pri pohľade v smere osi z. Je používaný na zobrazenie smerových vlastností antény vzhľadom na azimut. Tu je možné pozorovať dobrú všesmerovosť navrhutej antény.



Obr. 5.13 Azimutálny vyžarovací diagram navrhnutej antény v polárnej sústave

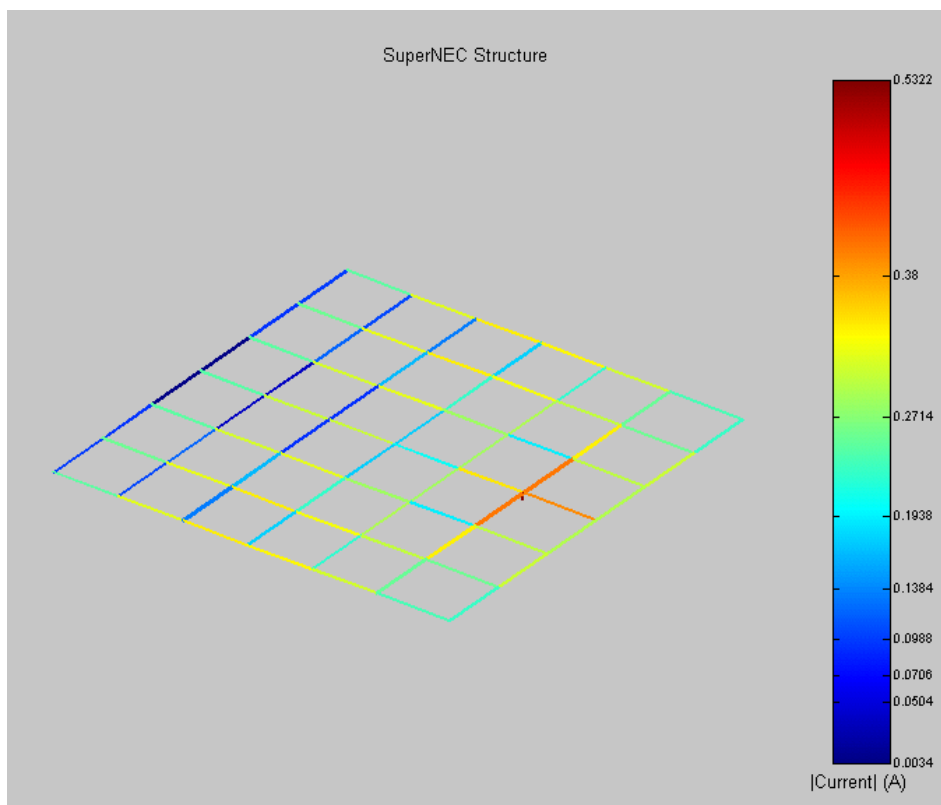
Obrázok 5.14 ukazuje elevačný vyžarovací diagram navrhnutej antény. Tento diagram je používaný na zvýraznenie hodnôt hlavného a vedľajších lalokov. Dostávame ho pri pohľade v smere osi y . Ako už bolo popísané predtým, i tu je možné pozorovať, že veľkosť postranných lalokov je menšia ako $-17,5$ dBi. Taktiež je na diagrame možné vidieť pokles zisku v mieste nad napájaním antény.



Obr. 5.14 Elevačný vyžarovací diagram navrhnutej antény v polárnej sústave

Program SuperNEC umožňuje aj zobrazenie rozloženia prúdu a náboja na anténe. Na obrázku 5.15 je ukázané rozloženie prúdu na navrhnutej patch anténe v logaritmickom merníku. Najväčšia hodnota prúdu je v mieste napájania antény a je vyznačená oranžovou farbou.

Simuláciou navrhutej pravouhlej patch antény sa potvrdila jej všesmerovosť vyžarovacej charakteristiky. Táto vlastnosť je nevyhnutná pre príjem signálov z GPS satelitov pri pohybe antény, pretože pri tomto type antény sa nepoužíva nasmerovanie na satelit. Zároveň bolo ukázané splnenie podmienky veľkosti postranných lalokov pre potlačenie interferencie.



Obr. 5.15 Rozloženie prúdu pozdĺž navrhutej antény

6 Systém satelitnej polohovej navigácie GPS-NAVSTAR

6.1 Úvod

Táto kapitola je zameraná na opis princípov, architektúry a realizácie satelitných navigačných systémov na príklade amerického navigačného systému GPS-NAVSTAR. Po prečítaní tejto kapitoly by ste mali:

- Pochopiť princíp určovania polohy pomocou satelitných navigačných systémov
- Poznať segmentáciu satelitného navigačného systému
- Poznať funkciu kozmického segmentu satelitného navigačného systému
- Poznať funkciu riadiaceho segmentu satelitného navigačného systému
- Poznať funkciu používateľského segmentu satelitného navigačného systému
- Poznať dosahovanú presnosť meraných parametrov satelitným navigačným systémom GPS
- Poznať základný princíp diferenciálnej GPS
- Poznať základné obvody riešenia vysielateľa GPS
- Poznať základné obvody riešenia prijímateľa GPS
- Poznať základné požiadavky na vyšší stupeň prijímateľa GPS
- Opísať funkciu korelátora GPS a postup spracovania signálu pomocou DSP
- Opísať rozhranie prijímateľa GPS
- Poznať používané konštrukčné prvky pre prijímateľa GPS

Pomocou satelitného navigačného systému GPS (Global Positioning System) je možné určiť polohu ktoréhokoľvek stanoviska na zemskom povrchu s presnosťou v rozsahu od 100 m až po menej než 1 m (diferenciálna GPS). Aj napriek tomu, že prijímateľa GPS boli pôvodne vyvinuté na vojenské účely, používajú sa stále viac pre civilnú oblasť (navigácia vozidiel, vymeriavanie, rekreačný šport). Posledný vývoj v oblasti integrovaných obvodov pre GPS je predpokladom pre ďalšiu miniaturizáciu a sprístupnenie navigačných prijímateľov spotrebiteľskému využitiu.

V súčasnej dobe obieha vo výške 20180 km nad zemským povrchom na šiestich rôznych obežných dráhach 25 aktívnych navigačných satelitov. Roviny obežných dráh sú voči rovine rovníka orientované v uhle 55° , ktorý zaisťuje z každého bodu na Zemi spojenie najmenej so štyrmi satelitmi.

Každý satelit obehne Zem asi za 12 hodín a má na palube štyri atómové hodiny. Satelity vysielajú na frekvencii 1575,42 MHz (pásmo L1) presný palubný čas, informácie o svojom stave a súradnice obežných dráh (almanach) všetkých satelitov systému GPS. Vďaka súradniciam dráh je v ktoromkoľvek okamžiku známa presná poloha každého satelitu.

Celý systém je pod ochranou amerického ministerstva obrany a pre vojenských užívateľov poskytuje ďalekosiahle možnosti. Prvý satelit GPS bola uvedený na obežnú dráhu 22. februára 1978.

Pomocou prijímača GPS je možné zisťovať zemepisnú dĺžku, šírku i nadmorskú výšku a rovnako aj presný svetový čas UTC (Universal Time Coordinated).

Od týchto veličín sa odvodzuje rýchlosť a smer pohybu pozorovateľa. Systém GPS sa v dnešnej dobe používa predovšetkým na navigáciu (vzdušnú, pozemnú a námornú), na navádzanie vozidiel, pri rekreačnom športe, pri vymeriavaní a na presné určovanie času.

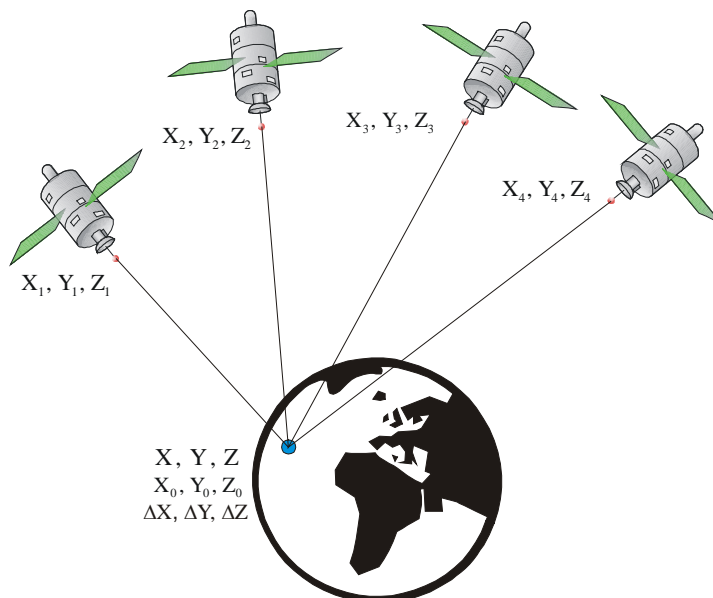
6.2 Princíp určovania polohy

Ak má pozorovateľ spojenie so satelitom GPS, môže na základe porovnania časového údaja prijímača s časom satelitných hodín merať dobu behu signálu. Toto meranie je samozrejme zaťažené chybou δ , pretože hodiny prijímača nemajú rovnakú presnosť ako atómové hodiny na satelite. Táto chyba potom musí byť vzatá do úvahy pri výpočte. Na prevedenie celého výpočtu do systému lineárnych rovníc zvolíme určitú polohu na zemskom povrchu danú súradnicami X_0, Y_0, Z_0 (Obr. 6.1). Skutočná poloha pozorovateľa (X, Y, Z) sa pritom od tejto zvolenej polohy líši o $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. Vzdialenosť S_j k satelitu číslo j je možné zistiť z doby behu signálu Δt_j od satelitu k pozorovateľovi a z rýchlosti svetla c :

$$S_j = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2} = c \cdot \Delta t_j + c \cdot \delta \quad (6.1)$$

kde X_j, Y_j, Z_j sú súradnice určujúce polohu satelitu číslo j .

Pre polohu pozorovateľa dostávame štyri neznáme veličiny - skutočnú polohu danú tromi súradnicami X, Y, Z a chybu hodín δ .

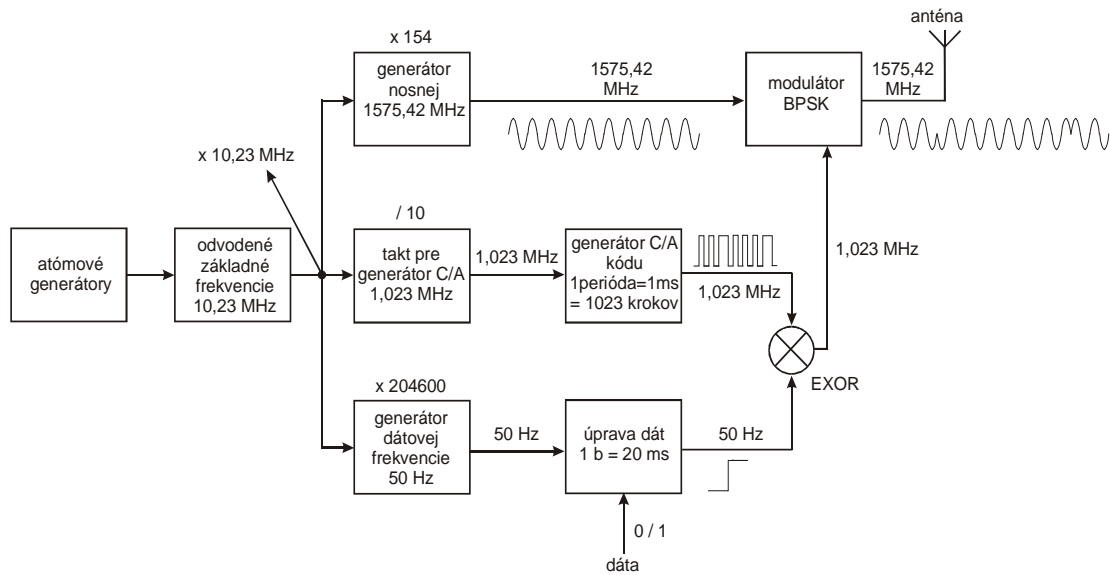


Obr. 6.1 Pre určenie polohy postáča štyri satelity

Využitím spojenia so štyrmi rôznymi satelitmi (obr.6. 1) môže pozorovateľ realizovať štyri nezávislé merania a vyriešením príslušnej sústavy lineárnych rovníc vypočítať požadované štyri neznáme.

Palubné atómové hodiny satelitu majú presnosť lepšiu než $2 \cdot 10^{-13}$. Z rezonančnej frekvencie jednej zo štvorice atómových hodín na palube sa odvodí základná frekvencia 10,23 MHz, z tejto základnej frekvencie sa potom generuje nosná frekvencia, dátová frekvencia a takt pre vytváranie pseudonáhodného šumu (PRN), ktorý generuje kód C/A (Coarse/Acquisition-Code). Vzhľadom na to, že všetkých 25 satelitov vysiela na rovnakej frekvencii 1575,42 MHz, používa sa mnohostranný prístup s kódovým delením CDMA (Code-Division Multiple-Access), na prenos dát sa využíva modulácia DSSS (Direct Sequence-Spread Spectrum). Generátor kódu C/A má frekvenciu 1,023 MHz a periódu 1023 krokov (chips), čo zodpovedá času 1 ms. Použitý kód C/A, ktorý zodpovedá Goldovej postupnosti a vykazuje tak výhodné korelačné vlastnosti, sa generuje pomocou posuvných registrov so spätnou väzbou. Vysielané dáta (napr. čas, údaje dráhy a stav) prichádzajú s taktovacou frekvenciou 50 Hz. Tieto dáta, modulované

krokom C/A, modulujú v modulátore BPSK (Bi-Phase-Shift-Keying) ešte jednu nosnú vlnu (Obr. 6.2)



Obr. 6.2 Zjednodušená bloková schéma palubného systému umiestneného na satelite GPS

6.3 Diferenciálna GPS (DGPS)

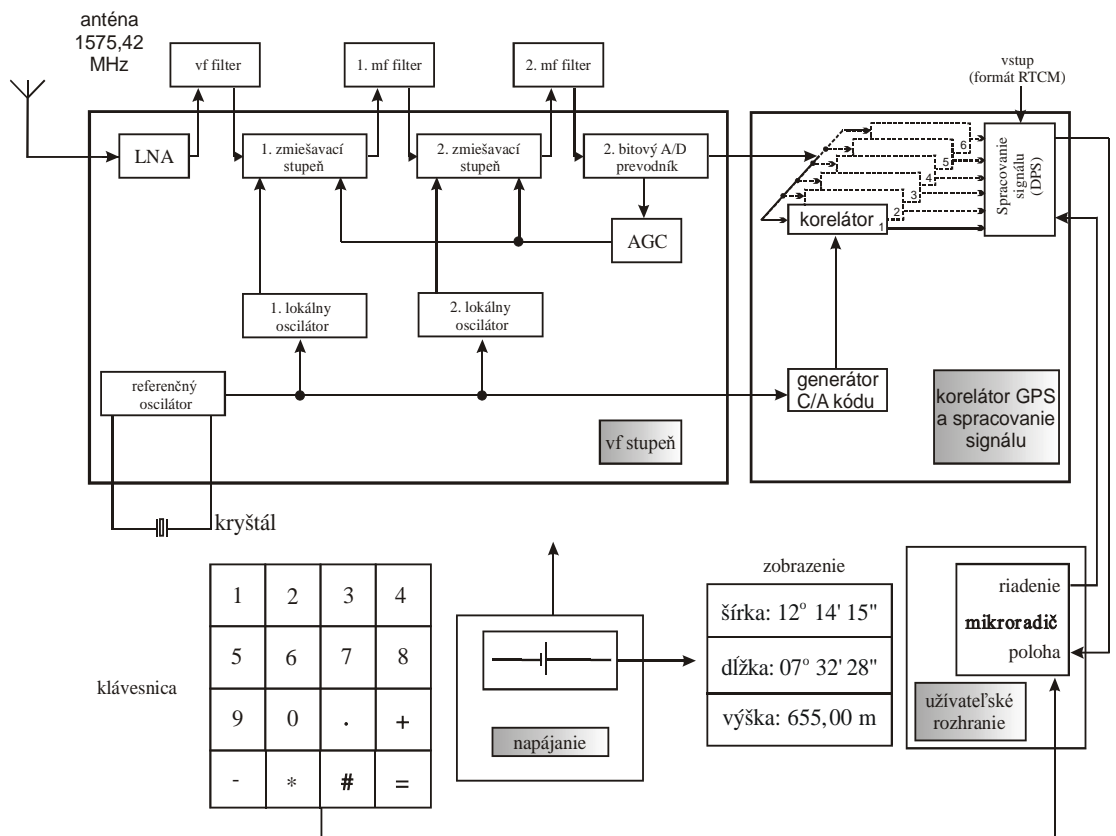
Základná presnosť merania polohy civilných prijímačov bola pred časom asi 100 m v horizontálnom a asi 150 m vo vertikálnom smere. Príčinami chýb sú nepresnosti dráh satelitov a nepresnosť merania času, oneskorenie signálov vplyvom ionosféry a troposféry, šum prijímača a predovšetkým umelé skreslenie polohy S/A (Selective Availability) zavádzané prevádzkovateľom, ministerstvom obrany USA. Americká vláda vzhľadom na strategické záujmy a bezpečnosť štátu rozhodla o zavedení zvláštno režimu prevádzky GPS - výberový prístup (SA - Selective Availability). Výberový prístup spočíval v zámernom zhoršení presnosti merania vzdialenosti tým, že sa menila hodinová frekvencia signálu a efemeridy vo vysielanej navigačnej správe. Výsledkom toho meraná pseudovzdialenosť nezodpovedala vzdialenosti užívateľa od satelitu a nezodpovedal ani posun jeho hodín vzhľadom k systémovým hodinám. Táto náhodná funkcia, ktorá zhoršovala presnosť merania, bola zavedená 25. 3. 1990 pri všetkých satelitoch bloku II. Po protestoch odbornej verejnosti však americká vláda prehodnotila svoje rozhodnutie o zavedení SA a dňom 1. 5. 2000 bol zvláštny

režim výberového prístupu (Selective Availability) zrušený. Dosiahnuteľná presnosť GPS prijímačov v určení polohy je teraz 10 - 15 m.

Presnosť merania polohy je však možné podstatne zvýšiť pomocou diferenciálneho merania. Používa sa na to referenčný prijímač. Ten sa nachádza na presne zameranej polohe na Zemi a prijíma signály zo satelitov. Porovnávaním jeho polohy vypočítanej zo satelitných dát s jeho presne zameranou polohou na Zemi, môže referenčný prijímač zisťovať rozdiel medzi nameranou a skutočnou vzdialenosťou od všetkých viditeľných satelitov (z hľadiska príjmu signálu). Takto zistené odchýlky platia s dostatočnou presnosťou i pre všetky prijímače, nachádzajúce sa v okruhu do 200 km. Referenčný prijímač vysiela tieto odchýlky (korekčné hodnoty) v štandardizovanom formáte RTCM-104 (Radio Technical Commission for Maritime) vhodnou cestou (napr. rádiom, na dlhých vlnách, systémy GSM či FM-RDS). Všetky prijímače, ktoré sú vybavené vstupom RTCM, môžu určovať svoju polohu s presnosťou až do 1 m. Pre ešte vyššie presnosti (až do rádu milimetrov) sú pre príjem diferenciálneho signálu potrebné navyše merania fázy nosného signálu a dlhšie doby pozorovania.

6.4 Základný princíp prijímačov GPS

Zapojenie prijímača GPS (Obr. 6.3) je možné v princípe rozdeliť na vysokofrekvenčný stupeň, korelátor GPS a obvody digitálneho spracovania signálov, rozhranie pre obsluhu a napájanie.



Obr. 6.3 Bloková schéma prijímača GPS

6.5 Vysokofrekvenčný stupeň

Aby bolo možné zosilniť anténové signály nachádzajúce sa pod termickým šumom (asi 130 dBm), mal by tento stupeň bezprostredne za anténym vstupom obsahovať nízkošumový zosilňovač LNA (Low Noise Amplifier). Vstupná frekvencia 1575,42 MHz až troch stupňov zmiešava s medzifrekvenčným signálom 2 až 50 MHz. Medzifrekvenčný signál je spravidla pomocou A/D prevodníka digitalizovaný s rozlíšením 2 bity (znamienko a amplitúda). Prebudeniu jednotlivých stupňov zosilňovača zabraňujú obvody automatického riadenia zisku AGC (Automatic Gain Control). Všetky synchronizačné signály a frekvencie pre zmiešavacie stupne sa odvodzujú od referenčného oscilátora.

6.6 Korelátor GPS a spracovanie signálu pomocou DSP

Aby bolo možné rekonštruovať dáta zo satelitov, je digitalizovaný signál korelovaný s rovnakým kódom C/A ako v zodpovedajúcom satelite. Len vtedy, keď kód C/A prijímača súhlasí s kódom C/A satelitu, dôjde k dekodovaniu dátového signálu. Všetky ostatné dátové signály zostávajú nedekodované. Pre úplne dekódovanie, musí súhlasiť fázová poloha a priebeh kódu C/A. Fázová poloha kódu C/A sa v prijímači mení, dokiaľ autokorelácia nedáva maximum. Časový posun, ktorý je pri tom potrebný, sa používa na určenie doby behu signálu od satelitu k prijímaču. Ak je tento odsúhlasovací postup prevedený pre štyri alebo viac rôznych satelitov je k dispozícii dostatočné množstvo dátových informácií na výpočet polohy a svetového času. Ak je dekódovateľných viac signálov zo satelitov ako štyri (viditeľných môže byť až dvanásť satelitov, vyberie prijímač tie dsatelity, ktoré poskytnú geometrické údaje vedúce k optimálnemu určaniu polohy pozorovateľa. Korelácia s rôznymi satelitnými sa môže realizovať buď sekvenčne alebo paralelne (od piatich do dvanástich satelitov). V závislosti od realizácie sú niektoré jednotky korelátora a DSP vybavené vstupom pre signály DGPS vo formáte RTCM, ktoré umožňujú realizáciu potrebných korektúr na určenie polohy. Parametre výstupného signálu zodpovedajú normalizovanému protokolu NMEA-0183 (National Marine Electronics Association). Jednotka korelátora a DSP umožňuje výpočet polohy v rôznych obvykle používaných súradnicových systémoch.

6.7 Rozhranie pre obsluhu, klávesnica, displej a napájanie

Vypočítanú zemepisnú polohu (dĺžku, šírku a výšku) je potrebné oznámiť používateľovi. To môže byť realizované buď v číslicovom formáte prostredníctvom sedem-segmentového displeja alebo pomocou grafického displeja na zobrazenej mape. Zistené polohy je možné ukladať do pamäti, čo umožňuje následné vynášanie celých trás pohybu objektu po zemskom povrchu. Používateľ môže prostredníctvom klávesnice voľiť systém súradníc, ktorý chce použiť a parametre, ktoré sa majú zobraziť (napr. počet viditeľných satelitov).

6.8 Používané konštrukčné prvky pre prijímače GPS

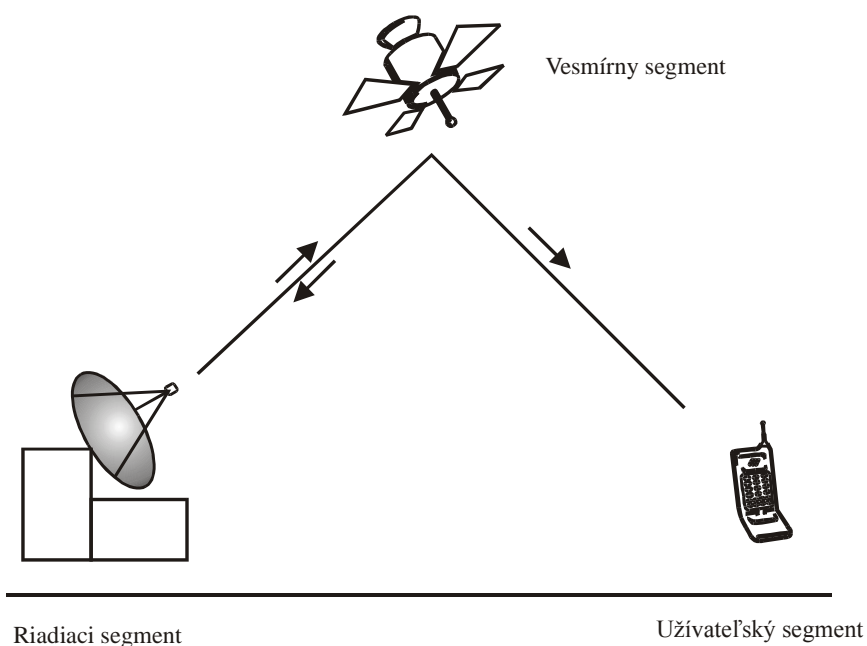
Vysokofrekvenčný stupeň musí byť schopný s nízkym šumom spracovávať frekvenciu 1575,42 MHz. Využívajú sa pritom obvody na báze technológie BiCMOS alebo GaAs. Jednotlivé obvody sa v podstate líšia iba tvarom puzdra, spotrebou prúdu a technickými vlastnosťami.

Obvody pre realizáciu korelátora GPS a procesory DSP sa líšia počtom spracovávaných korelačných kanálov. Ďalšími rozlišujúcimi parametrami sú prítomnosť štandardizovaného vstupu pre signály DGPS a funkcie umožňujúce zobrazenie dát v rôznych súradnicových systémoch. Výrobcovia ponúkajú skúšobné dosky, ktoré umožňujú bezproblémové testovanie vysokofrekvenčných častí prijímača a stupňa korelátora. K dispozícii sú rovnako funkčné jednotky prijímačov GPS určené na priame zabudovanie do konštruovanej aplikácie.

6.9 Segmentácia systému GPS

6.9.1 Rozdelenie do blokov

GPS je satelitný navigačný systém, zriadený a kontrolovaný Ministerstvom obrany USA. Systém GPS pozostáva z troch blokov: vesmírny segment, užívateľský segment a riadiaci segment. (Obr. 6.4)

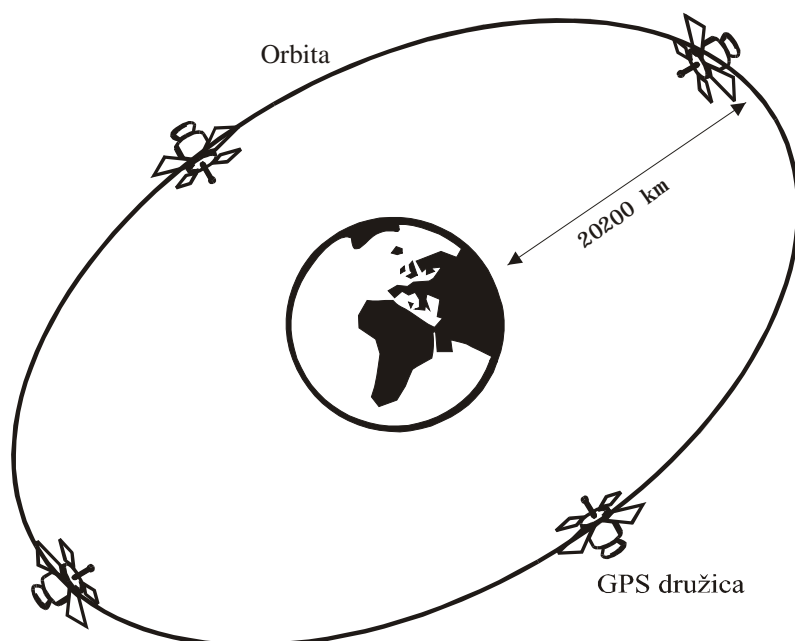


Obr. 6.4 Systém GPS

6.9.2 Vesmírny segment

Vesmírny segment systému GPS pozostáva z GPS satelitov. Tieto vesmírne zariadenia vysielajú rádiový signál do používateľského a riadiaceho segmentu.

Prevádzka GPS pozostáva z 24 satelitov na obežnej dráhe okolo Zeme s dobou obehu 12 hodín. Satelity obiehajú vo výške 20200 km so sklonom 55 stupňov k rovníku a sú rozdelené do šiestich skupín. Každá skupina obieha po inej obežnej dráhe. Obežná dráha satelitov sa vzhľadom na povrch mení veľmi málo (o 4 minúty skôr každý deň). (Obr. 6.5)



Obr. 6.5 Obežná dráha satelitov

6.9.3 Riadiaci segment

Sledovacie stanice zachytávajú signál zo satelitov a vypočítavajú orbitálnu obežnú dráhu a hodinovú korekciu pre každý satelit. Hlavná riadiaca stanica vysiela presnú pozíciu satelitov späť na ne a tie ich posielajú do používateľských GPS prijímačov.

6.9.4 Používateľský segment

Používateľský GPS prijímač konvertuje satelitný signál na pozíciu, rýchlosť alebo čas. Na určenie súradníc X, Y, Y a času sú potrebné údaje zo štyroch satelitov.

Autorizovaní používatelia s kryptografickými zariadeniami a kľúčmi a špeciálne upravenými prijímačmi využívajú PPS-Presný systém určovania polohy (Precise Positioning System). PPS určuje s presnosťou 95% tieto údaje:

- 22 metrov horizontálna poloha
- 27,7 metrov vertikálna poloha
- 100 ns čas

Civilní používatelia používajú SPS - Štandardný systém určovania polohy (Standart Positioning System) zdarma a bez obmedzenia. Veľa prijímačov je schopných prijímať a používať SPS signály. Presnosť SPS je zámerne znižovaná. SPS určuje s presnosťou 95% tieto údaje:

- 5 až 10 metrov horizontálna poloha
- 8 až 15 metrov vertikálna poloha
- 200 ns čas

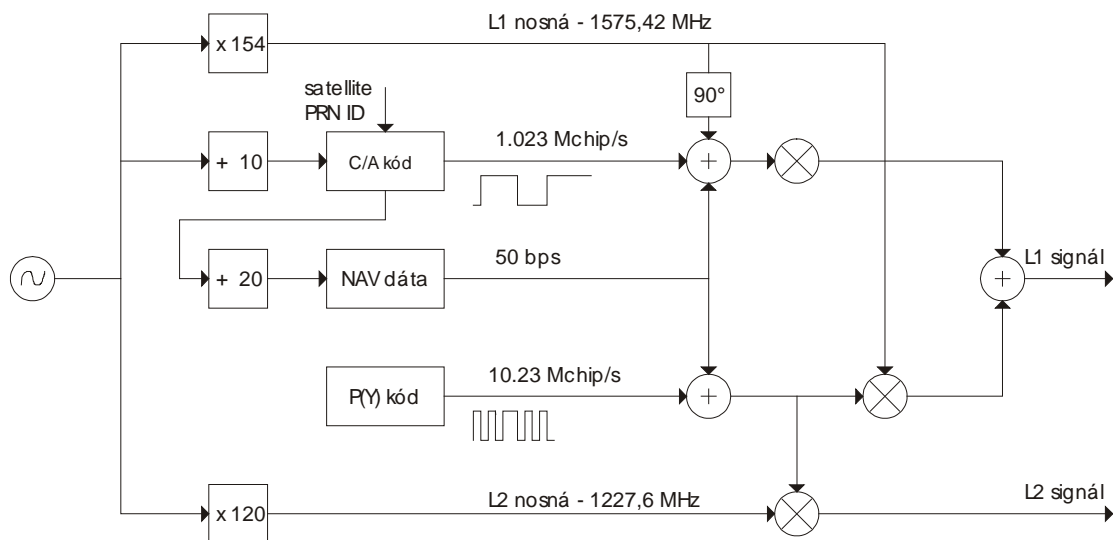
6.10 GPS satelitné signály

Satelity vysielajú dva mikrovlnové nosné signály. Na frekvencii L1 (1575,42 MHz) sa prenášajú navigačné informácie a signál SPS. Frekvencia L2 (1227,60 MHz) sa používa na meranie ionosférického oneskorenia PPS prijímačov. Tri binárne kódy menia fázu nosných frekvencií L1 a L2.

Kód C/A moduluje fázu nosnej frekvencie L1. Kód opakuje 1.023 Mbit/s pseudonáhodného kódového šumu (PRN). Tento kód moduluje nosnú frekvenciu signálu L1, rozšahuje šírku pásma na vyše 1 MHz. Kód C/A sa opakuje 1023 krát za sekundu. Toto vyplýva z požadovaného zisku 30dB. Preto GPS prijímače nepotrebujú veľké prijímacie antény. Každý satelit má odlišný kód C/A. GPS satelity sú identifikované podľa ich PRN čísla, jedinečného identifikátora pseudonáhodného kódového šumu. Táto technológia umožňuje identifikovať každý satelit, hoci všetky vysielajú na tej istej frekvencii L1. Nízka korelácia znemožňuje interferenciu medzi signálmi zo satelitov na strane prijímača. Kód C/A sa používa na civilné použitie SPS.

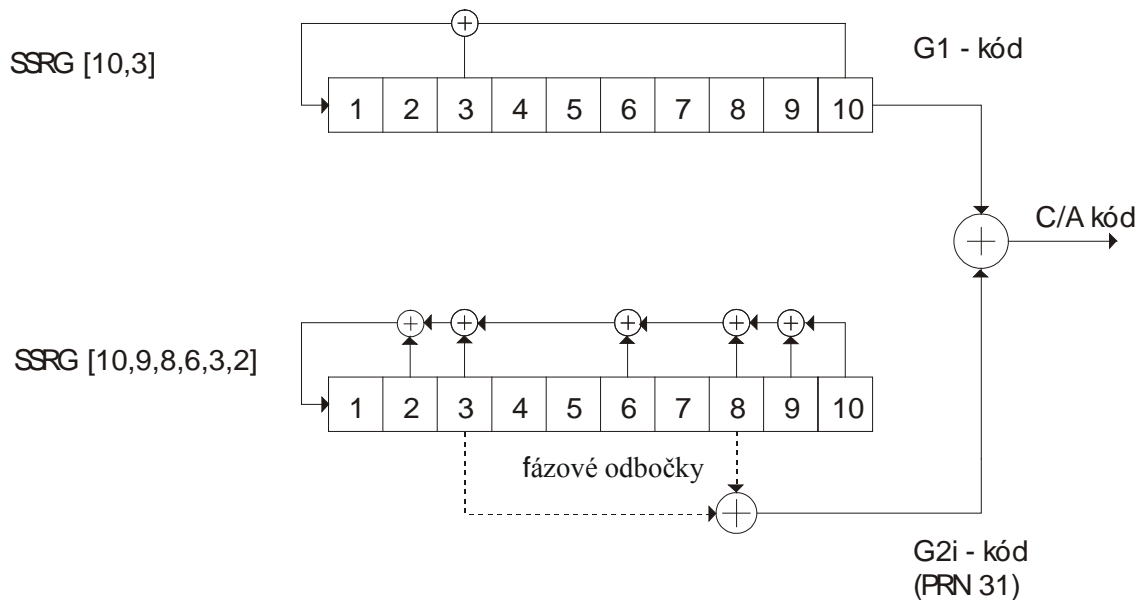
Kód P moduluje fázy oboch nosných frekvencií L1 a L2. P-kód je veľmi dlhý. P-kód je šifrovaný na Y-kód. Y-kód potrebuje klasifikovaný AS modul pre každý prijímací kanál a je používaný iba autorizovanými používateľmi s kryptografickými kľúčmi. Kód P(Y) sa používa pre systém PPS.

Navigačná správa je tiež modulovaná kódom L1-C/A. Táto správa je blok dát s rýchlosťou 50 bit/s, ktorý obsahuje informácie o dráhe satelitu, hodinovej korekcii a ďalšie parametre.



Obr. 6.6 GPS satelitné signály (L1, L2 signál)

Dlhý kód (P alebo Y kód) je identický pre každý satelit. Krátky kód alebo C/A kód je jedinečný kód z generátora, ako je ukázané nižšie.



Obr. 6.7 GPS satelitné signály (G1, G2, C/A kód)

Tab 6.1 C/A kódy

SV PRN ID	G2 fázových odbočiek	Prvých 10 čipov			
1	2 & 6	1100100000	16	9 & 10	1111111110
2	3 & 7	1110010000	17	1 & 4	1001101110
3	4 & 8	1111001000	18	2 & 5	1100110111
4	5 & 9	1111100100	19	3 & 6	1110011011
5	1 & 9	1001011011	20	4 & 7	1111001101
6	2 & 10	1100101101	21	5 & 8	1111100110
7	1 & 8	1001011001	22	6 & 9	1111110011
8	2 & 9	1100101100	23	1 & 3	1000110011
9	3 & 10	1110010110	24	4 & 6	1111000110
10	2 & 3	1101000100	25	5 & 7	1111100011
11	3 & 4	1110100010	26	6 & 8	1111110001
12	5 & 6	1111101000	27	7 & 9	1111111000
13	6 & 7	1111110100	28	8 & 10	1111111100
14	7 & 8	1111111010	29	1 & 6	1001010111
15	8 & 9	1111111101	30	2 & 7	1100101011
			31	3 & 8	1110010101
			32	4 & 9	1111001010

C/A kódy sú definované pre 32 satelitných identifikačných čísel (PRN ID).

Meranie vzdialenosti d medzi satelitom SV (Satellite Vehicle) a prijímačom RX (Receiver) je základom pre meranie času cesty t_d rádio signálu (L1/L2) poslaného cez SV a rýchlosti šírenia c signálu:

$$d = c \cdot t_d$$

Čas cesty t_d je meraný synchronizáciou C/A kódu (alebo P(Y) kódu) prijímača vzhľadom k C/A kódu prijatého z SV. Štartovací čas tohto synchronizovaného C/A kódu v prijímači udáva Time Of Arrival (TOA) tzv. čas príchodu, C/A kódu z SV v prijímači. Štartovací čas t_1 C/A kódu v SV je známy (časová informácia je zahrnutá v navigačnej správe). Čas cesty t_d potom môžeme vypočítať z času t_1 a TOA. Pretože $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, čas musí byť meraný veľmi presne:

$$d = 20200 \text{ km} \quad t_d = 67,333 \mu\text{s}$$

$d = 300 \text{ m}$ $t_d = 1 \mu\text{s}$ = perióda C/A kódu

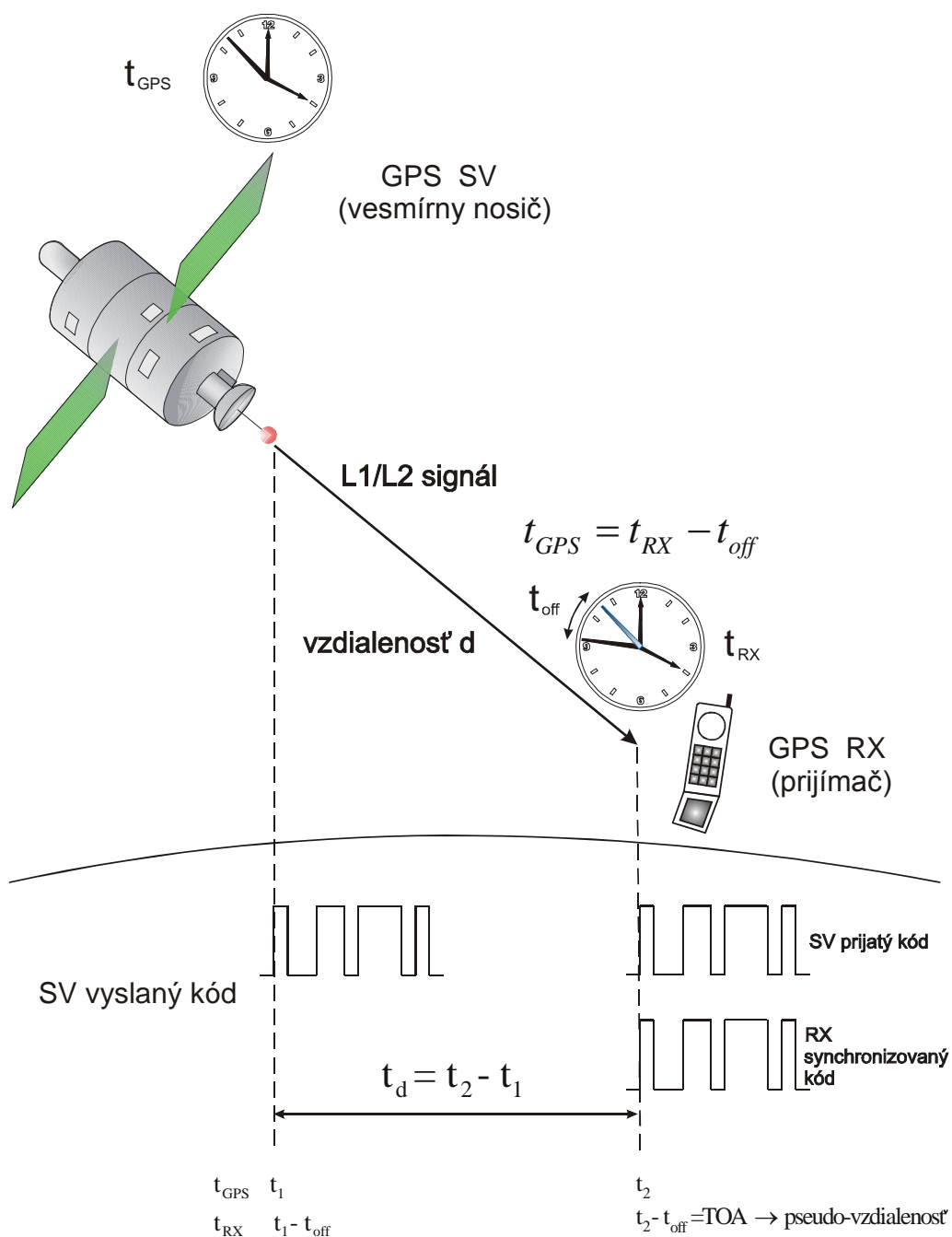
$d = 30 \text{ m}$ $t_d = 100 \text{ ns}$ = perióda P(Y) kódu

Na satelite je časovanie takmer ideálne, pretože má na palube precízne atómové hodiny. Nízko nákladový GPS prijímač nemôže mať atómovo - presné hodiny.

Čas prijímača t_{RX} vykazuje posun t_{off} z SV GPS času t_{GS} :

$$t_{RX} = t_{GPS} - t_{off}$$

Daň za túto nepresnosť TOA sa nazýva pseudo - vzdialenosť.



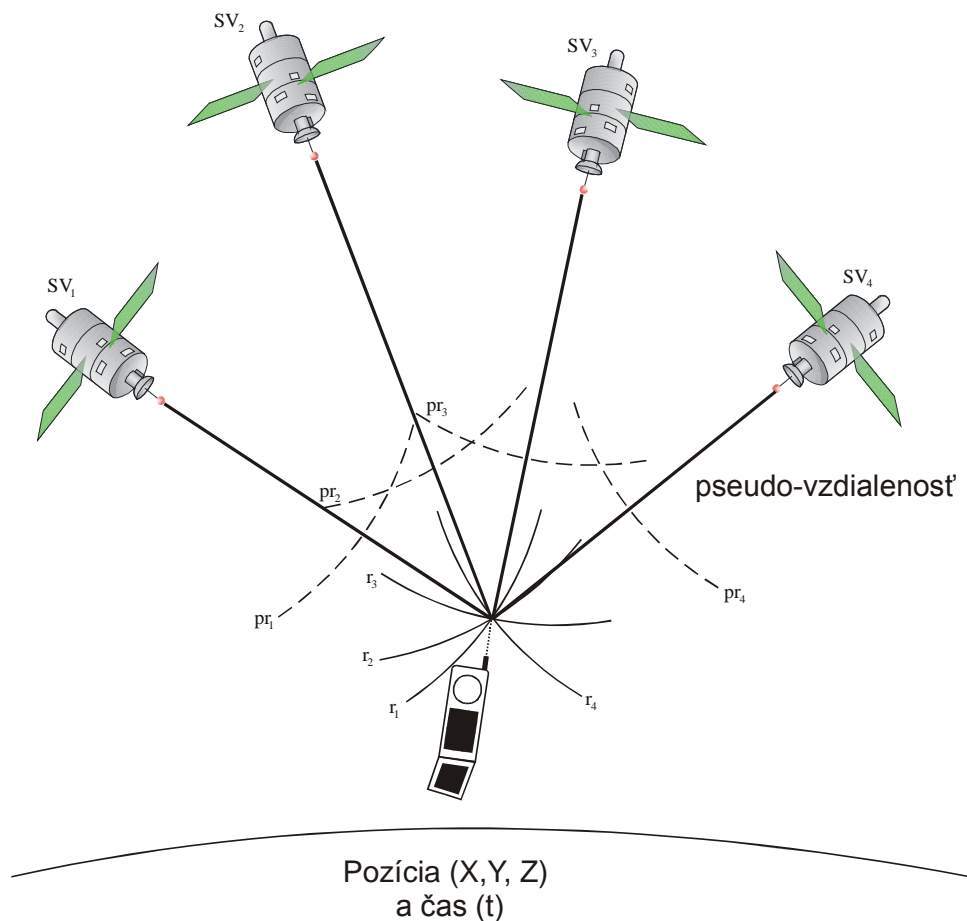
Obr. 6.8 Časovanie a meranie vzdialenosti

Ak sú hodiny prijímača presné, potom všetky satelitné (SV) dosahy sa budú pretínať v jednom bode (ktorý je pozíciou prijímača). Tri presné merania môžu lokalizovať bod v trojdimenzionálnom priestore.

Z dôvodu nedokonalých hodín prijímača, štvrté meranie (prevedené ako krížová kontrola), nebude sa pretínať s prvými tromi. Potom každý posun od GPS času spôsobí štvrté

merania rovnakými, prijímač musí zohľadniť jednoduchý korekčný faktor (časový posun), vyplývajúci zo všetkých prebiehajúcich meraní smerujúcich do priesečníka v jednom bode.

Prevedenie štyroch satelitných meraní dáva presnú pozíciu a informáciu o čase.



Obr. 6.9 GPS satelitné merania

6.11 Vyhliadky pre používateľov GPS do budúcnosti

Od 29. marca 1996, keď americká vláda oficiálne oznámila, že naďalej zachová dlhodobý prístup používateľov k systému GPS, že za tieto služby nebude vyžadovať žiadne poplatky, a že do štyroch až desiatich rokov odpojí systém umelého skreslenia polohy S/A, je možné očakávať ďalšie rozšírenie prístrojov GPS. Svoj sľub splnila a tak zvýšila prenosť systému GPS. Nová etapa GPS sa začala na konci roku 1996, odkedy začali byť vypúšťané v rámci systému GPS satelity novej generácie. Tieto satelity s označením Block IIR je možné

programovať zo Zeme a môžu udržiavať svoju obežnú dráhu po dobu 180 dní bez kontaktu s radiacou stanicou.

Prepojenie pripravovaného európskeho satelitného systému Galileo s americkým systémom GPS a s ruským satelitným navigačným systémom Glonass (Globalnaja Navigacionnaja Sistema) môže zaručiť zvýšenú integritu meraní, dôležitú predovšetkým v letectve.

6.12 Doplnková literatúra

[1] Podhradský,P.-Polec,J.-Karlubíková,T.: Multimediálne telekomunikačné technológie, Vydateľstvo STU v Bratislave, 2000

[2] Doboš,L.-Dúha,J.- Marchevský,S.- Wieser,V.: Mobilné rádiové siete. Vydala Žilinská univerzita v Žiline/ EDIS- vydavateľstvo ŽU, 2004.

[3] Ohmori, S.-Wakana,H.-Kawase.S:”Mobile Satellite Communications“, Artech House Publishers, Boston-London,1998.

[4] Brady, M. and M. Rogers, Digital Video Broadcasting Return Channel via Satellite (DVB-RCS) Background Book, Nera Broadband Satellite AS (NBS), 2002.

[5] Eutelsat, Overview of DVB, Annex B to Technical Guide, June 1999.

[6] Haykin, S., Communication Systems, 4th edition, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[7] ITU, Handbook on Satellite Communications, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[8] Joel, A., Retrospective: telecommunications and the IEEE communications society, IEEE Communications, May 2002.

7 Opis satelitného prijímača-Dreambox DM 8000 HD PVR

V tejto kapitole je opísaný multimediálny DVB – S, DVB – T/C prijímač z hľadiska jeho hardverových a softvérových vlastností.



Obr 7.1 Dreambox 8000 HD

Prijímač je vhodný na príjem voľných a kódovaných TV programov a rádii v štandardnom i vysokom rozlíšení obrazu. Pomocou vymeniteľných tunerov plug & play umožňuje prijímať terestriálnu aj káblovú digitálnu televíziu. Medzi jeho výhody patrí prehrávanie širokého množstva multimédií, emulácia kódovacích systémov, dekódovanie paketov i bez použitia prístupovej karty, zdieľanie prístupových kariet a súborov, jednoduchá integrácia do domácej siete, inštalácia pluginov, prístup na internet, Timeshift a iné.

Predný panel a odnímateľné bočnice sú z lesklého čierneho plastu. Na prednom paneli v klasickom Dreambox štýle sa nachádzajú tri modro podsvietené ovládacie tlačidlá a veľký, jasný OLED display. Dolnú polovicu predného panelu tvorí odklápacie veko, pod ním je umiestnený USB slot, slot pre CF a SD pamäťovú kartu, dve čítačky dekódovacích kariet, dva CI sloty a záslepka pre umiestnenie dvierok internej DVD mechaniky.



Obr. 7.2 Pohľad spredu na odklopený kryt DM 8000 HD

Zadný panel predstavuje konektivitu prijímača. K satelitného prijímača-Dreambox DM 8000 HD PVR pripojíme asi všetko. Signál od antény privedieme cez LNB vstupy, štandardne sú to dva tunery DVB-S/S2. Nové možnosti prináša rozšírenie o tunery DVB-T, DVB-C. Prístup k lokálnej sieti alebo sieti internet zabezpečuje konektor Ethernet, multimédiá si môžeme prehrávať pripojením sa do USB konektorov. Nájdeme tu aj dva sloty CA pre dekódovacie

moduly. Konektor SERVICE nám posluží pri vykonávaní upgradu softvéru prijímača. Medzi audio/video výstupy patria elektrický a optický zvukový výstup, S-VIDEO konektor, DVI konektor, ktorý nahrádza HDMI z licenčných dôvodov, konektory SCART, komponentný a kompozitný video výstup a zdrojovú časť s odpojiteľným prívodným káblom. Diaľkový ovládač je klasický, ako pri ostatných modeloch Dreambox, s veľmi dobrou citlivosťou. V jeho spodnej časti je rad štyroch tlačidiel pre ovládanie PVR.



Ob. 7.3 Pohľad zozadu na DM 8000 HD

7.1 Hardvérové vyhotovenie

Hardvér vo vnútri satelitného prijímača-Dreambox DM 8000 HD PVR nesie známky kvality. Základom prijímača je 400 MHz MIPS procesor (CPU) s označením BMC7400ZKFEB3G od firmy Broadcom, s vlastnosťami podľa výrobcu: má integrované dva AVC/MPEG-2/VC1 video dekodéry, dva audio dekodéry, 2D a 3D grafické procesory, digitálnu redukciu šumu (DNR), odstránenie prekladania riadku v obraze s kompenzáciou pohybu a s odstránením 3:2/2:2 pull-down (deinterlacer), 64 bitový radič DDR2, dvojité SATA 2 radič, akcelerátor JPEG, TIFF..., HDMI 1.3a/DVI 1.0 s HDCP 1.3, zbernicu PCI, ochranu kopírovania (AES, 3DES..), trojitý radič USB 2.0, dvojité prijímač diaľkového ovládania, podpora troch dekodovacích kariet.

Výrobcom operačnej pamäte je spoločnosť ELPIDA, osadených je šesť kusov čipov E5116AJBG-6E-E, 384 MB SDRAM. Flash pamäť dodáva firma Micron, čip 29F2G08AAC. Je to NAND pamäť o kapacite 256 MB. Na doske sú osadené dva tunery DVB-S/S2 (Broadcom), dva voľné sloty pre plug & play DVB-T/C (Philips). Ďalší hardvér : 3x USB 2.0, e-SATA, DVI, 4x CI slot, 2x interná čítačka kariet, wifi (802.11g), modul WMIA-165G, 54Mb/s, režim AP. Voliteľnými súčasťami sú HDD 3,5" SATA, DVD a aktívne prídavné chladenie. Zdroj dodáva spoločnosť Panasonic Europe, nesie typové označenie ETXEZ654M7F. Obsahuje jeden konektor pre napájanie dosky prijímača a jeden štandardný konektor pre napájanie HDD. Umožňuje voľbu napätí siete 230 V alebo 110 V prepínačom na zadnom paneli.



Obr. 7.4 Variabilita vymeniteľných tunerov

Vnútna koncepcia pozostáva zo zdrojovej časti a zo základnej dosky, kde sú logicky usporiadané hardvérové komponenty, novinkou je čítačka SIM kariet, tvorí funkciu zabezpečenia pred kopírovaním základnej dosky, bez vlozenej SIM karty prístroj nezapneme, v tejto rovine nájdeme procesor s chladičom, pamäťové moduly RAM, wi-fi modul, čítačky pamäťových kariet, čítačky prístupových kariet, sloty Common Interface, zvukový procesor, tunery a ostatné, už spomínané video/audio konektory, vrátane SATA konektora. O rovinu vyššie je šasi prispôbené pre uchytienie prídavného chladenia procesora, HDD a mechaniky DVD.



Obr. 7.5 Pohľad do vnútra DM 8000 HD

7.2 Softvérové vybavenie

Dostávame sa k popisu softvérovej časti. Štandardne sa Dreambox DM 8000 dodáva so základným softvérom Enigma 2. Oficiálny softvér ponúka bežné funkcie. Komunita vývojárov dobrovoľne, a bez nároku na honorár, vytvára pre Dreambox softvér, ktorý mu pridáva nadštandardné funkcionality, ktoré u ostatnej konkurencie nenájdeme. V tomto je Dreambox jedinečný. Táto podpora z druhej strany je dôvodom, prečo si zákazníci prístroj obstarávajú i napriek vyššej vstupnej investícii. Návravnosť sa prejaví vo forme neustálej softvérovej podpory. Z neoficiálnych vývojových komunit spomeniem SFteam, ruDream.

Najpoužívanejším image je Gemini 2 v 5.1. Je to známy a najviac rozšírený image.



Obr. 7.6 Menu Gemini Extras

Rôzne image majú väčšinu súčastí rovnakých, líšia sa vo forme správy doplnkov (pluginov) a emulátorov, prípadne v podpore prehrávaných multimédií.

Prepracované grafické menu obsahuje základné nastavenia, DVD player, časovač, funkciu zap./vyp. a tzv. Blue – Panel.

a. Blue Panel

Je špeciálnym menu v Gemini 2. Dovoľuje prevádzať rôzne nastavenia, ako príklad uvádzam úpravy informačného banneru (zobrazenie kryptovania, ECM, meno camd, satelitnej pozície a iné), určenie doby zobrazenia rôznych hlásení, (napr. camd zapnúť, vypnúť, označovanie nových nahrávok a iné), sťahovanie a inštaláciu addonov, teda pluginov, ktoré sú na serveri Gemini projektu. Blue – panel má implementované emulátory: CCcamd2, DCCcamd, Evocamd, Mbox, Mgcamd, MpCS, NewCS, Opencam, Rq-Echo-Client, RqCS, RqCamd, Scam, ich konfigurácie: Cam-Configs. Z ďalších úprav sú nastavenia šetričov obrazovky – MVI, úpravy ikoniek TV programov - Picony, úpravy settingu – zoznamu naladených TV programov, úpravy skinov – grafického vzhľadu menu, nastavenia update pre Gemini 2 a nastavenia pluginov.



Obr. 7.7 Menu Blue Panel

Pluginov je veľké množstvo, možno ich inštalovať priamo v menu prijímača alebo ručne, t. j. stiahnutím z internetu a následnou inštaláciou, čím sa dosahuje veľká variabilita v možnostiach použitia Dreamboxu.

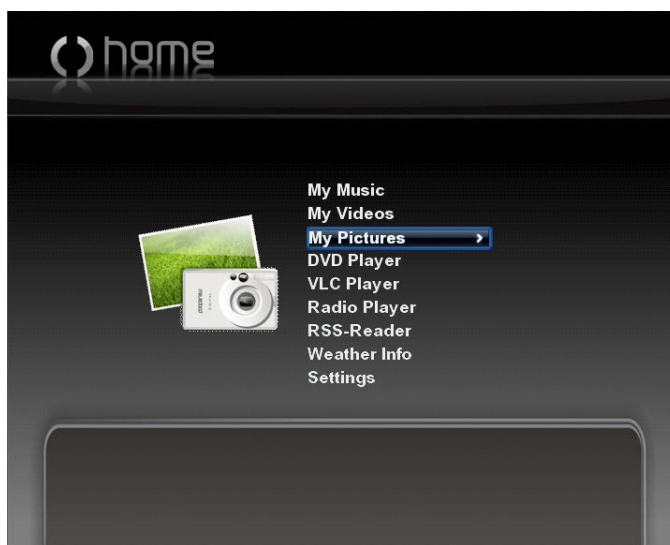
b. Pluginy

Rozširujú funkčnosť prijímača pre užívateľa. Niektoré pluginy sú špecifikované pre určitý model Dreamboxu, no ostatné bežia na všetkých modeloch. Umožňujú inštaláciu web prehliadača, jukeboxu, informátora o počasí, hier a iných. Uvádžam niektoré pluginy a ich opis:

Qt Webbrowser – plugin na plnohodnotné prehliadanie internetových stránok za pomoci USB klávesnice a myši. Je ho potrebné inštalovať ručne. Stiahnuť do adresára /tmp a pomocou Správcu súborov nainštalovať.

MyTube – plugin pre sledovanie videí z obľúbeného video servera YouTube. Inštaluje sa priamo z menu prijímača. Plugin je prepracovaný. Video dokáže uložiť a spúšťať pomocou prehrávača médií, či už z interného HDD, USB pamäti alebo zo sieťového HDD.

Mediacenter – z prijímača sa stáva multimediálne centrum. Umožňuje prijímaču prehrávať veľké množstvo multimédií, ako DivX, MKV, AVI, MP4, taktiež HD formáty. Má vlastný známy prehrávač multimédií VLC. Ešte spomeniem FTP klienta, čítačku RSS správ, E-mail klienta a veľa iných.



Obr. 7.8 Menu Plugins Mediacenter

7.3 Záznam

Prijímač umožňuje nahrávanie na interný HDD, externý HDD a na akékoľvek zdieľané zariadenie prostredníctvom počítačovej siete. Nahrávať je možné toľko programov naraz, koľko dovoľí zapojenie zdroja signálu (polarita, frekvencia pre jeden tuner DVB-S/S2, jeden multiplex pre jeden tuner DVB-T alebo jeden kanál (multiplex) v prípade DVB-C tunera. Prakticky je

možné súčasne zaznamenať až 10 SD programov alebo 4 HDTV programov. Nahrávky sú ukladané do adresára /movie na HDD vo formáte .ts, video aj všetky audio stopy. Prehrávač si nahrávky automaticky nalistuje a dovoľuje ich úpravy priamo v menu.

7.4 Emulátory

Emulátory umožňujú dekódovanie pay-tv bez dekódovacej karty alebo s originálnou dekódovacou kartou. Umožňujú zdieľanie dekódovacích kariet v prijímači medzi tunerami, aj externe medzi viacerými užívateľmi, prostredníctvom siete Internet. Emulátory NewCS a OScam sú vhodné pre inštaláciu v našich podmienkach. Majú implementovanú podporu Skylink (ICE) kariet, funkčnosť príjmu inštrukcií ECM a EMM. Zdieľaním kariet si užívateľ zníži náklady na obstaranie dekódovacích kariet, nakoľko k dekódovaniu požadovaného paketu postačí jedna karta pre viacero účastníkov nezávisle. Využívanie týchto možností však nemusí byť vždy v súlade s aktuálnou legislatívou. Výhodou použitia emulátorov je možnosť úpravy a následnej komunikácie interných čítačiek prakticky so všetkými použiteľnými smart kartami na trhu.

7.5 Zálohovanie a obnova dát

Zálohovanie systému a nastavení je pre užívateľa dôležité v prípade, ak potrebuje preinštalovať svoj Dreambox. Zálohovanie je prácne a náročné na čas, pretože je potrebné si skopírovať rôzne nastavenia. Nastavení je naozaj veľa, obsahujú údaje, ako napríklad adresa siete, maska siete, brána Gateway, nastavenia USALS (Longitude, Latitude), nastavenie tunera, pluginov vrátane ich konfigurácie, záznamy z časovača a settingu, konfiguráciu zdieľania a iné. Všetky tieto úkony za užívateľa vykoná plugin NFI-Backup, čím užívateľovi ušetrí čas a prácu. Celková záloha trvá približne desať minút, ukladá sa na harddisk do adresára /hdd/backup/NFI-Backup. Názov súboru nesie informáciu o dátume a čase vykonania ako aj o verzii bootloadera označeným .nfi. Systém ho považuje za súbor s image, preto nedôjde k jeho zmazaniu. Následne môže byť vykonaná obnova systému. Čas obnovy trvá približne štyri minúty.

7.6 Záver

Dreambox DM 8000 HD PVR je špičkový prístroj po hardvérovej i softvérovej stránke, skvele vybavený HDTV DVB - S / DVB - T prijímač na báze Linuxu. Jeho nadštandardné výhody opísané v tejto kapitole radia DM 8000 HD PVR na špičku dostupných multimediálnych prístrojov ponúkaných na trhu v súčasnosti. Konštrukcia prístroja sa však nevyhla nadmernému zahrievaniu, ktoré sa dá eliminovať aktívnym chladením - vetráčikom, či nie príliš vhodnému mechanickému vyhotoveniu predných dvierok, ktoré sa prejaví pri častom otváraní v súvislosti s použitím DVD mechaniky. Napriek malému nedostatku si tento prístroj získal a získava obľubu svojich priaznivcov. Nesie dobrú myšlienku, integrovať v sebe multimediálne centrum

a prijímač digitálnej televízie s možnosťou prehrávania a vytvárania DVD médií, s možnosťou záznamu TV programov v štandardnom i HDTV rozlíšení, pripojením na internet, zdieľaním, softvérovou emuláciou a nakoniec, majoritnou softvérovou podporou.