



**Moderné vzdelávanie pre vedomostnú spoločnosť/
Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ**

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Stanislav Marchevský



Agentúra
Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR
pre štrukturálne fondy EÚ



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

Autor: prof. Ing. Stanislav Marchevský, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Pavol Podhradský, PhD., doc. Ing. Ján Dúha, PhD.

Názov: Satelitné technológie a služby

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach

Náklad: 50 ks

Vydanie: prvé

Rozsah: 126 strán

Rok: 2012

ISBN: 978-80-553-1073-2

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

Za odbornú a obsahovú stránku zodpovedá autor.



Moderné vzdelávanie pre vedomostnú spoločnosť/

Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Stanislav Marchevský



Obsah

1 Úvod	8
1.1 Aplikácie a služby satelitných sietí	8
1.1.1 Úloha satelitných sietí.....	9
1.1.2 Sieťový softvér a hardvér.....	11
1.1.3 Satelitné sieťové rozhrania.....	11
1.1.4 Sieťové služby	12
1.1.5 Aplikácie	12
1.2 ITU-R definícia satelitných služieb.....	13
1.2.1 Pevné satelitné služby (FSS).....	13
1.2.2 Mobilné satelitné služby (MSS).....	13
1.2.3 Vysielania satelitnej služby (BSS).....	13
1.2.4 Ostatné satelitné služby.....	14
1.3 ITU-T definícia sieťových služieb	14
1.3.1 Interaktívne služby.....	14
1.3.2 Distribučné služby	15
1.4 Internetové služby a aplikácie	16
1.4.1 World Wide Web (WWW)	16
1.4.2 File Transfer Protocol (FTP).....	17
1.4.3 Telnet	17
1.4.4 Elektronická pošta (e-mail).....	18
1.4.5 Skupinové vysielanie (multicast) a distribúcia obsahu	18
1.4.6 Prenos hlasu cez internetový protokol (VoIP).....	18
1.4.7 Systém doménových mien (DNS)	19
1.5 Sieť s prepájaním okruhov	19
1.5.1 Nastavenie pripojenia.....	21
1.5.2 Signalizácia	21
1.5.3 Prenosová hierarchia multiplexu založená na FDM	21
1.5.4 Prenosová hierarchia multiplexu založená na TDM.....	22
1.5.5 Priestorové a časové prepínanie.....	24
1.5.6 Zisk kódovania - forward error correction (FEC).....	25
1.6 Sieť s prepojaním paketov	26
1.6.1 Spojovo – orientovaný prístup.....	27

1.6.2	Nespojovo orientovaný prístup	28
1.6.3	Vzťah medzi prepájaním okruhov a prepájaním paketov	29
1.6.4	Vplyvy paketov na návrh siete	30
1.6.5	Paketová hlavička a používateľské dáta (payload)	31
1.6.6	Zložitosť a rôznorodosť sietí	31
1.6.7	Vykonávanie paketových prenosov	31
1.6.8	Vplyv chýb na bitovej úrovni na paketovú úroveň	32
1.7	OSI/ISO referenčný model	32
1.7.1	Protokolová terminológia	33
1.7.2	Princíp vrstvenia	33
1.7.3	Funkcie siedmich vrstiev	34
1.7.4	Zoslabovanie významu OSI/ISO referenčného modelu	35
1.8	ATM protokolový referenčný model	35
1.8.1	Úzkopásmové ISDN (N-ISDN)	35
1.8.2	Širokopásmové ISDN (B-ISDN)	36
1.8.3	ATM technológia	36
1.8.4	Referenčný model	36
1.8.5	Problémy: nedostatok dostupných služieb a aplikácií	37
1.9	Referenčný model internetových protokolov	37
1.9.1	Sieťová vrstva: IP protokol	38
1.9.2	Sieťové technológie	38
1.9.3	Transportná vrstva: TCP a UDP	38
1.9.4	Aplikačná vrstva	39
1.9.5	Problémy: žiadne QoS a žiadna kontrola zdrojov	39
1.10	Satelitná sieť	39
1.10.1	Prístupová sieť	40
1.10.2	Tranzitná (prenosová) sieť	40
1.10.3	Vysielacia (Broadcast) sieť	40
1.10.4	Vesmírny segment	40
1.10.5	Pozemský segment	42
1.10.6	Satelitná obežná dráha	42
1.10.7	Satelitné frekvenčné pásma vysielania	43
1.11	Vlastnosti satelitných sietí	45
1.11.1	Oneskorenie šírením	46

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

1.11.2	Strata šírením a obmedzený výkon	46
1.11.3	Obežná dráha a obmedzená šírka pásma	47
1.11.4	Prevádzková zložitosť pri LEO satelitných systémoch	47
1.12	Kapacita kanála pri digitálnych prenosoch.....	47
1.12.1	Nyquistova rovnica pre bezšumové kanály (The Nyquist formula for noiseless channels)	47
1.12.2	Shannonova rovnica pre zašumené kanály	48
1.12.3	Hraničná kapacita kanálu.....	48
1.12.4	Shannonova výkonová hranica (-1.6dB).....	49
1.12.5	Shannonova efektívna šírka pásma pre veľké E_b/N_0	50
1.13	Doplnková literatúra.....	51
1.14	Cvičenie.....	51
2	Orbitálne dráhy satelitov	53
2.1	Úvod	53
2.2	Kruhová dráha	54
2.2.1	Základné formulácie	54
2.2.2	Narušenie (perturbation) obežnej roviny	57
2.2.3	Viacnásobná satelitná formácia	61
2.3	Eliptická obežná dráha	63
2.3.1	Orbitálny tvar	63
2.3.2	Pozícia satelitu ako funkcia času	68
2.3.3	Rušenie.....	73
2.3.4	Viacnásobna satelitná formácia	74
2.4	Geostacionárne obežné dráhy.....	76
2.4.1	Stabilita komunikačných liniek.....	76
2.4.2	Pohyb na blízko geostacionárnych dráhach.....	76
2.5	Pohyb udržiavaných satelitov.....	80
2.6	Rozsah rýchlosti a jej variácie.....	80
2.7	Výpočet azimutu a elevácie.....	82
2.8	Doplnková literatúra.....	88
3	Energetická bilancia satelitného spoja.....	89
3.1	Konfigurácia mobilného satelitného komunikačného systému.....	89
3.2	Základné parametre v energetickej bilancii satelitného spoja.....	91
3.2.1	Šum terminálu.....	91

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

3.2.2	Šumové číslo	92
3.2.3	Šumová teplota prijímača	96
3.2.4	Účinnosť (G/T)	98
3.3	Závislosť medzi prenášaným a prijímaným výkonom	99
3.4	Pomer signál/šum (C/No) v satelitných komunikačných spojoch.....	103
3.5	Strategické technológie pre mobilné satelitné komunikačné systémy	109
3.5.1	Systémové požiadavky a strategické technológie.....	109
3.5.2	Technológia satelitov	110
3.5.3	Informačné technológie	112
3.5.4	Technológia terminálov	112
3.6	Mobilné satelitné transpondéry	112
3.6.1	C/L transpondéry	113
3.6.2	L/C transpondéry	113
3.7	Frekvenčná interferencia	117
3.7.1	Koordinácia interferencie.....	117
3.7.2	Hodnotenie interferencie.....	117
3.7.3	Metódy na redukciu interferencie	124
3.8	Literatúra	126

1 Úvod

Táto kapitola učebnice 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 pozemskými sieťami.
- Poznať rôzne satelitné služby, sieťové služby a kvalitu služieb (QoS).
- Spoznať rozdiely medzi satelitnými sieťami a pozemskými 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.

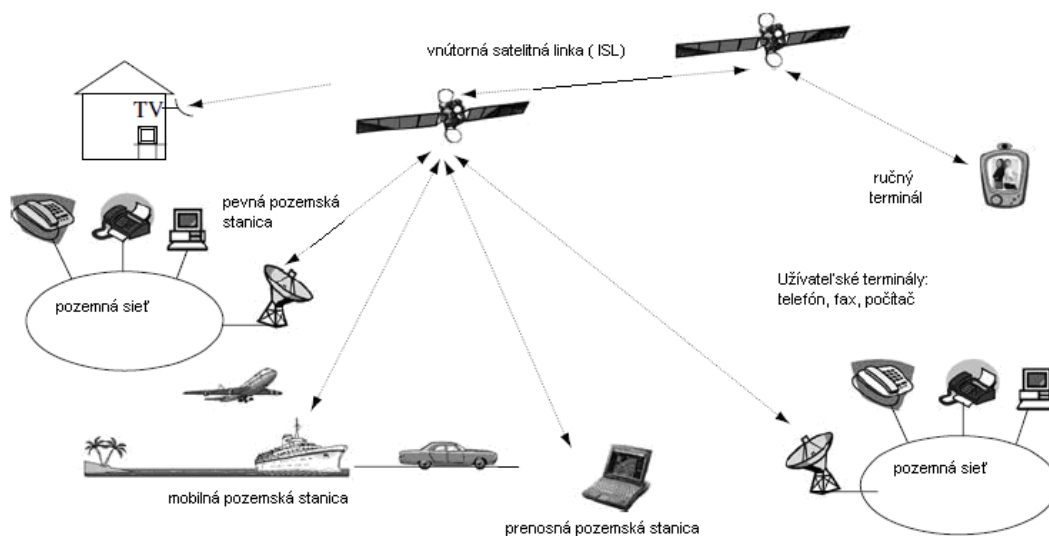
1.1 Aplikácie a služby satelitných sietí

Satelity sú umelé hviezdy na oblohe, a sú často mýlne považované za skutočné hviezdy. Pre mnoho ľudí sú plné tajomstiev. Vedci a inžinieri ich prirovnávajú k vtákom - lietajú vo výškach, o ktorých sa ostatným živým tvorom môže len snívať. 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 vytvárajúce siete a ich vysoká nadmorská výška umožňuje zohrávať jedinečnú úlohu v globálnej sieťovej infraštruktúre (HND).

Satelitná sieť je rozširujúce sa pole, ktoré sa vyvinulo od významného zrodienia sa prvého telekomunikačného satelitu, od tradičnej telefónie a TV vysielacích služieb po 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 pozemských 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 pozemskými 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. Používateľský 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 pozemských sietí, satelitov s inter-satelitnými spojeniami (ISL), pevnými pozemskými stanicami, mobilnými pozemskými stanicami, prenosnými a ručnými terminálmi a používateľskými terminálmi priamo pripojenými k satelitnej linke alebo prostredníctvom pozemských sietí.

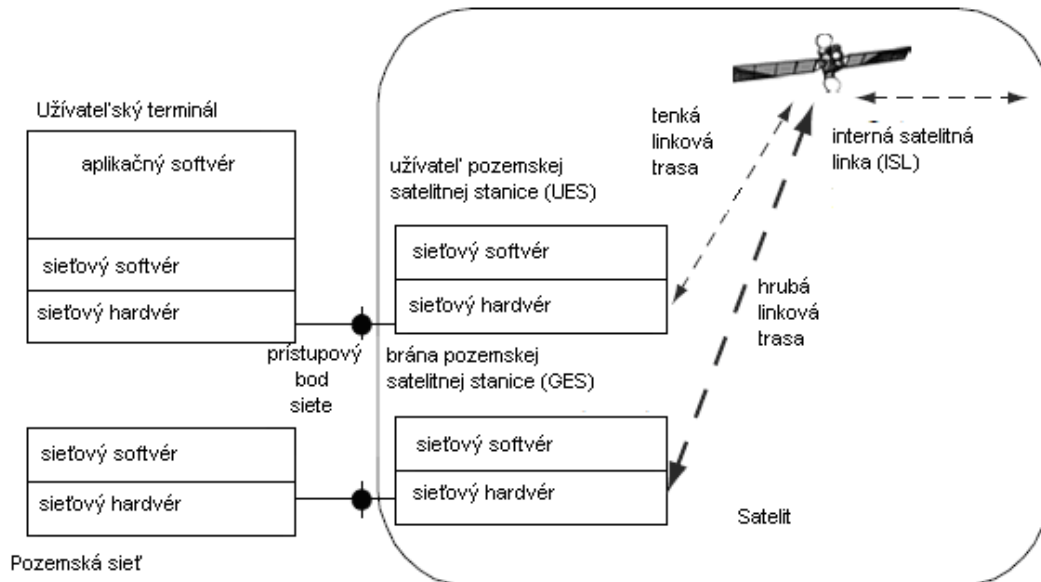
1.1.1 Úloha satelitných sietí

V pozemských 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 používateľskými terminálmi, pripájajú terminály k prístupovému bodu pozemskej siete a spájajú pozemské siete. Používateľské terminály poskytujú služby a aplikácie na osoby, ktoré sú často nezávislé od

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

satelitných sietí, t.j. rovnaký terminál môže byť použitý pre prístup k satelitnej sieti, ako aj k pozemským sieťam. Satelitné terminály, sa tiež nazývajú pozemské stanice a sú pozemským segmentom satelitných sietí, poskytujú prístupový bod na satelitnú sieť pre používateľské terminály prostredníctvom používateľských pozemských staníc (UES) a pozemských sietí cez bránu pozemských 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, pozemskými 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 pozemských 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 pozemskými sieťami tak, aby aplikácie a služby poskytované v pozemských sieťach, ako sú telefóny, televízia, širokopásmový prístup a pripojenie k internetu mohol byť rozšírený do miest, kde káblové a pozemské 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 pozemských sietí. Satelity tiež zohrávajú dôležitú úlohu v armáde, meteorológii, globálnych navigačných systémoch (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. Prírodzene, 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 nahrádzané 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 prevažne 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 pozemskými 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 využívajú 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 vysielací 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 pojmami 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 používateľ QoS si odporujú v cieľoch objektívneho nastavenia prevádzkového zaťaženia, tj. 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.

Optimalizácia 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 pozemské 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 pozemskými stanicami je cez jeden satelit alebo viaceré satelity prepojené prostredníctvom ISL. Je tiež možné mať dva prepojené satelity prostredníctvom spoločnej pozemskej 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 telefónovanie, 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 pozemské 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 pozemských 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 hostiteľom (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 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 vybraté tak, 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, vyžadáva 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 pripojenom 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 funkcií prehliadača.

1.4.3 Telnet

Toto je jedna z prvých internetových služieb poskytujúca textovo založený prístup 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, t.j. používateľ nemôže spoznať rozdiel medzi odpoveďou od lokálneho počítača alebo od vzdialeného počítača. To nazývame tiež časom transparentnosti vtedy, ak odpoveď je taká rýchla, že používateľ nemôže poznať rozdiel medzi miestnymi počítačmi a vzdialenými počítačmi prostredníctvom času odpovede. 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 používaním 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 používateľským 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 reprodukovať 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.

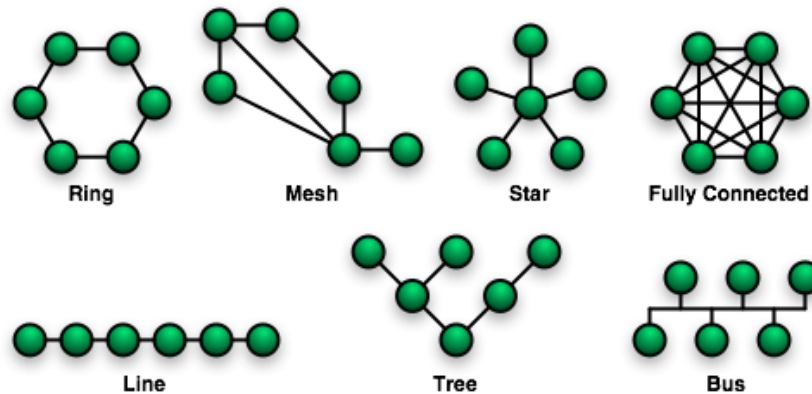
DNS je v skutočnosti distribuovaný systém na internete. Ak jeden DNS server nevie, ako preložiť konkrétny názov domény, požiadava druhý DNS server dovedy, kým nie je vrátená správna IP adresa.

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

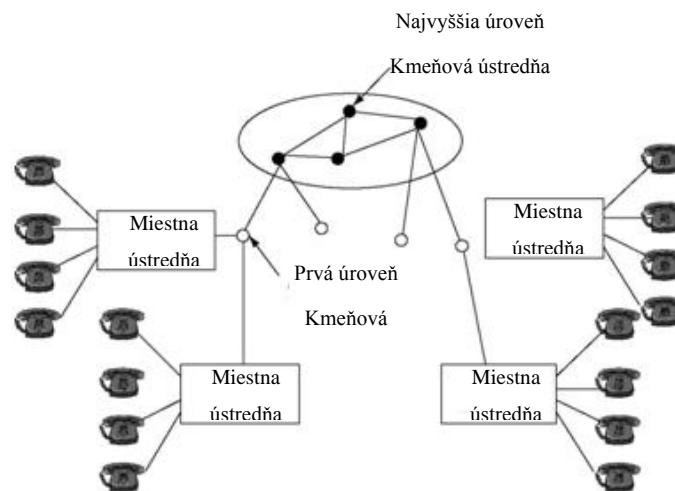
Pojem siete s prepájaním okruhov pochádza zo začiatkov analógovej telefónnej siete. Sieť môže mať rôznu topológiu ako je napr. hviezda, strom, kruh na rôznych úrovniach na

dosiahnutie potrebného pokrytia a škálovateľnosti. Obrázok 1.3 znázorňuje typické topológie sietí.



Obr. 1.3 Typická topológia sietí

Príklad telefónnych sietí je na obrázku 1.4. Na úrovni miestnej ústrední (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 pozemských sieťach.

1.5.2 Signalizácia

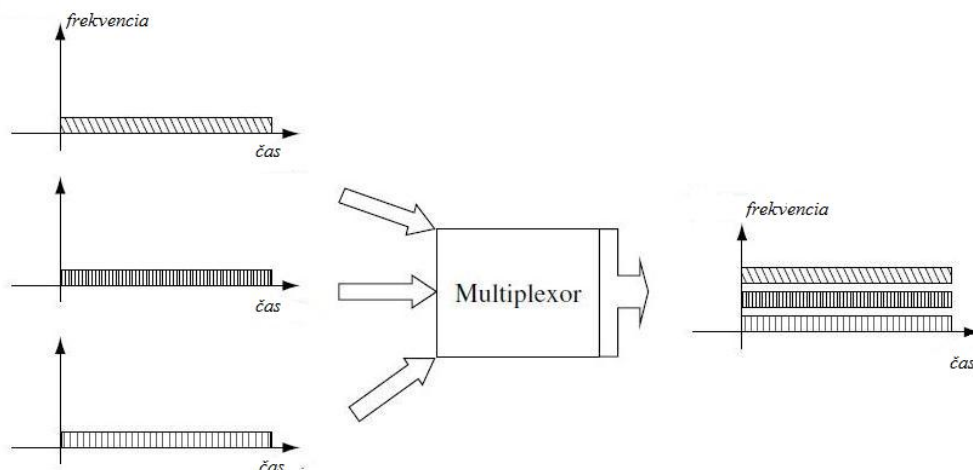
Súčasná generácia prepínačov sa môžu zaoberať len jednoduchou signalizáciou. Signalizačná informácia bola obmedzená na minimum a signál používa rovnaký kanál ako kanál pre hlas. Moderné prepínače sú schopné sa vysporiadať s veľkým množstvom kanálov, a preto je signalizácia minimalizovaná. Spínače samy 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 signalizácie so spoločným kanálom (CCS). V systémoch CCS 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

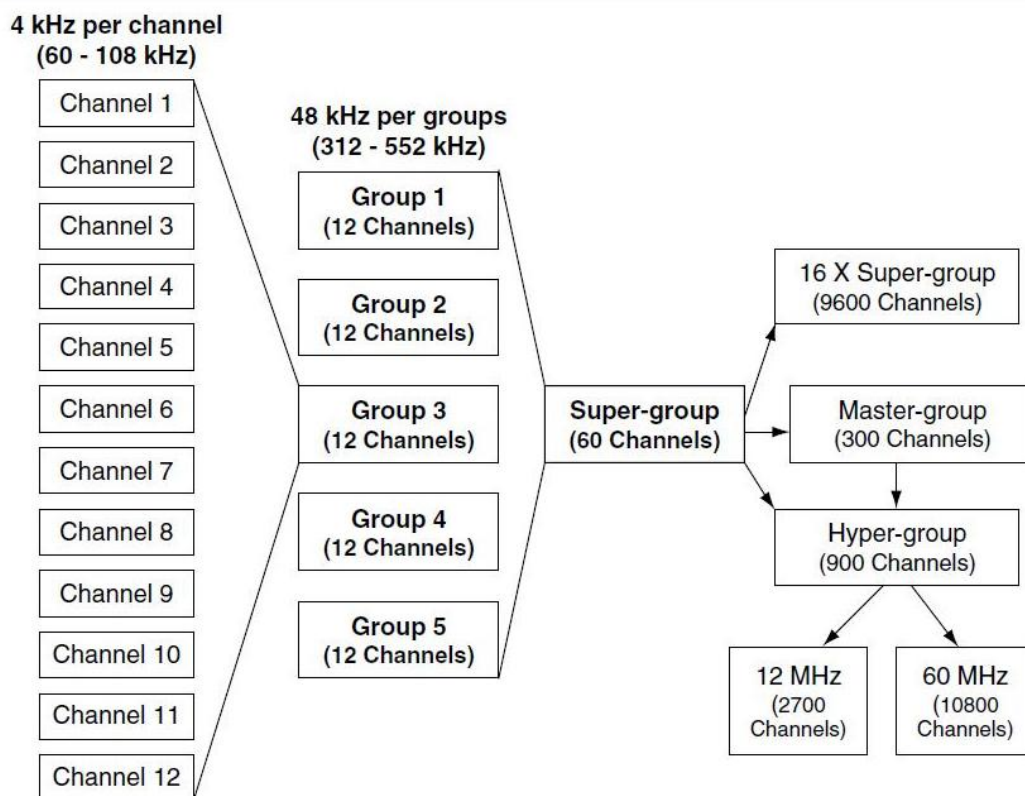
Frekvenčne delený multiplex (FDM) je technika zdieľania šírky pásma medzi rôzne pripojenia v oblasti frekvencií. Všetky prenosové sústavy sú navrhované na prenos signálov v rámci obmedzenia šírky pásma merané v Hertzoch (Hz). Systém môže prideliť časť pásma tzv. kanál pre pripojenie k podpore sieťových 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, päť super-group tvorí master-group, pätnásť super-group tvorí hyper-group alebo tri master-group tvorí hyper-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.

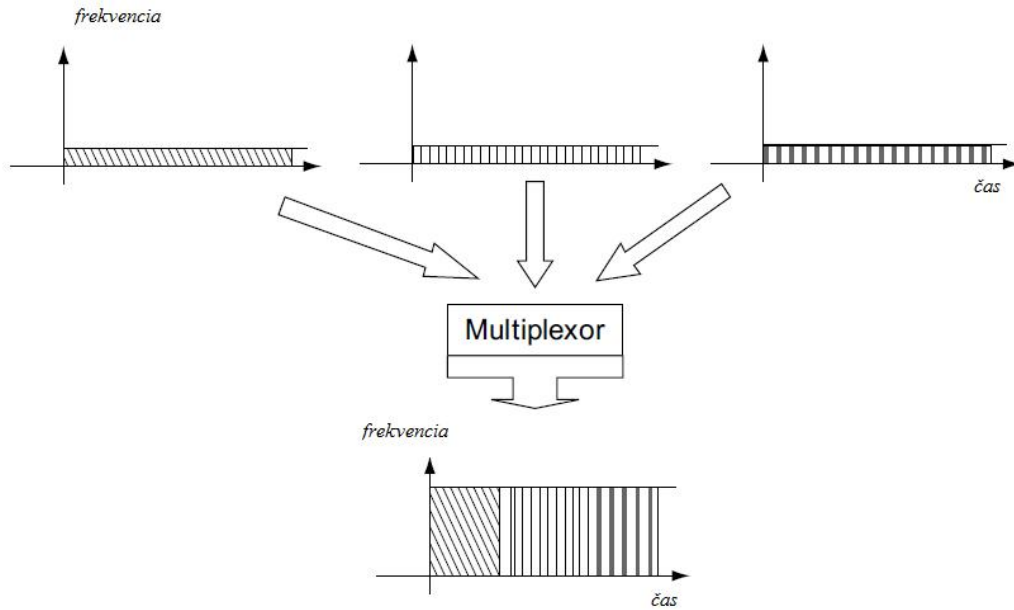


Obr. 1.5 Multiplexovanie v oblasti frekvencie

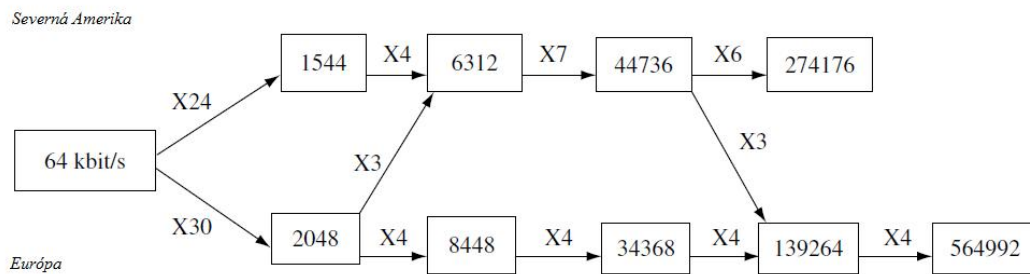


Obr. 1.6 Hierarchia analógového vysielania

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



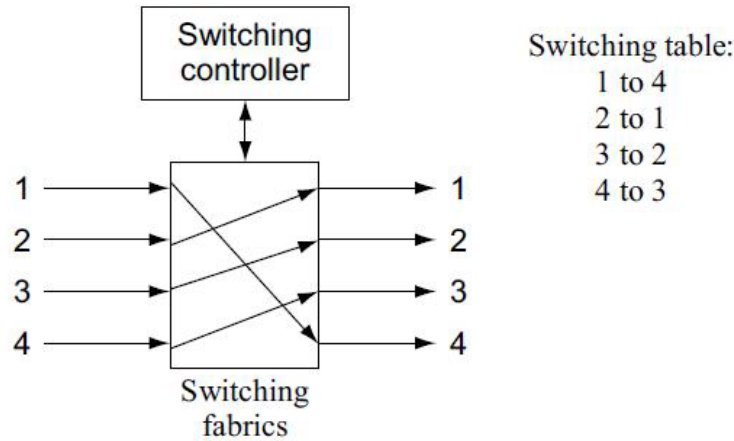
Obr. 1.8 Hierarchia digitálneho prenosu

Digitálne toky vo zväzkoch (trunks) a prístupové linky sú organizované do štandardnej digitálnej 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.

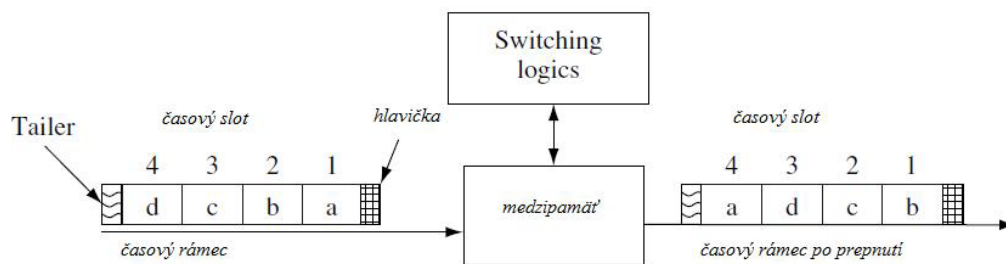
1.5.5 Priestorové a časové prepínanie

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 šumu (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.

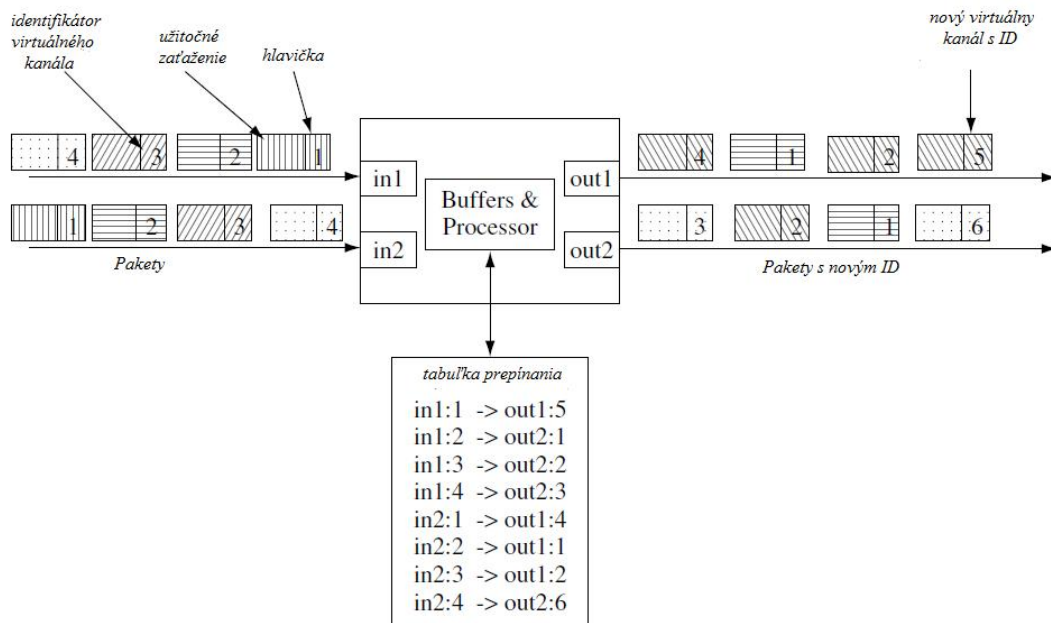
1.6 Sieť s prepojaním paketov

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. Počiatkové paketové 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 multimedialných 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 siete s prepojovaním 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 prepojovaním paketov, každé fyzické spojenie má omnoho väčšiu šírku pásma, ktorá je schopná podporovať vysokorýchlostné 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 sa sieť 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 užitočnej záťaže. 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 prepájaní okruhov sú fyzické cesty nastavené tak, aby bol prechod zabezpečený od vstupných kanálov na výstupné kanály. Vo virtuálnom prepájaní kanálov sú kanály označené logickými číslami, teda zmenou logického číselného identifikátora sa virtuálne prepájajú pakety do iného logického kanála. Virtuálne prepájanie kanálov sa tiež nazýva virtuálne prepájanie okruhov. Obr. 1.11 znázorňuje koncepciu virtuálneho prepájania kanálov.



Obr. 1.11 Virtuálne prepájanie kanálov

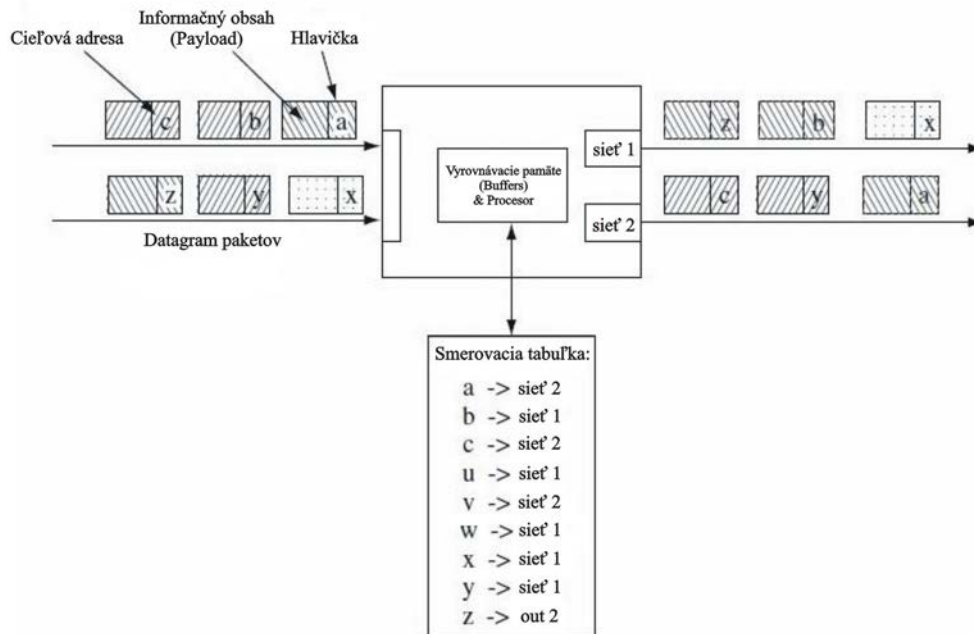
Uzol siete sa nazýva paketový prepínač a funguje ako tradičné prepojenie okruhov, ale dáva flexibilitu pre pridelovanie rôzneho množstva zdrojov virtuálneho spojenia. Preto je to veľmi užitočná koncepcia pre širokopásmové siete a používa sa v Asynchronous Transfer Mode (ATM) sieti. Identifikátory virtuálneho 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 nazývané 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 uzavretiam 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 používateľských dát. Hlavička nesie informácie, ktoré sú používané sieťou na spravovacie, signalizačné, prepínacie a kontrolné účely. Používateľske dáta nesú informácie, ktoré sú prijaté a spracované používateľskými 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 vyrovnávacej pamäti (buffer). Služby v reálnom čase nemusia byť schopné tolerovať dlhé oneskorenia, teda sa uprednostňujú malé pakety.

1.6.5 Paketová hlavička a používateľské dáta (payload)

Koľko bitov by sa malo použiť pre paketovú hlavičku a koľko pre používateľské dáta? S veľkou hlavičkou je možné niest' 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 málo používateľských dát. 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:

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

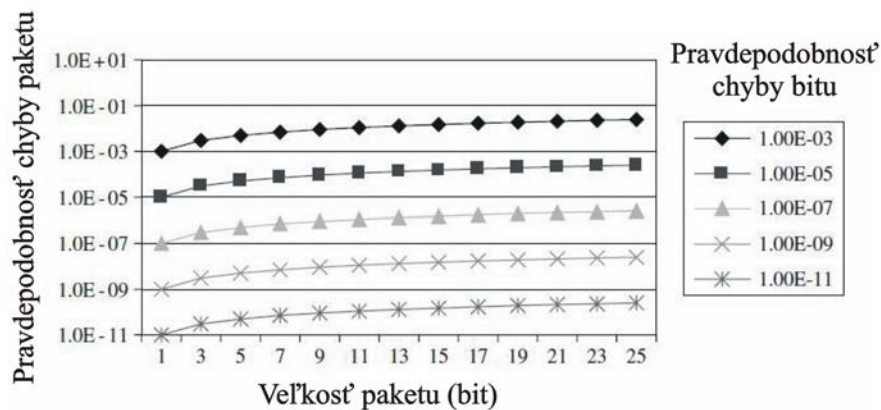
kde t_t je čas pre prenos paketu do kanálov, t_p je čas šírenia paketu cez kanál do prijímača a t_r je spracovávací čas potvrdenia paketu prijímačom. Môžeme vidieť, že veľké paketové prenosové časy alebo malé časy šírenia a paketové spravovacie časy sú dobré pre vykonávanie paketového prenosu.

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 zrejme, že Medzinárodná organizácia pre normalizáciu ISO (International Standards Organization) 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 aktuálneho stavu 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 aktuálne implementované služby.

Každá vrstva má prepojenie s jednoduchými operáciami, ktoré možno použiť pre prístup k ponúkaným 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 spájanie, 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.

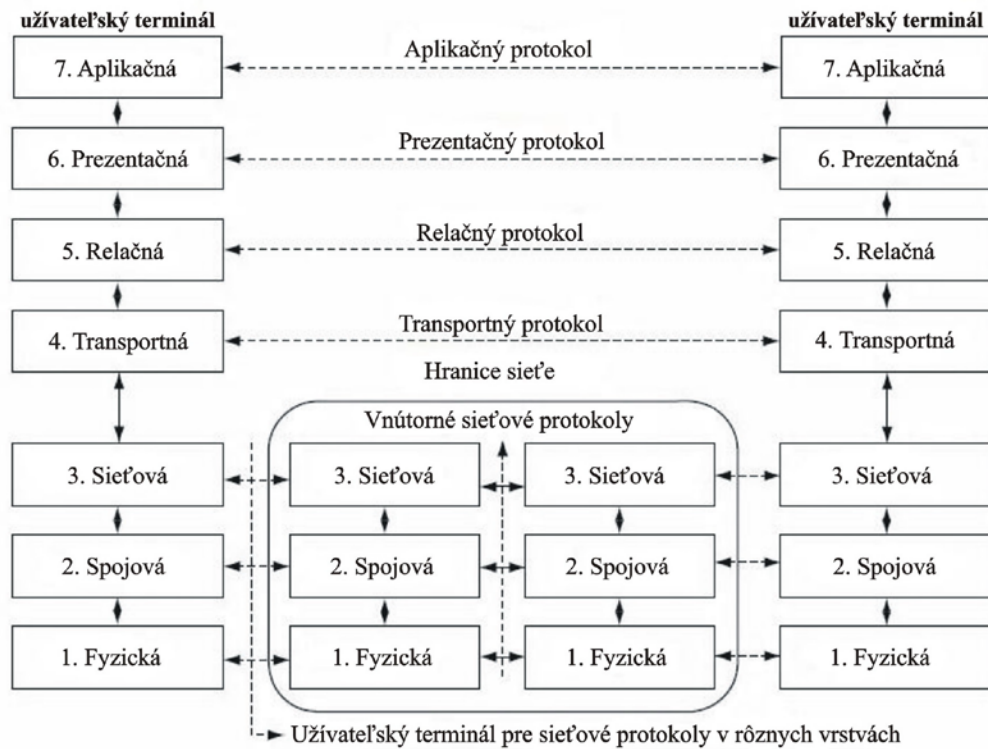
1.7.2 Princíp vrstvenia

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 rozsiahly.



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, segmentácia a spájanie, 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 používateľov 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 ústredniam. 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 okruhových 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.

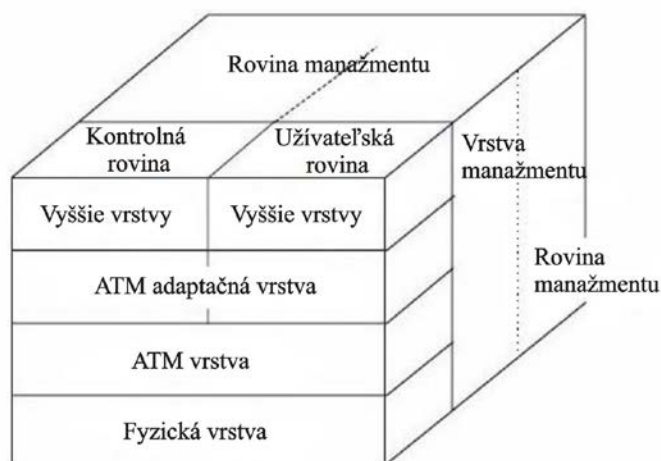
1.8.3 ATM technológia

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 :

- Fyzická vrstva poskytuje fyzické média-súvisiace prenosy ako sú optické, elektrické a mikrovlnné;
- ATM vrstva definuje ATM bunky a súvisiace ATM funkcie;
- 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.

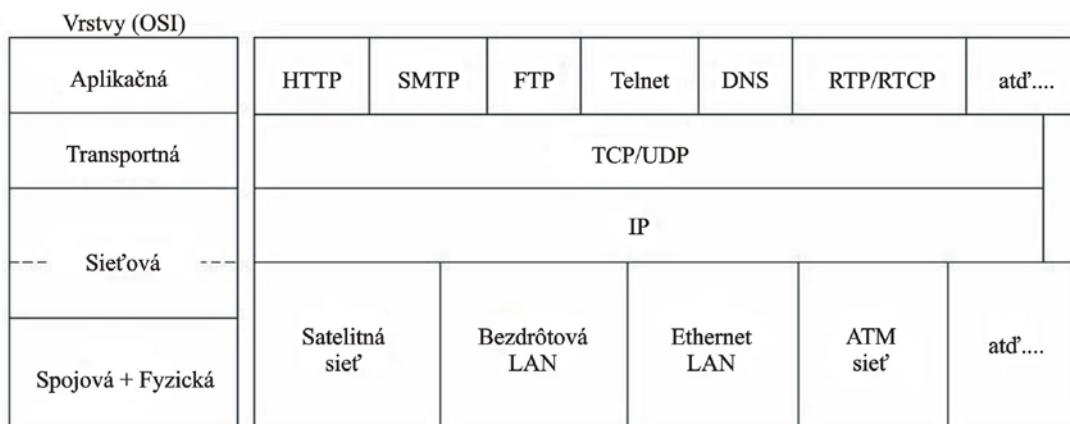
1.9 Referenčný model internetových protokolov

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.

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

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 posiela vpred každý paket na základe štvorbajtovej 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. Prenášajú IP pakety z jedného konca siete na druhý koniec. Zdrojový host posiela 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 používateľský 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 použitá sieť 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 používateľské terminály alebo súkromné siete. V historických telefónnych sieťach poskytovali pripojenie z telefónnych alebo súkromných pobočkových ústrední (PBX) do telefónnych sietí. Používateľské terminály sa spájali zo satelitným terminálom na zemi a takýmto spôsobom pristupovali priamo do prístupovej satelitnej linky. V dnešnej dobe, navyše ku klasickej telefónnej 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 v kvalite 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)).

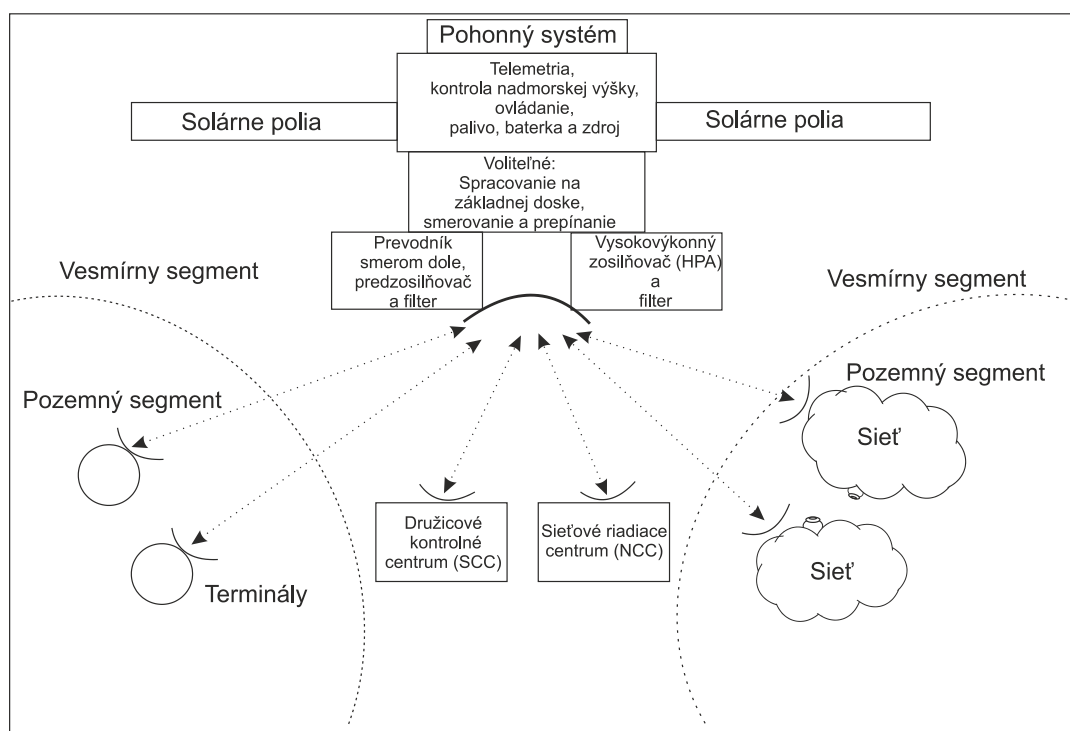
1.10.3 Vysielacia (Broadcast) sieť

Satelit podporuje obe služby – telekomunikačné aj vysielacie. Satelit môže poskytovať 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 pozemského segmentu: pozemských 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 štruktúralnu 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 pozemských staníc a preposielajú ich naspäť na pozemskú 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 pozemskú 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 počet satelitov so zabudovanými smerovačmi.

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Okrem toho, riadiace centrum satelitu (satellite control centre – SCC) a riadiace sieťové centrum (network control center – NCC) alebo sieťové centrum vedenia (network 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 pozemskej 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

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

- Vysielacie a prijímacie antény sú najviac viditeľné časti pozemskej stanice. Sú rôznej veľkosti, typicky 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.
- Vykonový zosilňovač (HPA – high power amplifier) vysielajúca 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.

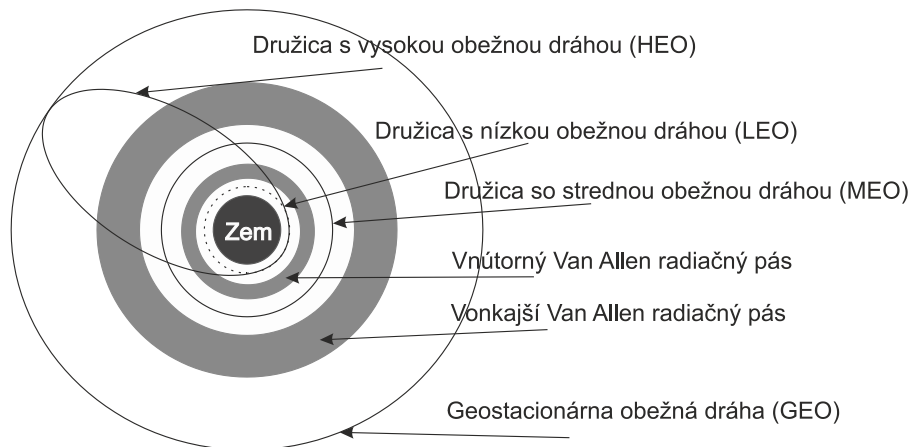
1.10.6 Satelitná obežná dráha

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

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 menšej ako 5000 km. Satelity tohoto typu sú nazývané LEO satelity. Čas obehu LEO satelitu trvá približne 2-4 hodiny.
- Satelit so strednou obežnou dráhou (MEO-medium earth orbit) sa nachádza v nadmorskej výške v rozsahu medzi 5000 až 20 000 km. Satelity tohoto typu sú nazývané MEO satelity. Čas 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. Čas 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

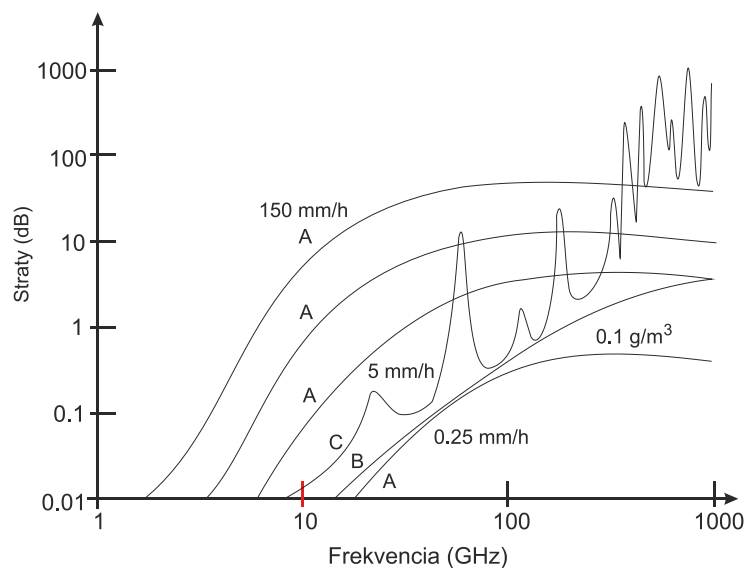
- Van Allenove vyžarovacie pásy, kde sa ukladajú energetické častice ako sú napríklad protóny a elektróny sú udržiavané magnetickým poľom zeme. Tieto častice môžu spôsobiť škodu na elektronických a elektrických komponentoch satelitu.
- Pásky vesmírneho odpadu, kde sa nachádzajú trosky kozmických lodí, 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

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

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.

Najviac obmedzujúcimi činiteľmi pre ďalšie vhodné frekvenčné pásma pre účely satelitnej komunikácie, ktoré ovplyvňujú prostredie pre šírenie rádiových signálov sú 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 tzv. 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 pásiem.



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
L band	1.12 – 2.6
S pásmo	2.6 – 3.95
C pásmo	3.95 – 8.2

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

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 (RFR – radio frequency repeaters) alebo takzvané „oblúkové prenosové“ (bent pipe) satelity. Regeneratívny (smart) satelit, minimálne regeneruje prijatý digitálny signál. Taktiež môže dekódovať 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 vrstvomého referenčného modelu. Existujú tri hlavné technické problémy v satelitných spojeniach, v dôsledku vzdialenosti, v ktorej sa satelit nachádza od pozemskej 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)	Vládne a armádne satelity
		10.95 -11.2	Medzinárodné a domáce satelity v regióne 1 a 3
		11.45 - 11.7 12.5 – 12.75 (1000 MHz)	Intelsat, Eutelsat, Francúzsko,

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

					Nemecko, Španielsko, Rusko
13-14/11-12 pásmo	Ku	13.75-14.5 (750 MHz)	10.95-11.2		Medzinárodné a domáce 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 prejdanie takýchto vzdialeností – a to: od pozemskej stanice k satelitu a ku inej pozemskej stanici – je približne 250 ms. Spiatocné 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 lebo 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

použitie vysoko výkonové vysielacie 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 zaplňa s geostacionárnymi satelitmi. Narastá rádiovýkvenčné rušenie z jedného satelitného systému k inému. Toto obzvlášť platí pre systémy používajúce menšie antény na pozemských staniách s ich podstatne širšími vyžarovacími uhlami (beam width). Toto všetko spôsobuje frekvenčné zahustenie vysieláčov.

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 pozemským terminálom a satelitom v dôsledku rýchleho pohybu zoskupenia LEO satelitov.

1.12 Kapacita kanála pri digitálnych prenosoch

Vo frekvenčnej oblasti môže väčšia šírka pásma 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

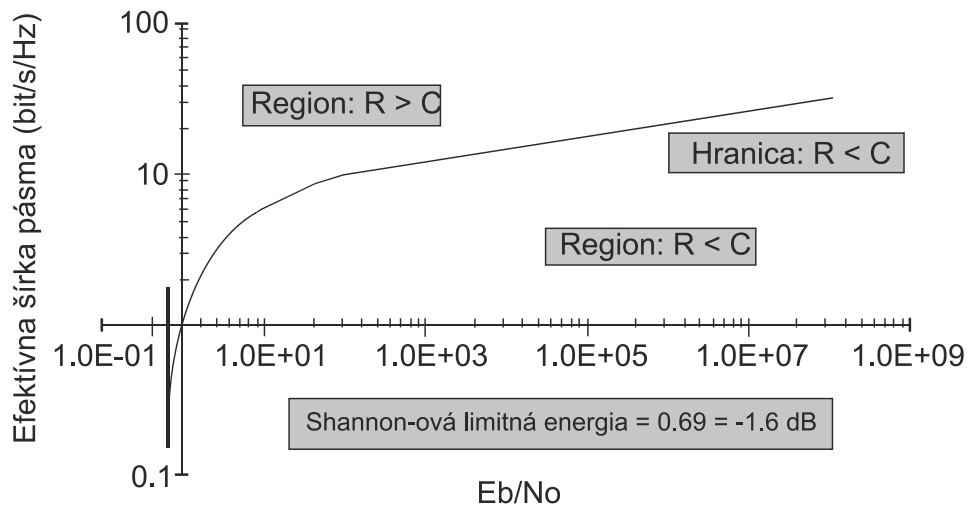
Nech $R=C$ v rovnici (1.7), potom dostávame funkciu hraničnej kapacity medzi účinnosťou C/B a daným E_b/N_0 :

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

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 Shanonov limit výkonu:

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

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.

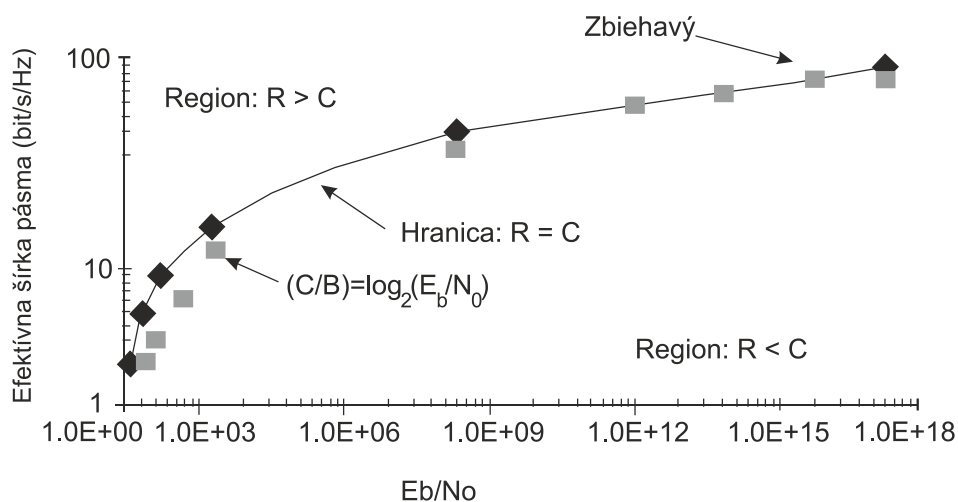
1.12.5 Shannonova efektívna šírka pásma pre veľké E_b/N_0

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 Shanonov výkonový limit a Shanonovu 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 orbity, 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 vyšetrením 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

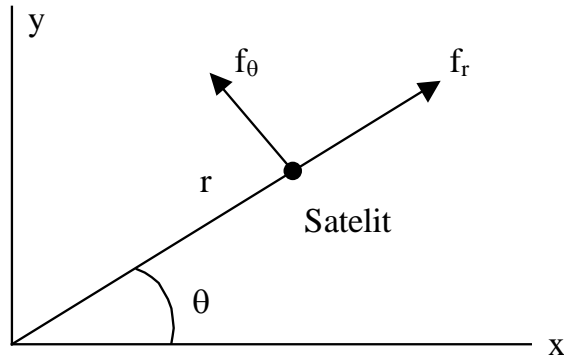
$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta$$

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

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

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 čas (perióda) obehu

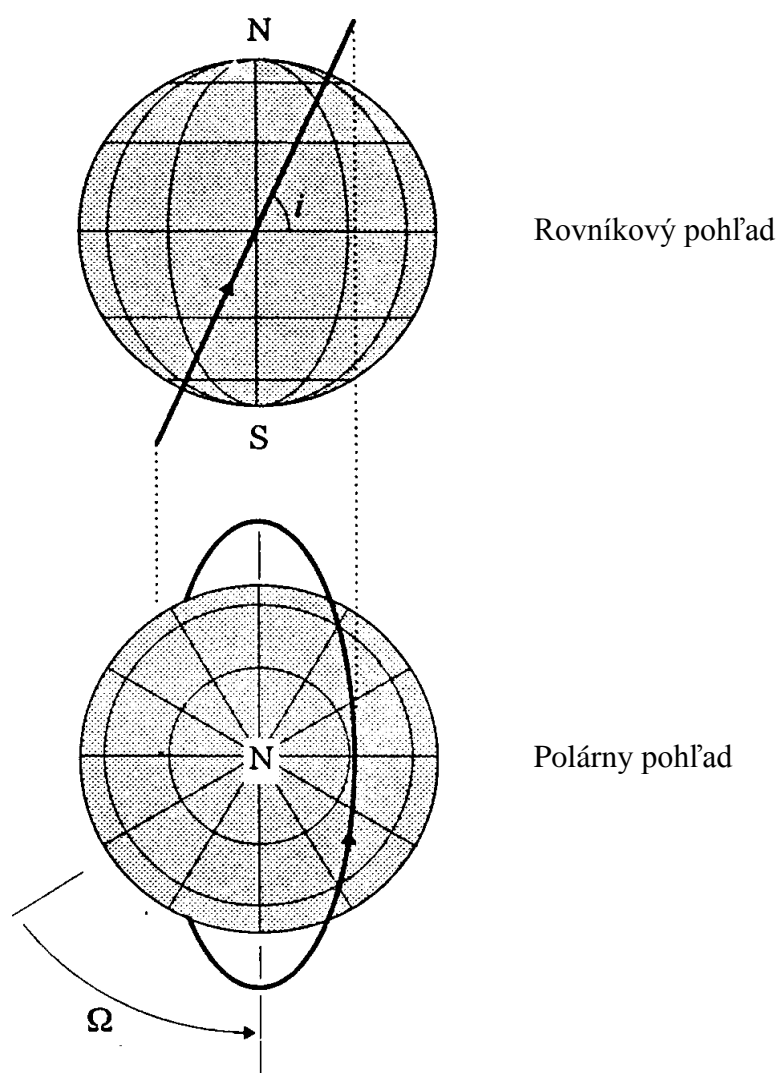
$$P = 2\pi/\Psi = \sqrt{r^3/\mu} \quad (2.12)$$

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 (patrične 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.

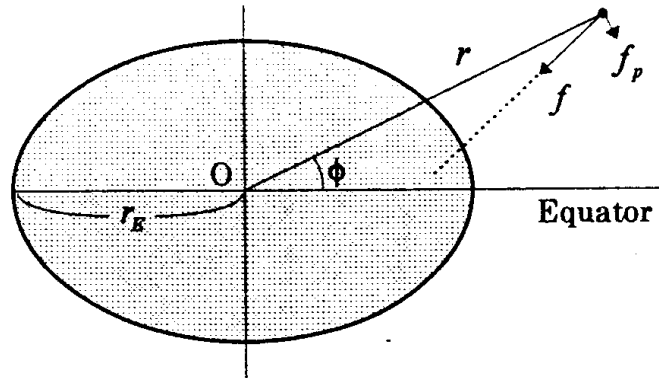


Obr. 2.2 Orientácia orbitálnej roviny: rovníkový a polárny pohľad

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 orbitálnu 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

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

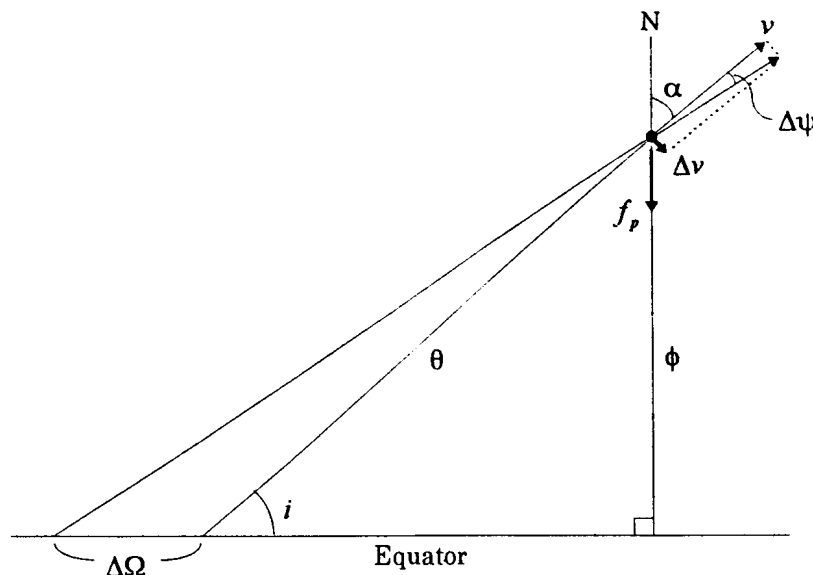
kde $r_E=6378.15$ km je polomer Zeme na rovníku a konštanta $J_2=0.0010823$ je miera zemského sploštenia. Ukážme, že táto zložka sily spôsobuje chybu v priamom smere uzla stúpania.

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 vyjadrí 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 dθ 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

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

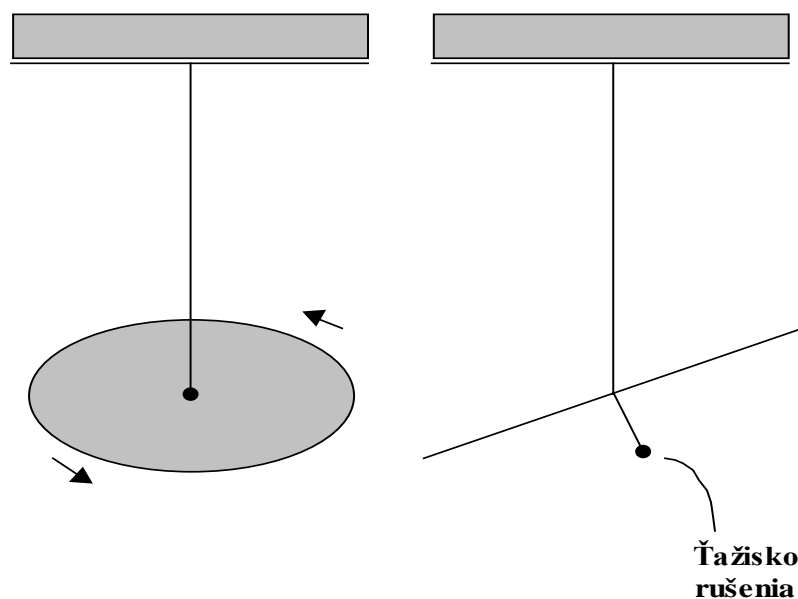
Určitý integrál v tejto rovnici je rovný π (3.14), teda získame

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

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 ($i=+90$ stupňov), jej uzol (vrchol) sa nehýbe. Pre obežnú dráhu s inklináciou medzi $+90$ stupňov a -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 sa disk 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 rúčka dáždника, a dajme malé závažie na jej koniec, ako na obrázku 2.5. Bude to fungovať tak, ako viesť rovinu disku strmo 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

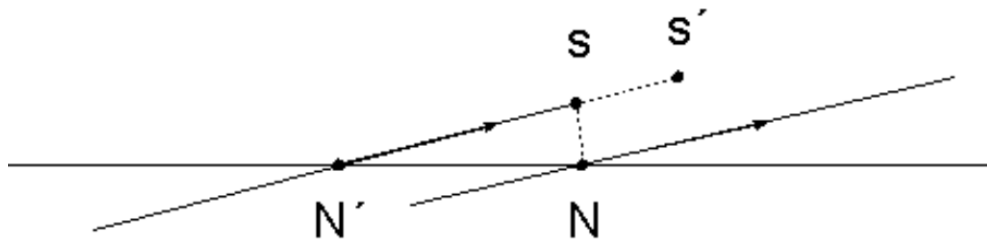
V našej poslednej analógii, uzol ostane stáť, ak sa disk otáča vo vertikálnej rovine, kým sa skutočne uzol polárnej orbitálnej dráhy nehýbe. Odkiaľ sa táto nezhoda vzala?

Niektor 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

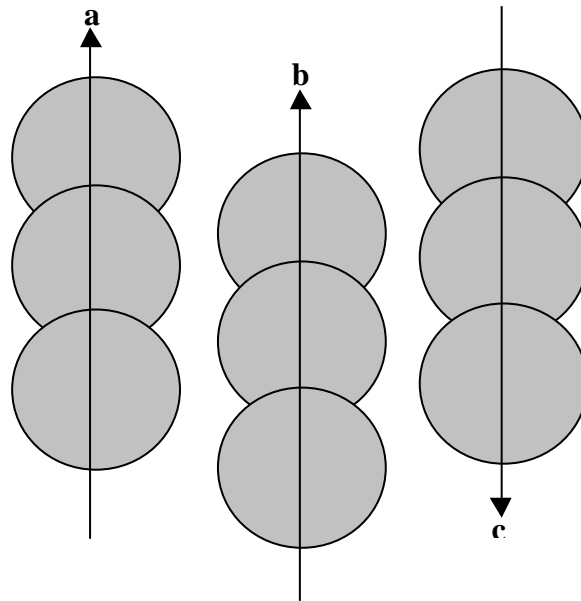
Použitie kruhovej obežnej dráhy pre mobilné komunikácie ukazuje svoju cenu, keď určitý počet satelitov je využitý tak, aby poskytoval široké služobné pokrytie. Satelity musia byť usporiadané v správnej orbitálnej formácii tak, aby sme si boli istí plynulou službou pri danom pokrytí. Návrh takéhoto usporiadania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

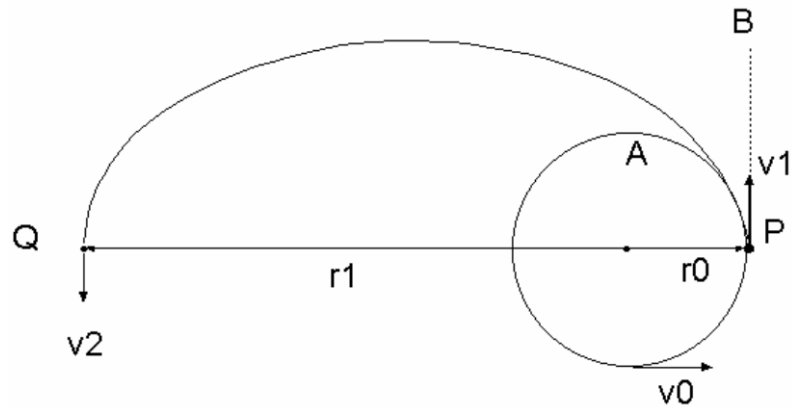
Výber výšky satelitu vyžaduje dokonalé zváženie. Nižšie výšky môžu byť výhodné kvôli menším stratám šírenia a kvôli menšiemu časovému oneskoreniu. Ich nevýhodou je, že ich spôsobujú drastické pribúdanie satelitov kvôli menšiemu rozmeru kruhu pokrytia. Ak je výška satelitu menšia než 1000 km a blíži sa 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 1500 do 5000 km a od 13000 do 20000 km. Na to aby sa vymyslela formácia vyhovujúca týmto stavom je potrebné vykonať veľmi veľa pokusov a omylov, sú potrebné skúsenosti a fantázia. Avšak, nezáleží na tom aká komplikovaná viacnásobná formácia 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

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

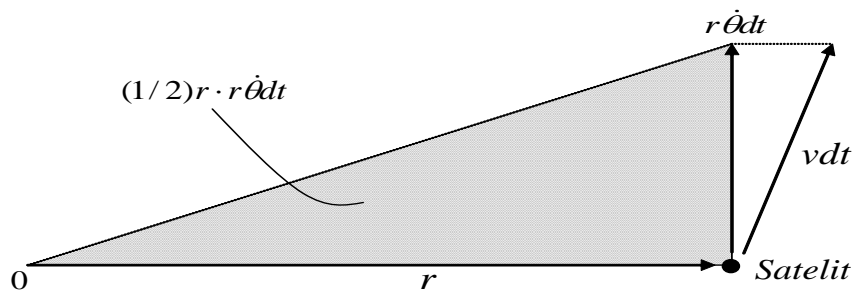
z ktorej môžeme napísať

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

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

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

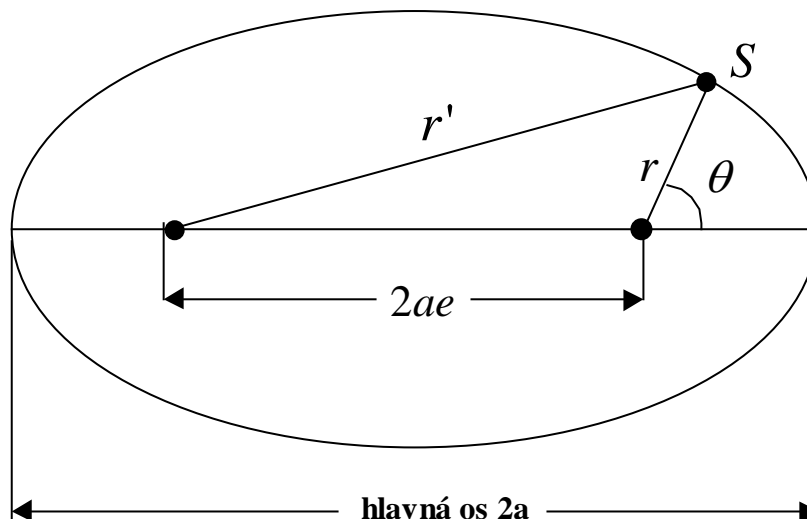
Dokážme, že z toho vznikne elipsa. Ak satelit S opíše elipsu ako ukazuje obrázok 2.10, S sa musí pohybovať tak, aby suma vzdialeností z S do dvoch ohniskových bodov zostala konštantná, ako

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

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 $e=0$.

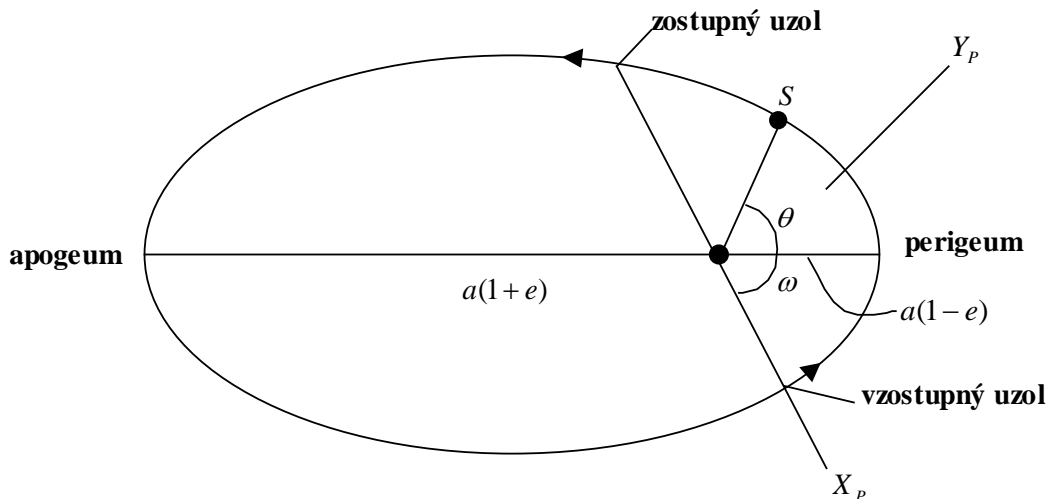
2.3.2 Pozícia satelitu ako funkcia času

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

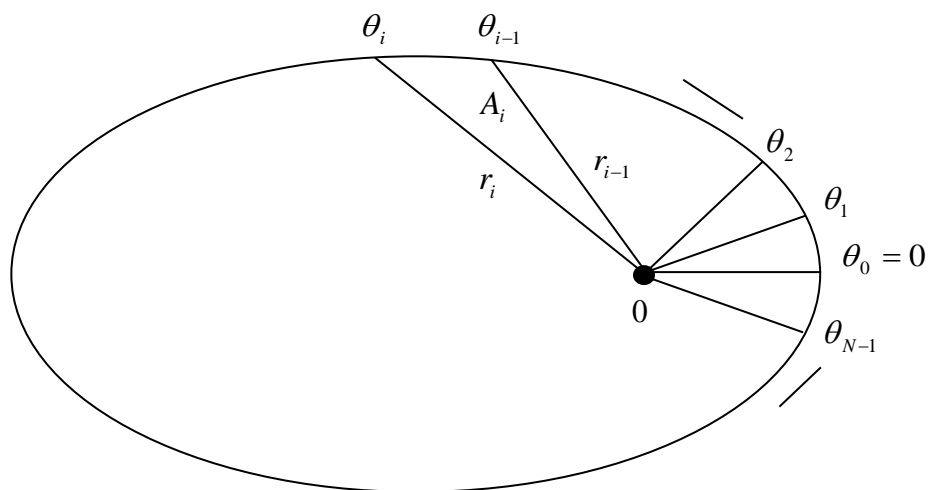
$$m = E - e \sin E$$

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 zberať 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 v 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 $\vartheta_i = i\varDelta\vartheta$ z $\varDelta\vartheta=2\pi/N$. 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 obeh získame 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.

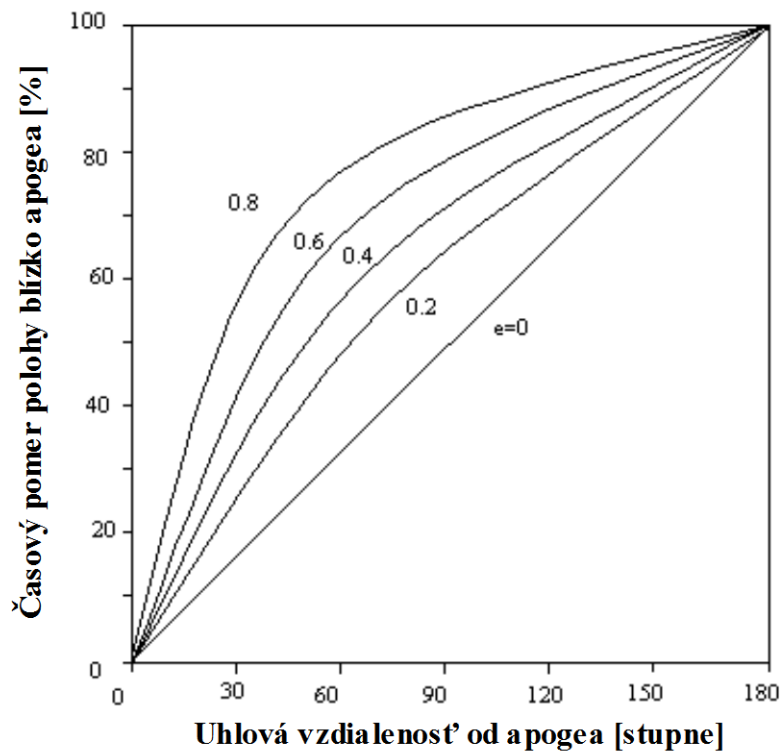
V diskusii k obr. 2.8 bolo kvalitatívne vysvetlené, že satelit na eliptickej dráhe by mal zostať dlhšie v blízkosti oblasti apogea. To môže byť teraz analyzované prostredníctvom nášho časového rozpisu. V tabuľke nájdeme dĺžku času, podľa ktorej spadá skutočná anomália do $\pm\vartheta$ apogea. Toto časové 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 osciluje 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. Ďalej 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

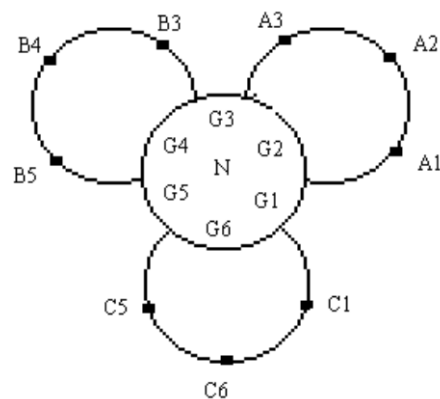
a sploštenosti Zeme. Ak v budúcnosti objavíme neznámu planétu a táto planéta bude mať satelit na eliptickej obežnej dráhe s inklináciou 63.4° , potom najpravdepodobnejšie sa bude jednať o umelý satelit poskytujúci regionálne služby na povrchu planéty.

2.3.4 Viacnásobna satelitná formácia

Bez ohľadu na to ako sa môže predĺžiť čas v blízkosti apogea, jediný satelit nemôže na eliptickej obežnej dráhe poskytovať spojitú komunikačnú službu pre pozemského používateľa nepretržité komunikačné služby. Podobne ako pri kruhovej obežnej dráhe, vzniká tu nutnosť využívať viacero satelitov na vytvorenie orbitálnej formácie. 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 je potom usporiadaný 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 pozemskej oblasti, ktorú reprezentuje bod G. (Pripojené čísla tu určujú pohyby satelitov a pozemskej oblasti). Keďže G sa pohybuje od G1 ku G3, kvôli zemskej rotácii, satelit, satelit A vykoná pohyb od A1 do A3 cez apogeum A2.



Obr. 2.14 Formácia troch satelitov, zobrazenie v polárnych súradniciach

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 odchýlenie 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. Satelit je sledovaný z mobilnej antény so širokou smerovosťou, hoci bude zaujímavé ak satelit spôsobí zmenu 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/s) 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

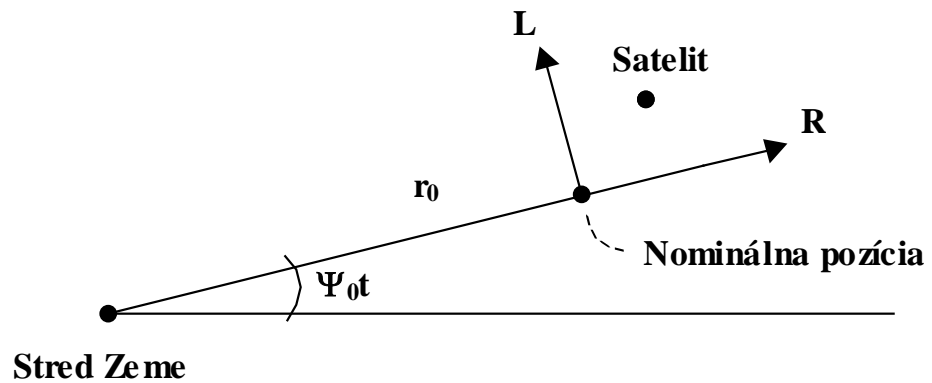
$$\ddot{R} - (r_0 + R)(\Psi_0 + \dot{L}/r_0)^2 = -\mu/(r_0 + R)^2 \quad (2.33)$$

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 uvážime 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

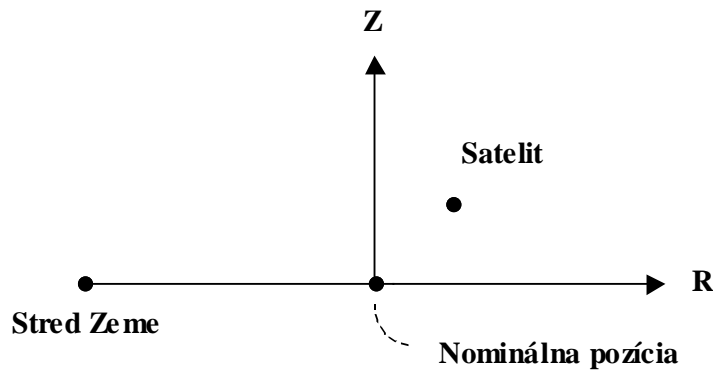
$$\ddot{Z} + \Psi_0^2 Z = 0 \quad (2.36)$$

Pohyb satelitu v častiach (R,L,Z) je daný rovnicami (2.34 – 36) ako problém dvoch telies (two-body problem). Ak uvážime vynútené rušenie v zložkách (R,L,Z) platia pre pohyb tieto rovnice. (Pôvodne boli tieto rovnice odvodené pre spojitú kontrolu a riadenie dvoch satelitov – viď 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 odchýlený od synchronného polomera (2.40). E_x a E_y určujú eliptický pohyb v rovine (R,L) , vzťahnuté k malej excentricite orbity – vidíme ako polomer R osciluje (2.40) a porovnaním s (2.30), nájdeme 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 odchyli 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 $2\sqrt{E2x + E2y} < B$. 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:

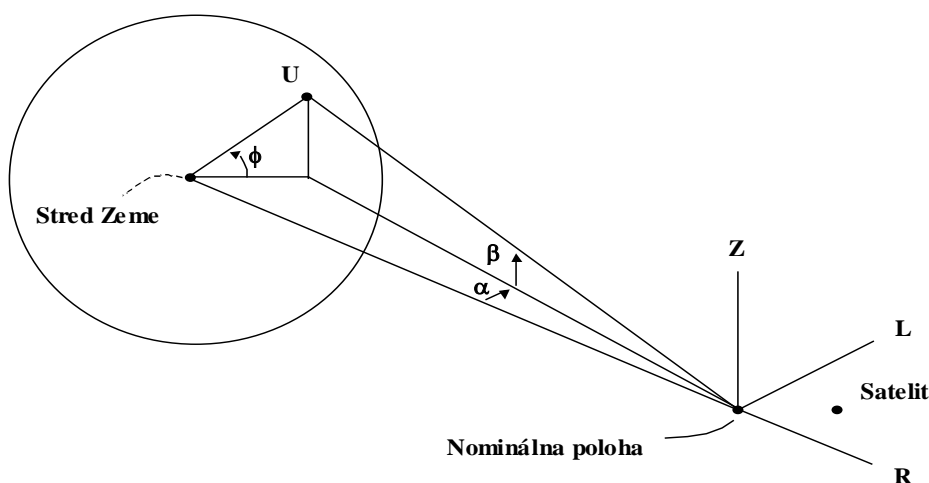
$$\rho = \rho_0 + c_R R + c_L L + c_Z Z$$

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

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 e 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 ľubovoľným 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. Ukážeme 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 s t_p – čas prechodu perigeom. Čas je meraný od ľubovoľne zvoleného začiatku $t = 0$.

Najprv vypočítame periódu 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

Konvertujme (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:

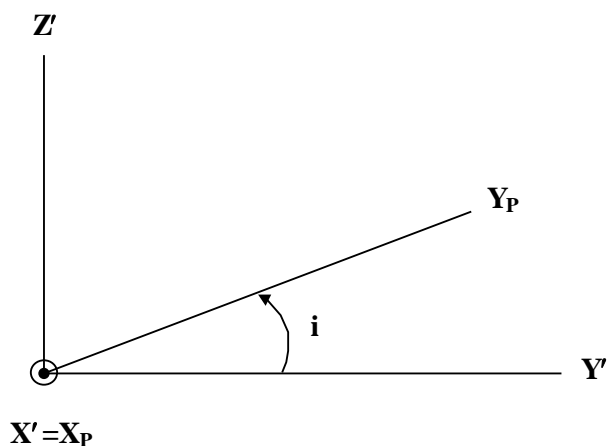
$$X' = X_p, \quad Y' = Y_p \cos i, \quad Z' = Y_p \sin i$$

Krok 3

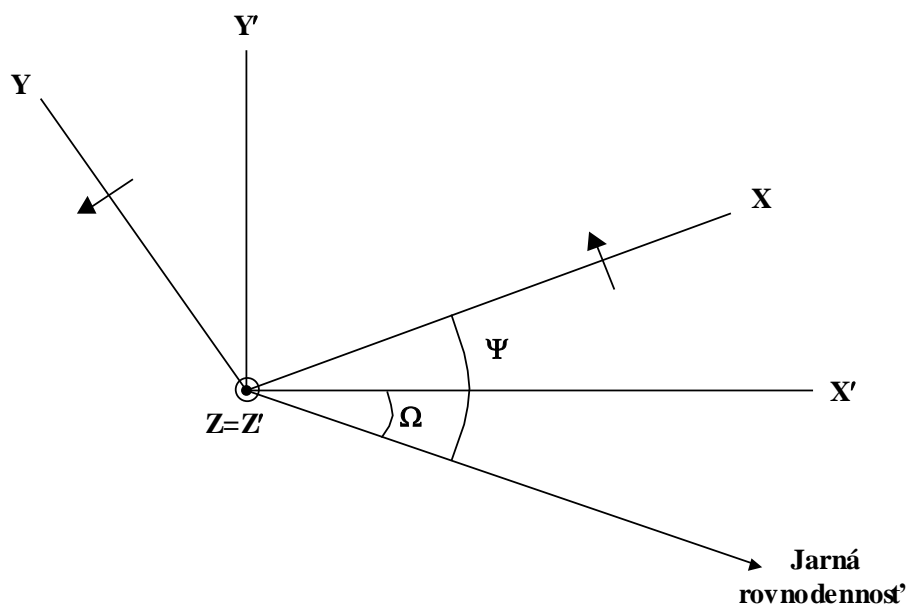
Konvertujeme (X', Y', Z') na pevné súradnice Zeme (X, Y, Z) – (obr. 2.19). Osi X a Y sú pevné vzhľadom na Zem, takže rovina (X, Y) je rovina rovníka. Os Z je totožná s osou Z' a rovina (X, Y) obsahuje Greenwichský poludník. Označme ψ ako rotačný uhol Zeme, ktorý je orientovaným uhlom osi X meraným od 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 / s] 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 synchronný 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 používateľa 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, obvyčajne niekoľko sto metrov.

Krok 6

Keď sme takto zvolili smer kosínusov, vypočítame:

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

kde azimuth 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

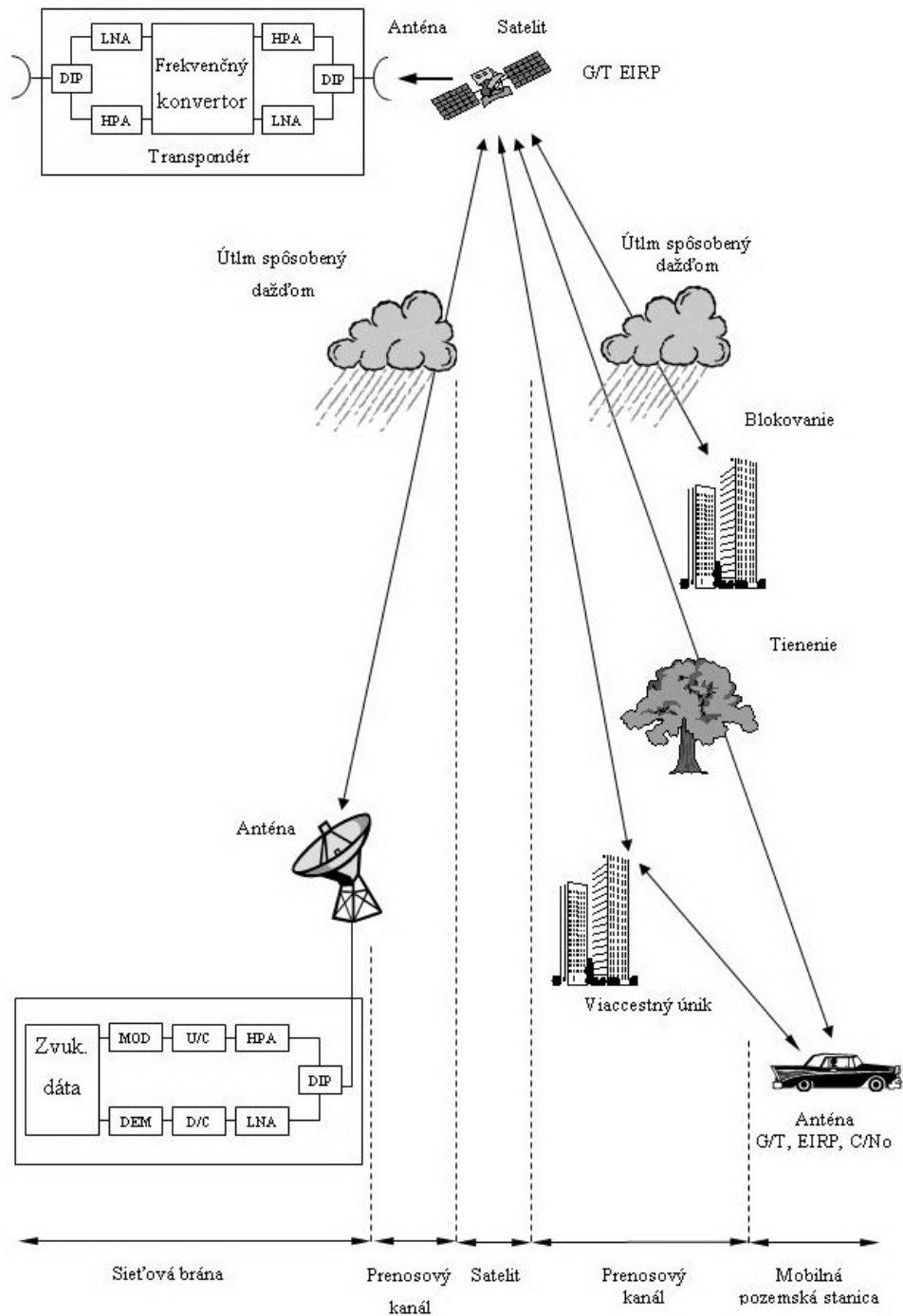
3 Energetická bilancia satelitného spoja

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) konvertorov, výkonového zasilňovača (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.

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY



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 hodnotia prijímacie a vysielacie schopnosti sieťovej pozemskej brány (Earth gateway) 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 [Ω] pri absolútnej teplote T [K] daná vzťahom podľa Nyquista [1].

$$U_n = \sqrt{4kTRB} \quad [\text{V}] \quad (3.1)$$

kde k je Boltzmanova konštanta [1.38×10^{-23} Watt/s/K] a B je šírka frekvenčného pásma [Hz], v ktorom je šumové napätie merané. Je dobre známe, že maximálny výkon, môže dodávať zdroj s definovanou 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

Vyhodenie 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:

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

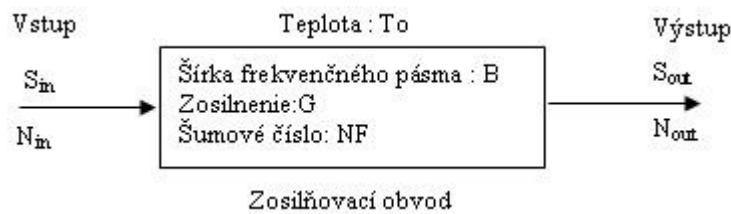
2. Ak $NF = 4 \text{ dB}$ a $T_0 = 290 \text{ K}$, T_{in} sa dá vypočítať podľa vzťahu (3.7) nasledovným spôsobom:

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

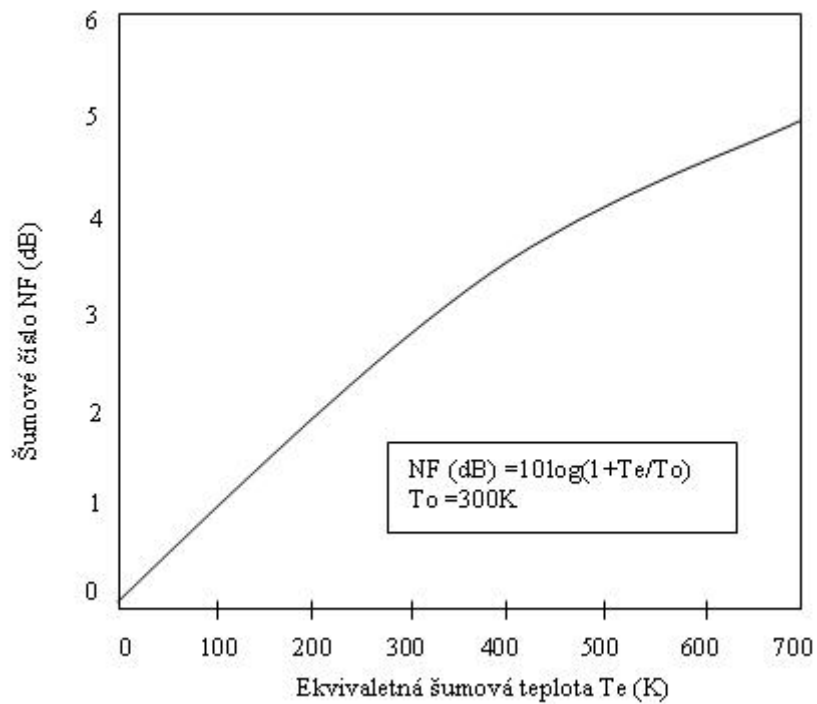
Obrázok 3.3 ukazuje vzťah medzi šumovými číslami v decibeloch a ekvivalentnými šumovými teplotami pri $T_0 = 300 \text{ K}$.

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:

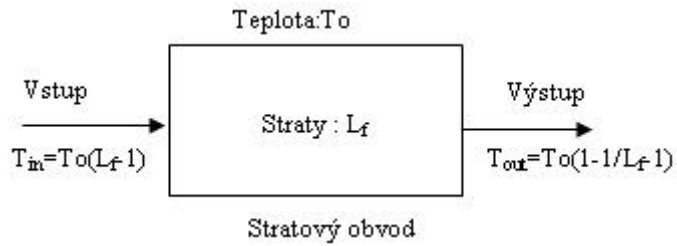
$$T_{in} = T_0(NF - 1)$$



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

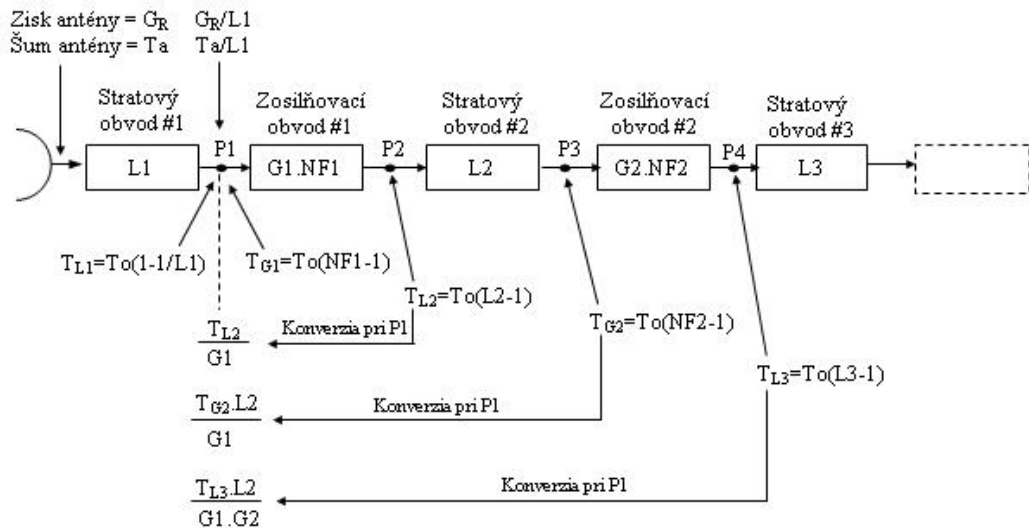
Ak obvod má stratu 3 dB a $T_0=300$ K, ekvivalentná vstupná a výstupná šumová teplota sa dá vypočítať pomocou (3.9) a (3.10), nasledovným spôsobom:

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

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

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 anténou 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 P_1 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_{in} celého obvodu (prijímača) na vstupe P_1 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.

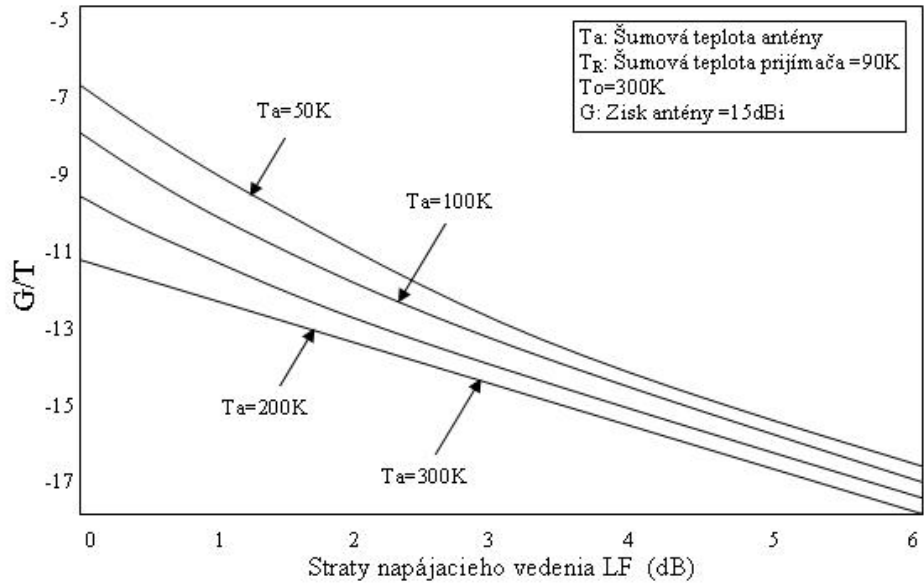
3.2.4 Účinnosť (G/T)

Čo sa týka antény, zisk G_R na prijímanej frekvencii a ekvivalentná vstupná šumová teplota T_a môžu byť označované ako $G_R/L_1 (=G_S)$ resp. T_a/L_1 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 systémoch. 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:

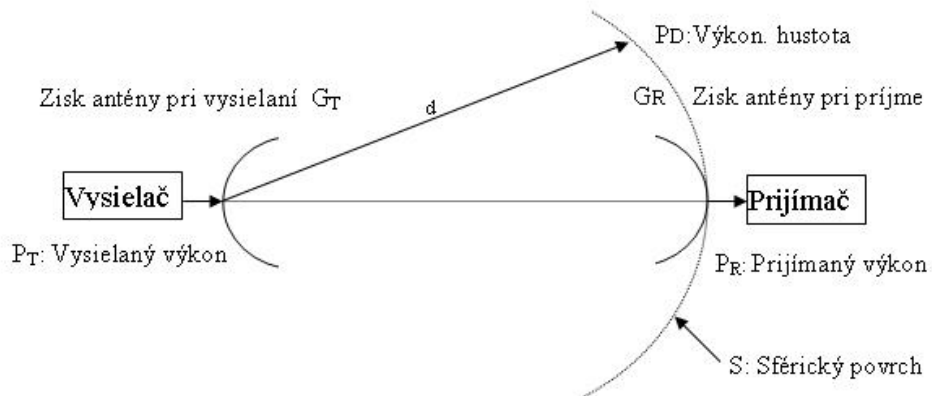
$$P_D = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.14)$$

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:

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

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

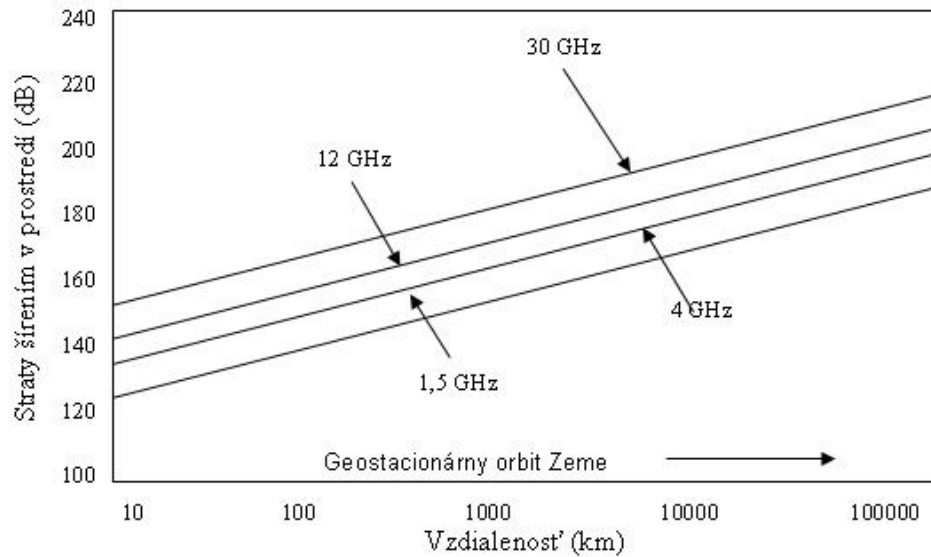
$$A \cdot \eta = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R \quad (3.19)$$

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:

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

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 (tlmenie) 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

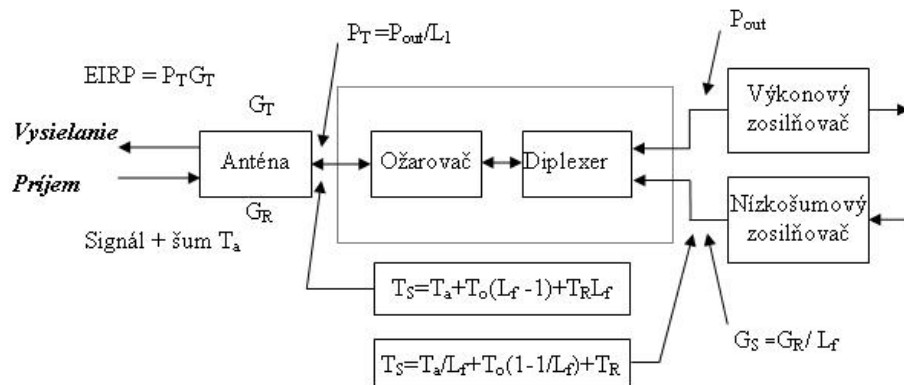
Prenosové straty vo voľnom priestore pri 1500 MHz z geostacionárneho satelitu na rovník tesne pod ním sú vypočítané nasledovným spôsobom:

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

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

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 (budiace) 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 prijíme a P_{out} a P_T znamenajú výstupný výkon HPA a vstupný výkon do antény.



Obr. 3.9 Blokový diagram RF stupňa pozemskej 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):

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

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

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:

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

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/N_0 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, $\epsilon=0.8$)	15.0 [dBi]	
Šumová teplota systému mobilnej pozemskej stanice (okolo 300K)	24.8 [dBK]	

C/N_0 sa dá vypočítať pomocou (3.21) nasledovným spôsobom:

$$C/N_0 = 0 + 21.7 - 187.2 + 15 - 24.8 + 228.6 = 53.3 \text{ [dBHz]}$$

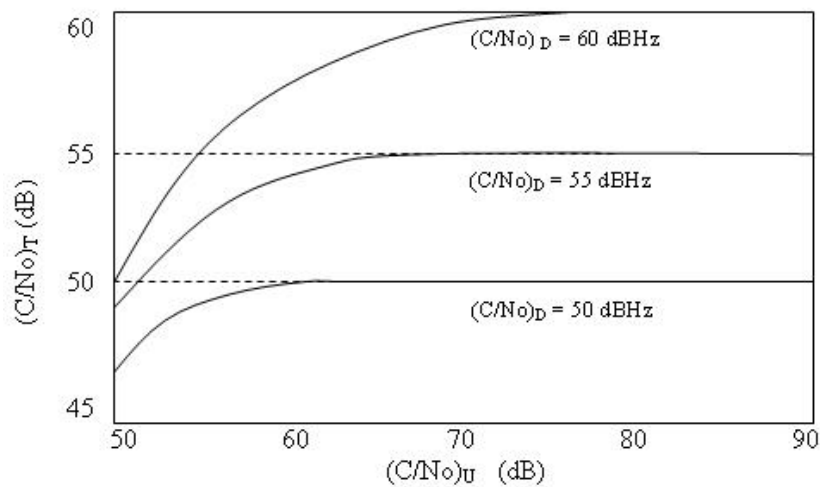
V predchádzajúcom texte sme uvažovali kvalitu kanála zostupného spoja a vzostupného spoja oddelene. Môžeme sa však spýtať aká je kvalita kanála zo základnej stanice k mobilnej pozemskej stanici cez satelit? Toto sa dá ľahko určiť ak vieme, že tepelný šum, ktorý je vytváraný vo vzostupnom a zostupnom 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 $(C/N_0)_T$ 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 akolvek 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 $(C/N_0)_T$ 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	60,7 [dBW]	
Straty šírením (6 GHz)	199,4 [dB]	(d = 37,270 km)
Zisk satelitnej antény	21,7 [dBi]	
Straty ožarovača	3,0 [dB]	

Uplink celkovo: $C = 60.7 - 199.4 + 21.7 - 3.0 = -120.0$ [dBW]

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

* uplink $(C/N_0)_U = -120,0 + 203,8 = 83,8$ [dBHz]

Od satelitu k AES downlink

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

Sledovanie odchýlky antény 0,5 [dB]

Straty ožarováním 3,0 [dB]

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/N_0) sa vypočíta ako :

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

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

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

<i>Z GES k satelitu (vzostupný spoj)</i> <i>Sieťová pozemská brána: Kašmír (140,7 E, 30,0 N)</i>		
HPA výstupný výkon	dBW	10,0
Straty ožarovaním	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 ožarovaním	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 ožarováním	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

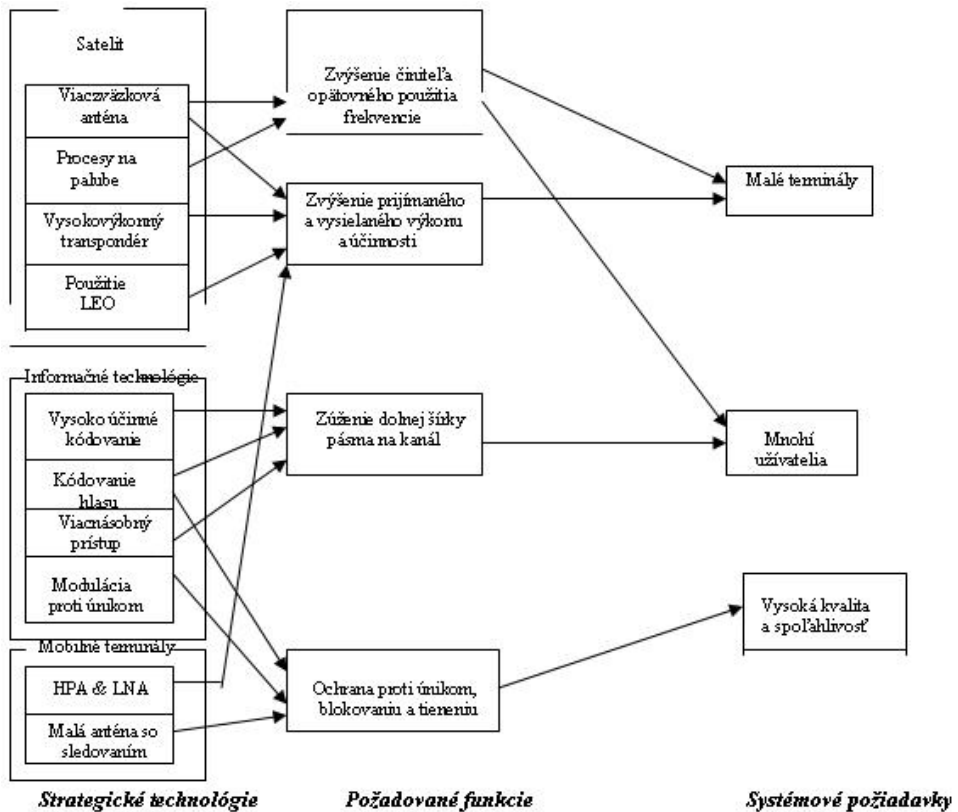
Obrázok 3.11 ukazuje vzájomné vzťahy medzi systémovými požiadavkami a strategickými technológiami mobilných satelitných komunikácií.

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 vysielat'

SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

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 z 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 spôsobené odrazmi od morskej hladiny ovplyvňujú kvalitu komunikácie. V pozemských 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 súčasti 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 výkonovým 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 elektróniek s postupnou vlnou (TWTA) a im prislúchajúcim napájacim zdrojom. Pred každým TWTA je zaradený budič/linearizátor na 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 obvodu pre zlučovanie výkonu generátora. Celkový výkon je vedený cez pásmový priepust do antény vysielajúcej v L pásme.

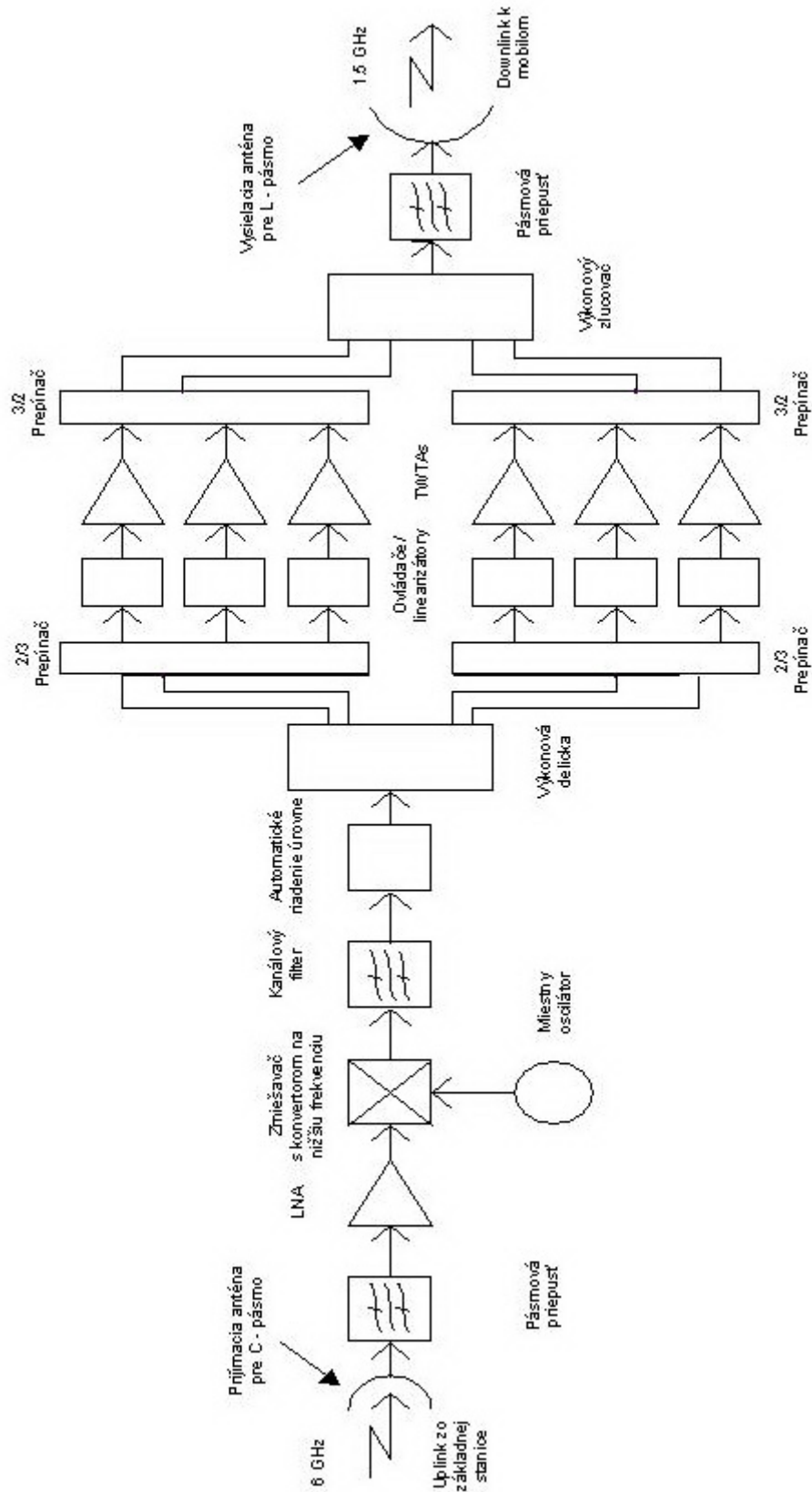
3.6.2 L/C transpondéry

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 výkonovým zosilňovačom.

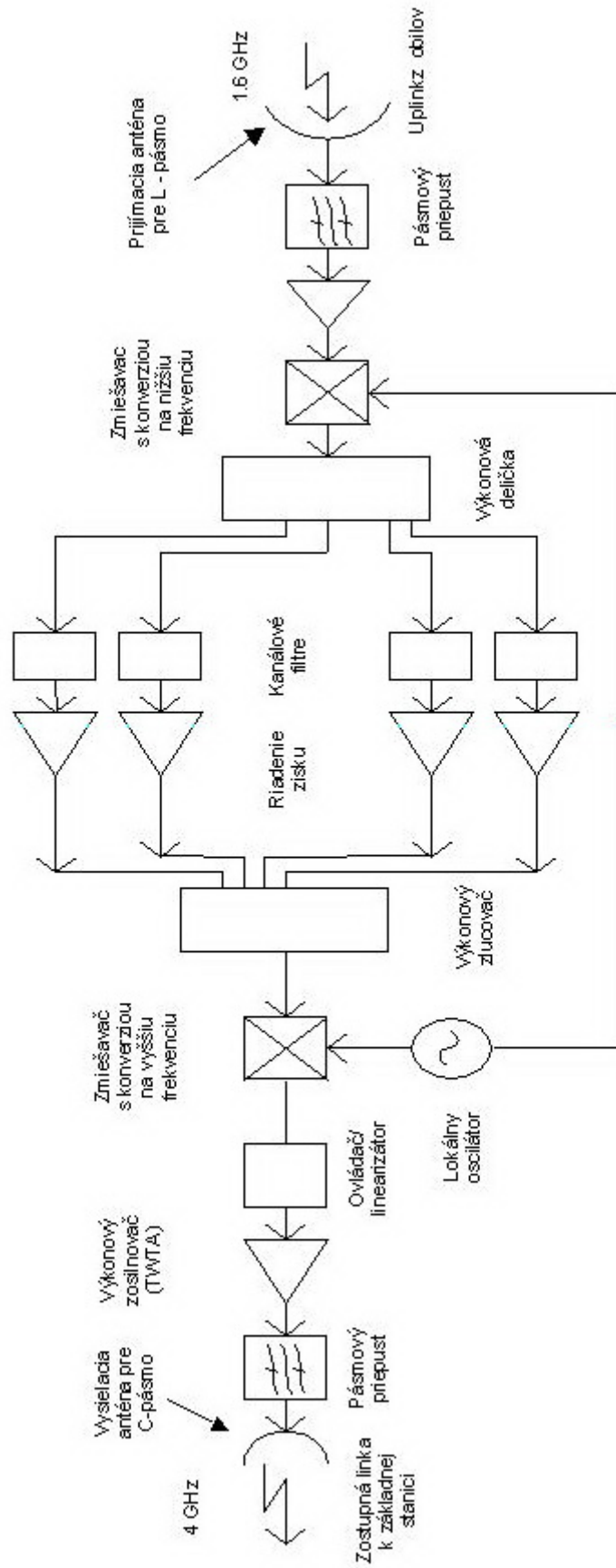
SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

Signály 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 zmenšovanie mobilných terminálov, využívanie vreckových prijímačov správ na lodiach, v lietadlách a v pozemských dopravných prostriedkoch. Tento satelit dodáva 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 komunikačnými systémami. Interferencia je klasifikovaná do šiestich typov takto:

Medzi satelitom a satelitnými systémami

1. Satelit 1 k pozemskej stanici 2
2. Satelit 1 od pozemskej 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 vysielačnej 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 vysielačnej 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 S2 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.

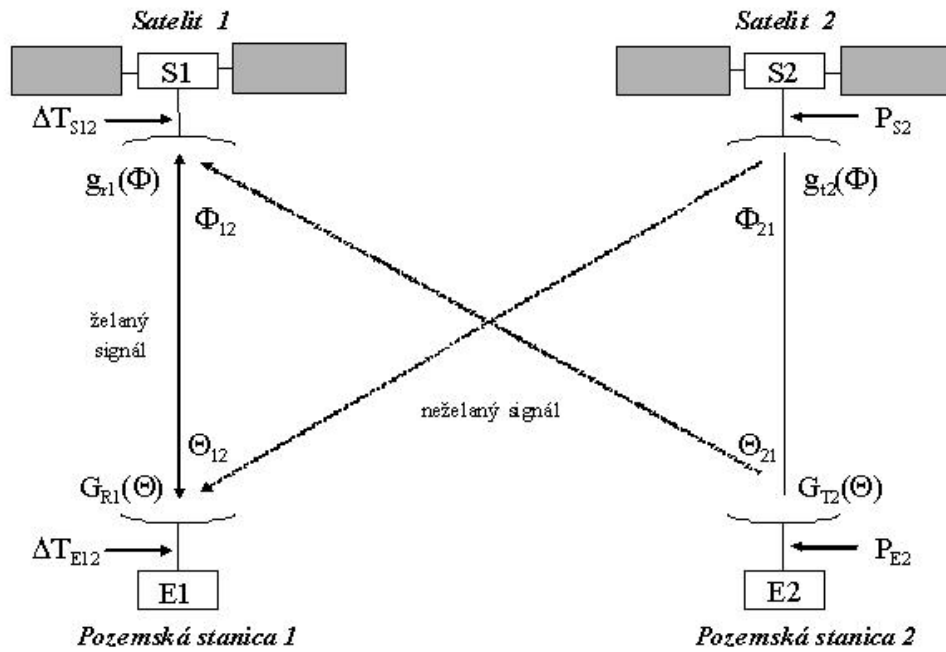
SATELITNÉ TECHNOLOGIE A SLUŽBY

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

Typ stanice	Obmedzenia			Poznámky
Terestriálna stanica	ERP >1GHz 1-10 GHz 10-15GHz 1-10 GHz > 10GHz	55dBW 35dBW 45dBW 13dBW 10dBW	max. hodnota A > 2 stupne A > 1,5 stupňa max. hodnota	A = uhol k satelitu s prihliadnutím smerovosti antény
vstupný výkon	Frek. pásmo	Elevačný uhol (stupne)		Jednotka
výkonová hustota toku na Zemi	1.69-1.7 GHz 1.525-2.5 GHz 2.5-2.69 GHz 3.4-7.75 GHz	0<E<5 -133 -154	5<E<25 -133 -155+0.5(E-5)	dBW/m ² /1.5MHz dBW/m ² /4kHz dBW/m ² /4kHz dBW/m ² /4kHz
Vesmírna stanica (GEO Satelit)	8.025-11.7 GHz 12.2-12.75 GHz 17.7-19.7 GHz 31.0-40.5 GHz	-150 -148 -115 -115	-150+0.5(E-5) -148+0.5(E-5) -115+0.5(E-5) -115+0.5(E-5)	dBW/m ² /4kHz dBW/m ² /4kHz dBW/m ² /1Mhz dBW/m ² /1Mhz
Udržiavacia pozícia	tolerancia +/- 0.1 stupňa tolerancia +/- 0.5 stupňa v rozsahu max. a nominálnej hodnoty (0.3 stupňa, 10% HPBW)			meteorológia výskumná činnosť rozhlas meteorológia výskum prieskum Zeme fixné prieskum Zeme výskum
presnosť smeru lúča	Experimentálny satelit			
prerušenie prenosu	HPBW - half-power beam width			

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

Typ stanice	Obmedzenia	Poznamky
obmedzenia EIRP	1-15 GHz 40 dB W/4 kHz 40+3E dB W/4kHz >15 GHz 64 dB W/1 MHz 64+3E dB W/1 MHz 3 stupne	E < 0 st. E = elevačný uhol k satelitnu 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 $\phi_m = -G_1 + 20\lambda \text{SQRT}(G_{\text{max}})/D$
D/ λ > 100 (max. zisk > asi 48 dB) $G(\phi) = G_{\text{max}} - 2.5 \times 10^{-3} (D \phi / \lambda)^2$ (dBi) $G(\phi) = G_1$ (dBi) $G(\phi) = 32 - 25 \log(\phi)$ (dBi) $G(\phi) = -10$ (dBi)	vyžarovacia charakt. Antény	0 < ϕ < ϕ_m $\phi_r = 15.85(D/\lambda) - 0.6$ $\phi_m < \phi < \phi_r$ $\phi_r < \phi < 48$ 48 < $\phi < 180$
D/ λ < 100 (max. zisk < asi 48 dB) $G(\phi) = G_{\text{max}} - 2.5 \times 10^{-3} (D \phi / \lambda)^2$ (dBi) $G(\phi) = G_1$ (dBi) $G(\phi) = 52 - 10 \log(D/\lambda) - 25 \log(\phi)$ (dBi) $G(\phi) = 10 - 10 \log(D/\lambda)$ (dBi)		



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)

Pozemská stanica 1 (E1)

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

System 2

Satelit 2 (S2)

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

Pozemská 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:

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

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

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

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 medzi dvoma systémami musí byť vykonaná frekvenčná koordinácia.

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.