

Sistemas de Comunicação por Satélite

- **Conceitos básicos**
- **Órbita dos satélites**
- **Ligações por satélite**
- **Acesso a satélites**
- **Segmento do satélite**
- **Segmento terrestre**
- **Séries de satélites**

Mário Jorge M Leitão

Neste capítulo faz-se o estudo de sistemas de comunicação por satélite, a maioria dos quais, operando em frequências de microondas, assumem a configuração de um feixe hertziano com um único repetidor a bordo de um satélite.

Tendo em conta esta semelhança com os feixes hertzianos, a abordagem destacará essencialmente os aspectos marcantes dos sistemas de comunicação por satélite que os distinguem dos feixes hertzianos terrestres.

Conceitos básicos

Princípios do sistema

- ligações hertzianas com um repetidor (transpositor) a bordo de um satélite no espaço
- a órbita do satélite é uma elipse (caso geral) em que a Terra está num dos focos
- aplicação mais importante: órbita circular equatorial geoestacionária (altitude = 36 000 km)

Classificação dos satélites

- em função da aplicação
- em função da utilização



Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Nas aplicações de telecomunicações concorrentes com sistemas terrestres, os satélites ainda encontram justificação pela sua capacidade ímpar de disponibilizar rapidamente imensas áreas de cobertura, o que é particularmente interessante nos seguintes casos:

- acesso a zonas do globo com baixas densidades populacionais ou níveis baixos de desenvolvimento, que não justificam meios terrestres;
- difusão de um elevado número de programas para um universo alargado de utilizadores individuais.

Conceitos básicos

Frequências atribuídas a satélites de telecomunicações

Bandas mais utilizadas

- frequências ascendente e descendente afastadas
- frequência ascendente superior à descendente

reduzem-se as interferências

ruído captado pelo satélite é elevado
maximiza-se o ganho de recepção

Bandas atribuídas a sistemas por satélite				
Serviço	Banda	Frequências	Ligaçāo ascendente	Ligaçāo descendente
Fixo	C	6 / 4 GHz	5,925 - 6,425 GHz	3,700 - 4,200 GHz
	Ku	14 / 11 GHz	14,000 - 14,800 GHz	10,700 - 11,700 GHz
	Ka	30 / 20 GHz	27,500 - 31,000 GHz	18,100 - 21,200 GHz
Difusão	Ku	18 / 12 GHz	17,300 - 18,100 GHz	11,700 - 12,500 GHz
Móvel	L	1,6 GHz	Atribuições diversas	
	S	2,5 GHz		

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

As bandas de frequências utilizadas em sistemas de comunicação por satélite caem nas bandas de UHF (*Ultra High Frequency*: 300 MHz - 3 GHz) e SHF (*Super High Frequency*: 3 GHz - 30 GHz), tendo designações específicas algo confusas herdadas quer das bandas dos sistemas de radar, quer das bandas dos sistemas de recepção de TV por satélite.

Bandas de sistemas de radar			
Banda L	1	-	2 GHz
Banda S	2	-	4 GHz
Banda C	4	-	8 GHz
Banda X	8	-	12 GHz
Banda Ku	12	-	18 GHz
Banda K	18	-	27 GHz
Banda Ka	27	-	40 GHz

Bandas de sistemas de recepção de TV por satélite			
Banda S	1,7	-	3 GHz
Banda C	3,7	-	4,2 GHz
Banda Ku	10,9	-	12,75 GHz
Banda Ka	27	-	40 GHz

Conceitos básicos

Evolução dos satélites de telecomunicações

• Marcos históricos

Acontecimentos pioneiros

1945	A. C. Clarke	Ideia original da órbita geoestacionária
1957	Sputnik 01	Satélite artificial (URSS)
1958	Score	Satélite de telecomunicações (store-and-forward)
1959	Explorer 07	Satélite com sub-sistema meteorológico
1962	Echo 1	Satélite passivo de comunicações telefónicas e difusão de TV
1962	Telstar 1	Satélite activo (órbita baixa de 158 min.; banda 6/4 GHz)
1964	Syncom 3	Satélite geoestacionário de comunicações
1974	ATS 6	Recepção individual de TV
1980	Intelsat 5	Emissão de sinais de difusão de TV por estações móveis
1984	SMM	Satélite reparado em órbita pelo Space Shuttle

Serviços comerciais

1965	Intelsat 1	Serviço fixo e de difusão de TV (satélite geoestacionário)
1972	Anik A1	Serviço de comunicações nacionais (Canadá)
1985	(diversos)	Serviço móvel (diversos transpositores em satélites geoestacionários)
1989	Astra 1A	Serviço de difusão de TV orientado à recepção individual
1998	Iridium	Serviço móvel com terminais de bolso (satélites de baixa altitude)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

O historial das comunicações por satélite é já longo, podendo destacar-se alguns saltos qualitativos que conduziram aos sistemas mais modernos actualmente em operação.

Ao longo do estudo, serão abordados muitos outros aspectos, realçando-se a perspectiva evolutiva.

Conceitos básicos

Evolução dos satélites de telecomunicações: exemplo da série INTELSAT

Satélite	INTELSAT 1	INTELSAT 2	INTELSAT 3	INTELSAT 4	INTELSAT 5
Período de lançamento	1965	1966 - 1967	1968-1970	1971-1975	1980-1989
Tempo de vida previsto	1,5 anos	3 anos	5 anos	7 anos	7 anos
Nº satélites	lançados	1	4	8	14
	operacionais	0	0	0	0
Estabilização	rotação	rotação	rotação	rotação	3 eixos
Dimensões	diam = 0,7 m alt = 0,6 m	diam = 1,4 m alt = 0,7 m	diam = 1,4 m alt = 2,0 m	diam = 2,4 m alt = 5,3 m	1,7×2,0×1,8 m painéis: 15,6 m
Peso em órbita	38 kg	86 kg	151 kg	700 kg	1 040 kg
Potência DC (fim de vida)	33 W	75 W	125 W	400 W	1 300 W
Banda	C	C	C	C	C / Pol. Cire Ku / Pol. Lin
Capacidade	240 canais telef. ou 2 canais TV	240 canais telef. ou 2 canais TV	1 500 canais telef. e 2 canais TV	4 000 canais telef. e 2 canais TV	12 000 canais telef. e 2 canais TV

Notas: características indicadas dizem respeito à versão base de cada tipo;
para alguns tipos, foram construídos satélites com características ligeiramente diferentes da versão base.

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

O exemplo da série de satélites operados pela Intelsat é revelador dos enormes avanços nesta área, que resultaram numa enorme capacidade das gerações mais recentes, com variadas aplicações em termos de serviços.

Conceitos básicos

Evolução dos satélites de telecomunicações: exemplo da série INTELSAT					
Satélite	INTELSAT 6	INTELSAT 7	INTELSAT 8	INTELSAT 9	INTELSAT 18
Período de lançamento	1989-1991	1993-1996	1997-1998	2001-2003	2011
Tempo de vida previsto	13 anos	10 - 15 anos	10 - 15 anos	10 - 15 anos	>17 anos
Nº satélites	lançados	5	9	6	7
	operacionais	0	4	6	1
Estabilização	rotação	3 eixos	3 eixos	3 eixos	3 eixos
Dimensões	diam = 3,6 m alt = 6,4 m	2,4x2,2x2,7 m painéis: 21,8 m	2,5x2,2x3,4 m painéis: 10,8 m	2,8x3,5x5,6 m painéis: 31 m	1,75x1,7x1,8 m
Peso em órbita	2 560 kg	1 800 kg	1 600 kg	1 900 kg	3 200 kg
Potência DC (fim de vida)	2 100 W	3 650 W	4 760 W	7 600 W	6 800 W
Banda	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin	C / Pol. Circ Ku / Pol. Lin
Capacidade	24 000 canais telef. e 3 canais TV	18 000 canais telef. e 3 canais TV	22 500 canais telef. e 3 canais TV	C / 44x36 MHz Ku / 12x36 MHz	C / 8x36 MHz 16x72 MHz Ku / 12x72 MHz

Notas: características indicadas dizem respeito à versão base de cada tipo;
para alguns tipos, foram construídos satélites com características ligeiramente diferentes da versão base.

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A partir da série 9, que correspondeu a 7 satélites o último dos quais lançado em 2003, a Intelsat passou a designar cada satélite por um número sequencial. O último satélite a ser lançado foi o Intelsat 18, estando em planeamento o Intelsat 27.

Para a cobertura do continente americano, a Intelsat dispõe de uma outra série de satélites designada de Galaxy.

Conceitos básicos

Evolução dos satélites de telecomunicações

• Situação actual

Satélites lançados e operacionais

- alguns milhares de satélites lançados desde 1980 (muito lixo espacial...)
- algumas centenas de satélites operacionais

Organizações responsáveis

- lançamento de satélites de órbita alta <ul style="list-style-type: none;"> - URSS ... Molniya (1960), Proton (1967), Zenit (1999)
 - EUA Atlas (1962), Titan (1965), Delta (1972), STS-Shuttle (1981)
 - China Longa Marcha (1975)
 - Europa Ariane (1979)
 - Japão NASDA (1981)
- operação de sistemas <ul style="list-style-type: none;">- operadores específicos internacionais: Intelsat, Inmarsat, Eutelsat, Astra, Iridium
- operadores tradicionais de redes de telecomunicações
- regulamentação
 - organismos internacionais UIT-R (Sector de Radiocomunicações)
 - organismos nacionais Portugal - Anacom

primeiro
lançamento do
veículo

tendências gerais:
globalização
privatização

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

O modelo de exploração dos sistemas de comunicação por satélite assume duas formas:

- os serviços de satélite são disponibilizados aos utilizadores finais directamente pelos operadores dos próprios satélites, nomeadamente nos casos de redes privativas, difusão directa de TV por satélite e comunicações móveis;
- os serviços de satélite são disponibilizados a operadores genéricos de serviços de telecomunicações, os quais alugam capacidade em satélites aos operadores dos satélites - é o caso da utilização de satélites no transporte da rede fixa ou em aplicações de difusão de televisão, a montante da rede terrestre de distribuição (recolha de notícias, intercâmbio de programas, etc.).

Conceitos básicos

Aspectos críticos de engenharia

Lançamento dos satélites <

- veículos de transporte para as órbitas altas
- posicionamento inicial do satélite na órbita correcta

taxa de falhas elevada

Problemas da órbita do satélite

- controlo permanente de trajectória e atitude do satélite
- seguimento do satélite pelas antenas das estações terrestres

Condicionantes do sub-sistema do satélite

- dimensão física
- peso total em órbita
- alimentação primária apenas por painéis solares
- operação num meio ambiente agressivo
 - ciclo térmico severo durante eclipses
 - radiação solar elevada
 - exposição a micro-partículas e meteoritos
- elevada fiabilidade (*sem* manutenção) <

manutenção possível mas com custos exorbitantes

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A área das comunicações por satélite envolve um conjunto muito vasto de vertentes tecnológicas de natureza muito diferente.

Nesta disciplina, limitar-nos-emos a identificar os principais desafios em termos de engenharia e o impacto nos sistemas de comunicações de alguns compromissos que têm de ser assumidos.

Conceitos básicos

Aspectos críticos de engenharia

Condicionantes do trajecto

- perdas elevadas em espaço livre
- efeitos de propagação acentuados (sobretudo acima de 10 GHz ou com baixas elevações)

Necessidade de optimização da relação portadora-ruído

- ligação terra-satélite
 - EIRP elevados das estações terrestres
- ligação satélite-terra
 - EIRP do satélite configurado para a cobertura pretendida
 - receptores terrestres de muito baixo ruído

satélite capta ruído da Terra "quente" e tem limitações de dimensão das antenas

satélite tem limitações de potência emitida

Requisitos especiais de processamento de sinal

- modulações complexas
- esquemas de detecção e correcção de erros

Requisitos especiais de operação do sistema

- suporte de acesso múltiplo ao satélite por parte de diversas estações terrestres
- reconfiguração dos recursos radioeléctricos do satélite

Como discutiremos adiante mais em detalhe, as ligações terra-satélite e satélite-terra operam em condições diversas, resultante de diferenças no ruído captado pelas antenas de recepção e de diversas limitações a bordo do satélite.

Além disso, e ao contrário dos feixes hertzianos terrestres, a maioria dos sistemas por satélite suporta a possibilidade de vários utilizadores partilharem os mesmos recursos de satélite - o chamado acesso múltiplo, cujas técnicas serão igualmente abordadas neste capítulo.

Órbita dos satélites

Tipos de órbitas

GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*): órbita circular equatorial geosíncrona

- período de revolução: 23 h 56 m 4,091 s
- altitude média: 35 786 km ($r_S - r_T = 42\ 164 - 6\ 378$)

LEO (*Low Earth Orbit*): órbita circular de baixa altitude

- altitude típica: 500 - 1 500 km
- período de revolução: 1h 30m - 2h

caso notável
órbita polar

MEO (*Medium Earth Orbit*): órbita circular de altitude média

- altitude típica: 10 400 km
- período de revolução: 6 horas

caso notável
órb. polar
há outras órbitas
utilizadas

Órbitas circulares

$$r_S = \left(\frac{GM T^2}{4\pi^2} \right)^{1/3} \text{ (m)}$$

$$r_S = 2,161378 \times 10^4 T^{2/3} \text{ (m)}$$

r_S - raio da órbita

T - período da órbita

$GM = 3,9861352 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}$

HEO (*Highly Elliptical Orbit*): órbita fortemente elíptica

- órbita elíptica inclinada
- perigeu de baixa altitude

caso notável: órbita Molniya
perigeu: 1 000 km alt. apogeu: 39 000 km alt.
período: 12 horas inclinação: 63,4 °

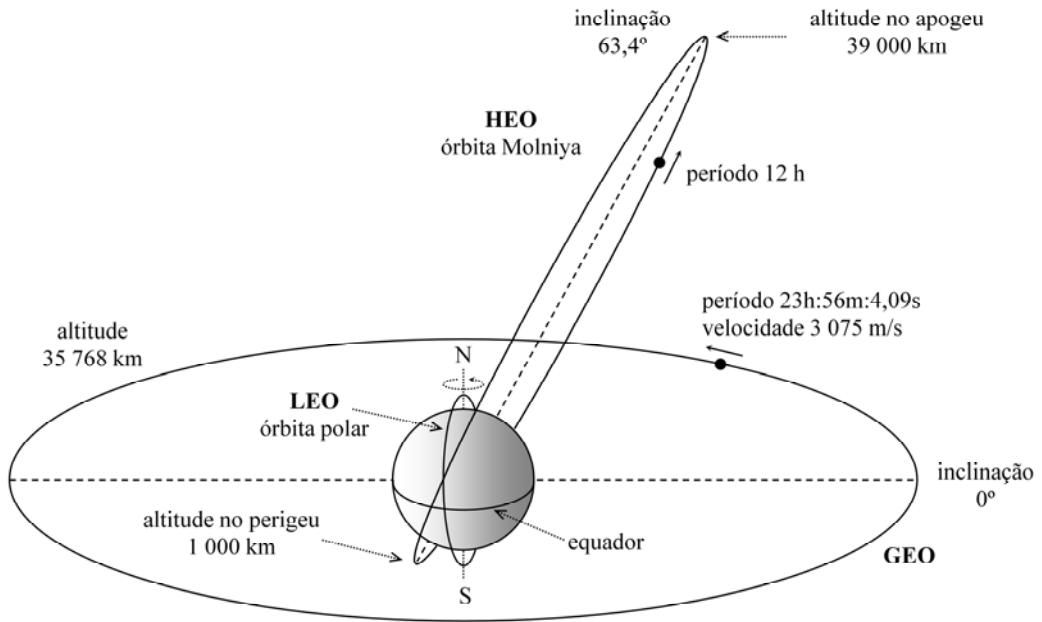
Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Estas órbitas têm como principais vantagens:

- GEO: o satélite mantém-se fixo em relação à Terra;
- LEO: o satélite está a uma distância relativamente curta;
- MEO: o satélite está a uma distância intermédia entre GEO e LEO, permanecendo em visibilidade durante mais tempo do que em LEO;
- HEO: em baixas latitudes, o satélite apresenta-se próximo do zénite durante um período de tempo apreciável.

Órbita dos satélites



Principais órbitas de satélites

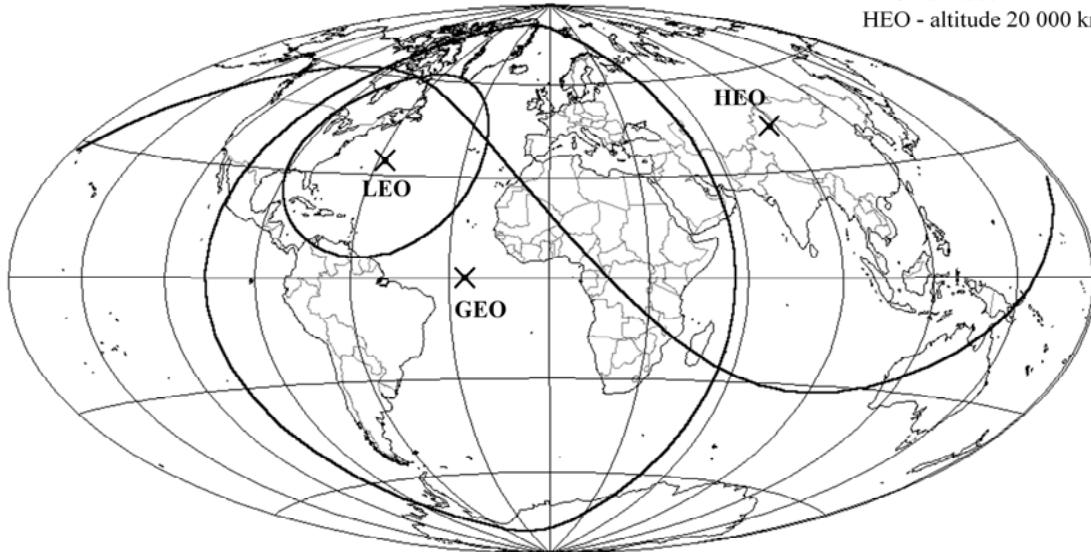
Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Uma visualização dinâmica destas órbitas pode ser obtida através de programas de computador, como por exemplo Nova e Logsat.

Órbita dos satélites

GEO - altitude 36 000 km
LEO - altitude 850 km
HEO - altitude 20 000 km



Cobertura terrestre de satélites com diversas órbitas

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Em virtude das altitudes que os satélites atingem nas diversas órbitas, assim teremos coberturas variáveis: entre relativamente reduzidas para a órbita LEO, até cerca de meio globo para a órbita GEO e igualmente para a órbita HEO, quando o satélite se encontra no apogeu.

Na figura, as cruzes que assinalam os satélites indicam o ponto sub-satélite, isto é, a intersecção com a superfície da Terra do segmento que une o centro da Terra e o satélite.

Órbita dos satélites



Trajectória terrestre de um satélite com órbita fortemente elíptica (HEO) Molniya

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A trajectória terrestre de um satélite define-se pelo lugar geométrico dos pontos sub-satélite, ao longo do tempo.

No caso da órbita Molniya, a trajectória permanece cerca de 8 horas numa área relativamente reduzida na maior parte do período de 12 horas da órbita. Contudo, a mesma área do globo só tem a referida cobertura de 8 horas em cada 24 horas.

Órbita dos satélites

Características	Tipo de órbita			
	GEO	LEO (polar)	MEO	HEO (Molniya)
cobertura terrestre assegurada por cada satélite	1/2 - 1/3 da Terra pólos não cobertos	global ↑	global ↑	1/2 - 1/3 da Terra
tempo útil de passagem de cada satélite	ilimitado ↑	10 - 15 min	2 horas	8 horas ↑
necessidade de constelação para cobertura local permanente	não ↑	≥ 48 satélites (ex: 6 sat × 8 planos)	≥ 10 satélites (ex: 5 sat × 2 planos)	3 satélites
perdas em espaço livre (distância terra-satélite)	elevadas	reduzidas ↑	médias ↑	elevadas
atraso propagação (ida e retorno)	250 ms	5 - 7 ms (750 km) 10-25 ms (1 500 km)↑	70 - 100 ms	150-300 ms
efeito Doppler (velocidade radial)	muito reduzido ↑	médio	médio	elevado
elevação do satélite no ponto de recepção	grande junto do equador ↑	variável com passagem do satélite	variável com passagem do satélite	grande em latitudes intermédias ↑
seguimento do satélite	geralmente não necessário ↑	indispensável, excepto com antenas de feixe largo	indispensável, excepto com antenas de feixe largo	necessário, mas pouco complexo ↑

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A tabela caracteriza os principais parâmetros que permitem comparar as diversas órbitas de satélite, justificando as suas principais aplicações:

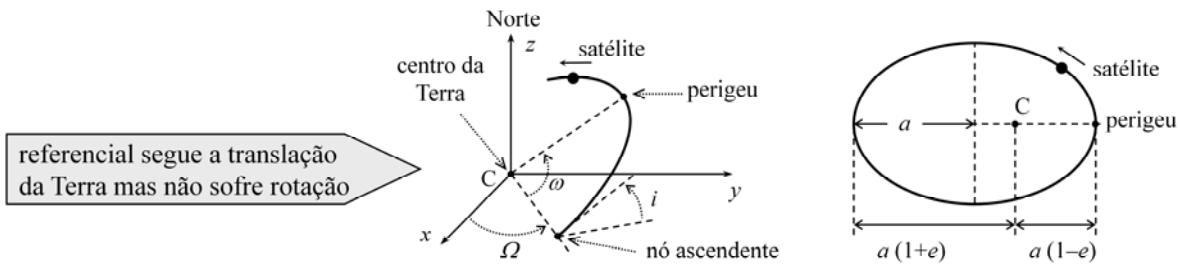
- GEO: comunicações fixas, difusão, meteorologia;
- LEO: comunicações móveis, radioamadorismo, observação da Terra e atmosfera;
- MEO: comunicações móveis, navegação;
- HEO: comunicações fixas.

Órbita dos satélites

Localização do satélite

Elementos orbitais

- especificam a órbita e a posição do satélite num qualquer instante
 - são necessários 6 parâmetros referidos a um sistema de eixos xyz centrado na Terra
- | | |
|----------|--|
| i | inclinação do plano da órbita relativamente ao plano equatorial xy |
| Ω | ângulo entre o eixo dos x e a intersecção plano da órbita - plano equatorial |
| ω | ângulo entre a intersecção plano da órbita - plano equatorial e o eixo maior da elipse |
| a | semi-eixo maior da elipse |
| e | excentricidade da elipse |
| t_p | tempo na passagem pelo perigeu |
- possível escolher outros conjuntos de 6 elementos independentes



Definição dos elementos orbitais

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Os elementos orbitais, ou keplerianos, exprimem as seguintes características da órbita:

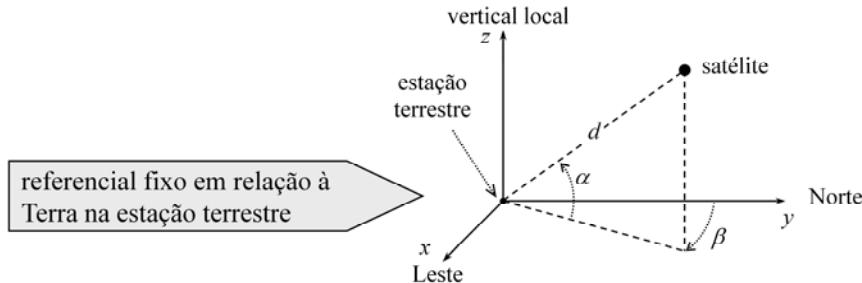
- i e Ω orientação do plano da elipse no sistema de eixos;
- ω orientação da elipse no plano da elipse;
- a e e geometria da elipse
- t_p referência temporal da passagem do satélite num ponto pré-definido

Órbita dos satélites

Localização do satélite

Parâmetros de visibilidade

- definem a posição do satélite num certo instante, em relação a uma dada estação terrestre
- são necessários três parâmetros referidos a um sistema de eixos xyz no ponto de recepção
 - α elevação ângulo entre o plano horizontal e a recta terra-satélite
 - β azimute ângulo entre o norte e a projecção horizontal da recta terra-satélite no plano horizontal (medido para leste)
- d distância estação terrestre-satélite



Parâmetros de visibilidade do satélite a partir de uma estação terrestre

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Numa estação terrestre, a elevação e o azimute são os parâmetros necessários para definir a pontaria das respectivas antenas de emissão ou recepção.

Órbita dos satélites

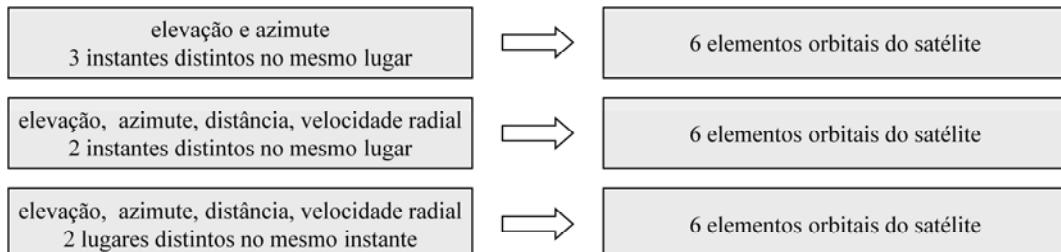
Localização do satélite

Relação entre os elementos orbitais e os parâmetros de visibilidade

- cálculo dos parâmetros de visibilidade num lugar



- determinação dos elementos orbitais



Ponto sub-satélite

- intersecção da recta centro da Terra-satélite com a superfície da Terra
- define a posição angular do satélite em relação à Terra

Os elementos orbitais, em conjunto com a latitude e longitude de um lugar, são correntemente utilizados para calcular os parâmetros de visibilidade nesse lugar. Contudo, estes cálculos são relativamente complexos, recorrendo-se normalmente a programas de computador, como os já referidos Nova e Logsat, utilizando valores actualizados dos elementos orbitais disponibilizados pelos operadores dos satélites, ou por organizações que têm a missão genérica de seguir satélites (operacionais ou não, destroços de lançadores e outro "lixo" espacial).

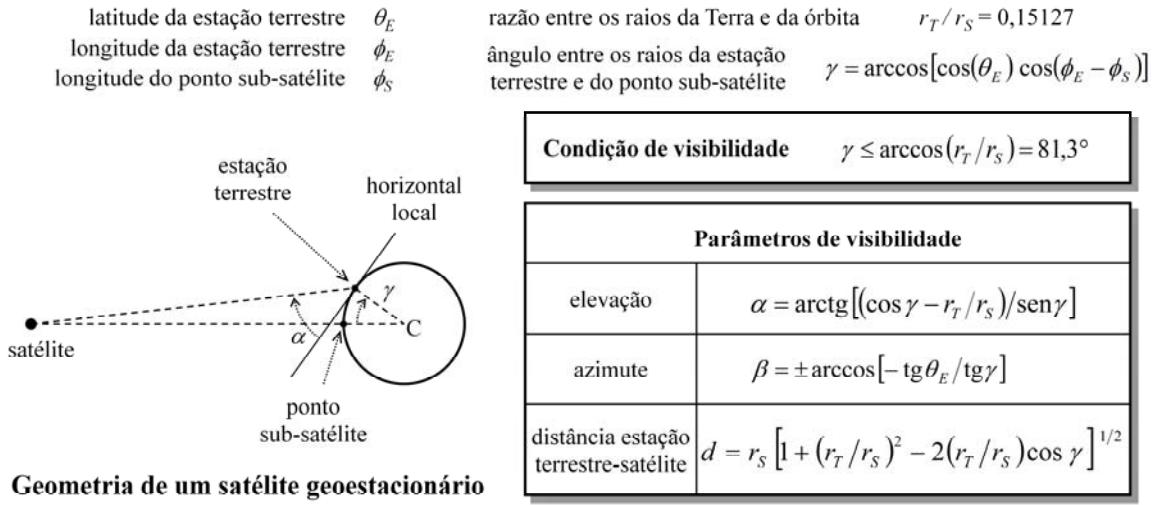
A operação inversa que permite determinar os elementos orbitais a partir de duas ou três medidas de parâmetros de visibilidade é normalmente efectuada pelas organizações que efectuam o seguimento de satélites, exigindo equipamentos mais ou menos sofisticados para medir os parâmetros de visibilidade com a precisão necessária.

Órbita dos satélites

Localização do satélite

Parâmetros de visibilidade de satélites geoestacionários

- o satélite é localizado apenas pela longitude do ponto sub-satélite
- os ângulos de visibilidade e a distância estação terrestre-satélite são facilmente calculados



Geometria de um satélite geoestacionário

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Num satélite geoestacionário, a latitude e longitude da estação terrestre e a longitude do ponto sub-satélite, são suficientes para determinar os parâmetros de visibilidade, se o satélite se mantiver na sua órbita nominal. Neste caso, a pontaria das antenas é fixa, sendo determinada pela elevação e azimute calculados pelas expressões acima indicadas.

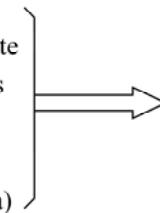
Porém, se ocorrerem desvios da órbita nominal, e especialmente no caso de serem utilizadas antenas com larguras de feixe muito pequenas, poderá ser necessário utilizar os elementos orbitais, devidamente actualizados, para determinar, ao longo do tempo, a elevação e o azimute correctos. Em alternativa, o sistema de recepção poderá utilizar um sistema de controlo de pontaria em malha fechada, que maximiza o nível do sinal recebido para obter a orientação da antena desejada.

Órbita dos satélites

Perturbações da órbita

Desvios da órbita em relação à elipse “kepleriana”

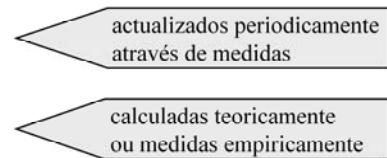
- a Terra não é uma esfera uniforme
- existem outras forças que actuam sobre o satélite
 - atracção da Lua, do Sol e de outros planetas
 - campo magnético terrestre
 - pressão da radiação solar
 - atrito na atmosfera (satélites de órbita baixa)



desvios de ciclo diário
desvios de ciclo longo
desvios aperiódicos

Previsão precisa da órbita

- elementos orbitais iniciais → válidos por poucos dias
 - instante t_0 : $(i_0, \Omega_0, \omega_0, a_0, e_0, t_{p0})$
- elementos orbitais calculados com correções de 1^a ordem
 - instante t_1 : $\left(i_0 + \frac{di}{dt}(t_1 - t_0), \Omega_0 + \frac{d\Omega}{dt}(t_1 - t_0), \dots \right)$
- elementos orbitais calculados com inclusão das forças perturbadoras mais importantes
 - previsão com 15 dias de avanço requer a consideração de cerca de 20 forças!



Na maioria das aplicações, nomeadamente na área das comunicações por satélite, os elementos orbitais, regularmente actualizados, permitem determinar a órbita de um satélite no presente e no futuro próximo.

Contudo, em aplicações que exijam grande precisão, poderá recorrer-se a cálculos em que os elementos orbitais são extrapolados para o futuro com correções de 1^a ordem.

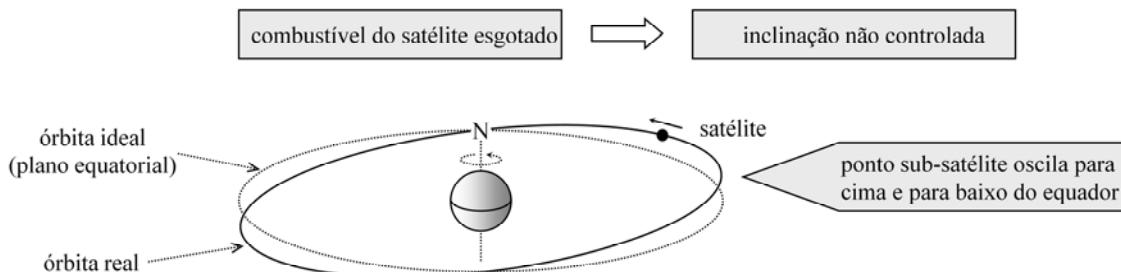
Em casos ainda mais excepcionais, haverá que efectuar um cálculo teórico muito complexo, envolvendo múltiplos efeitos sobre a órbita.

Órbita dos satélites

Perturbações da órbita

Efeitos do Sol e da Lua sobre um satélite geoestacionário

- órbita inclina-se com o decorrer do tempo
- desvios da ordem de 1° por ano são possíveis
- medidas de correcção
 - satélite executa manobras de correcção Norte-Sul, com motores de gás
 - satélite lançado numa órbita ligeiramente inclinada, de sentido contrário ao futuro desvio
- proximidade do fim de vida útil do satélite → combustível tende a esgotar-se



Inclinação da órbita de um satélite geoestacionário por efeito do Sol e da Lua

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A inclinação do plano da órbita de um satélite geoestacionário provoca nas estações terrestres uma variação de ciclo diário da direcção de visibilidade do satélite, essencialmente em termos de variação da elevação (no caso de uma estação terrestre com a mesma longitude do ponto sub-satélite, apenas variará a elevação; noutras casos, o azimute também irá variar, mas muito menos do que a elevação).

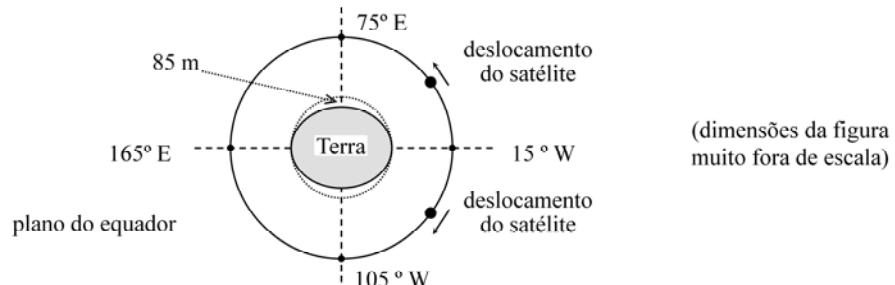
As manobras de correcção da órbita só podem ser executadas por motores que expelem gás numa direcção, de modo a criar um impulso no satélite de sentido contrário (princípio da conservação da quantidade de movimento).

Órbita dos satélites

Perturbações da órbita

Efeitos da Terra

- Terra é achatada ao longo do equador (achatamento dos pólos de ± 20 km é irrelevante para satélites geoestacionários)
- há uma tendência não controlada de deslocamento para 75°E e 105°W
- medidas de correcção → manobras Este-Oeste, com motores de gás



Deslocamentos de satélites geoestacionário por efeito do achatamento equatorial da Terra

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Os pontos a 75°E e 105°W são pontos de menor energia potencial, pelo que constituem pontos de "atração" dos satélites da órbita geoestacionários. A necessidade de efectuar correcções permanentes ao longo da vida útil dos satélites conduz, a prazo, ao esgotamento do combustível, e, consequentemente, à incapacidade de controlar a órbita.

Órbita dos satélites

Efeitos da órbita nas comunicações

Efeito Doppler

- já discutido anteriormente na comparação de tipos de órbitas
- requer seguimento da frequência no receptor de satélites não geoestacionários

frequência emitida	f_e	$\frac{f_r - f_e}{f_e} = \frac{\Delta f}{f_e} = \frac{v_s}{c}$ $f_r = f_e \left(1 + \frac{v_s}{c} \right)$
frequência recebida	f_r	
velocidade radial do satélite	v_s	
velocidade da luz	c	

- exemplo: satélite em órbita Molniya

frequência emitida	4 GHz	$\frac{v_s}{c} = 10^{-5}$	$\Delta f = 40 \text{ kHz}$
velocidade radial num ponto	3 000 m/s		

Variação do atraso de propagação

- efeito esperado em satélites não geoestacionários
- cria problemas em satélites geoestacionários que utilizam acesso múltiplo temporal (TDMA)
 - temporização da transmissão é continuamente ajustada
 - evitam-se tempos de guarda demasiadamente longos

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A variação da distância Terra-satélite induz efeito Doppler, devido ao facto de o satélite apresentar uma componente radial da velocidade em relação à estação terrestre.

Além disso, a variação da distância implica ainda uma variação no atraso de propagação que conduz a que, em comunicações digitais, o número de bits "armazenados" no percurso varie ao longo do tempo. Para restabelecer um débito constante na recepção, será então necessário utilizar memórias tampão que compensarão as variações ocorridas no trajecto (mais bits armazenados na memória, quando o satélite se aproxima e vice-versa).

Órbita dos satélites

Efeitos da órbita nas comunicações

Eclipses do satélite

- satélite atravessa o cone de sombra da Terra
- ocorrem nos 23 dias anteriores e posteriores aos equinócios (21 de Março e 23 de Setembro)
- duração máxima de cerca de 70 minutos (atravessamento de 12 800 km a 3 075 m/s)
- satélite opera só com baterias ← alguns transpositores são desligados
- produzem-se variações térmicas muito acentuadas

Ofuscação pelo Sol

- estação terrestre vê o Sol por trás do satélite
 - ocorre em 5 ou 6 dias próximos dos equinócios
 - duração máxima de cerca de 8 minutos
 - duração acumulada no ano de 60 minutos
 - temperatura de ruído de sistema torna-se muito elevada
 - interfere ou impede as comunicações durante cerca de 100 minutos por ano (0,02%)
- ocorre durante o dia, podendo coincidir com períodos de tráfego intenso

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

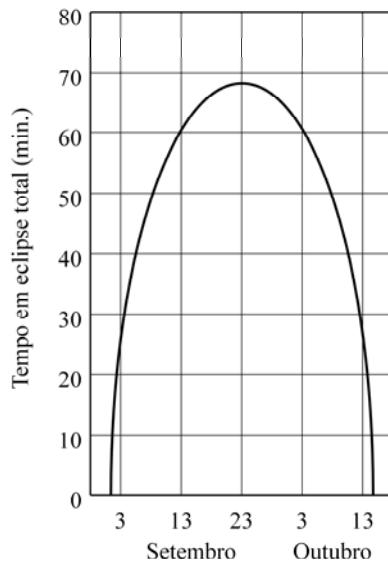
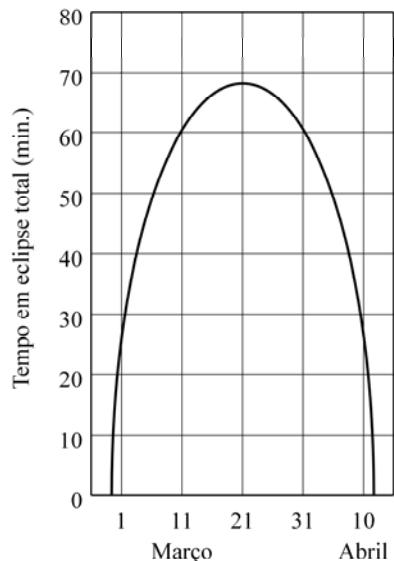
Os períodos de eclipse são os mesmos para todas as estações terrestres, competindo ao operador do satélite tomar as medidas necessárias para reduzir o seu impacto nas comunicações.

Um dos maiores problemas dos eclipses é o efeito do choque térmico resultante do período em que o satélite está na sombra da Terra, durante o qual a temperatura desce imenso (na Terra, o abaixamento nocturno de temperatura é fortemente atenuado pelo efeito moderador da própria Terra e da atmosfera). Grande parte das falhas dos equipamentos electrónicos ocorre nestes períodos.

Os períodos de ofuscação dependem da localização da estação terrestre e provocam perdas de comunicação pontuais (*sun outage*). Os operadores de cada estação terrestre deverão, por isso, conhecer em que alturas ocorre a ofuscação - nos satélites de serviço fixo, esta informação é normalmente disponibilizada pelos próprios operadores de satélite.

Órbita dos satélites

Efeitos da órbita nas comunicações



Datas e duração dos eclipses

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Estes gráficos permitem determinar facilmente a duração do eclipse total. Fora destes intervalos, haverá ainda períodos em que o satélite permanece na zona de penumbra.

Ligações por satélite

Desvanecimentos de propagação

• Tipos de desvanecimentos

Desvanecimentos quase constantes

- absorção pelos gases atmosféricos

normalmente menor do que nos feixes hertzianos terrestres

Desvanecimentos esporádicos mais ou menos lentos

- variações do ângulo de chegada por efeitos de refracção

crítico se a largura do feixe das antenas for muito pequena - exige controlo adaptativo de pontaria

- multipercursos devidos a

- reflexão na superfície terrestre
- reflexão/refracção em camadas estáveis da atmosfera

efeitos muito acentuados em ligações de baixa elevação ($\alpha < 5^\circ$) (idênticos a feixes terrestres)

- atenuação pela precipitação

normalmente menor do que nos feixes hertzianos terrestres

Desvanecimentos esporádicos rápidos

- multipercursos devidos a não homogeneidades do índice de refracção

afectam sobretudo ligações de baixa elevação que operam com pequena margem

- cintilações por efeitos de turbulências na troposfera e ionosfera, que provocam dispersão

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Os desvanecimentos que ocorrem em ligações por satélite apresentam algumas particularidades em relação aos feixes hertzianos terrestres.

Por requererem abordagens diferentes, analisaremos apenas a absorção pelos gases atmosféricos e a atenuação pela precipitação.

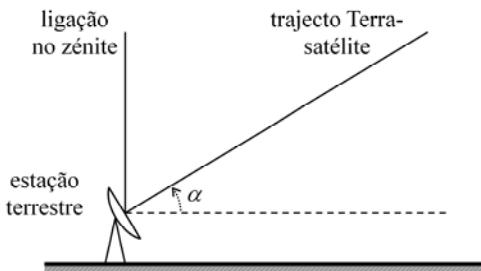
Ligações por satélite

Desvanecimentos de propagação

• Absorção pelos gases atmosféricos

- decresce com o aumento da elevação (α)
- decresce com a altitude da estação (h_e)
- atenuação no trajecto inclinado calcula-se a partir da atenuação no zénite

$$A_g = \frac{A_{zen}(f, h_e)}{\sin(\alpha)} = -L_g \quad (\text{dB}) \quad \alpha > 5^\circ$$



Geometria de cálculo da absorção pelos gases atmosféricos

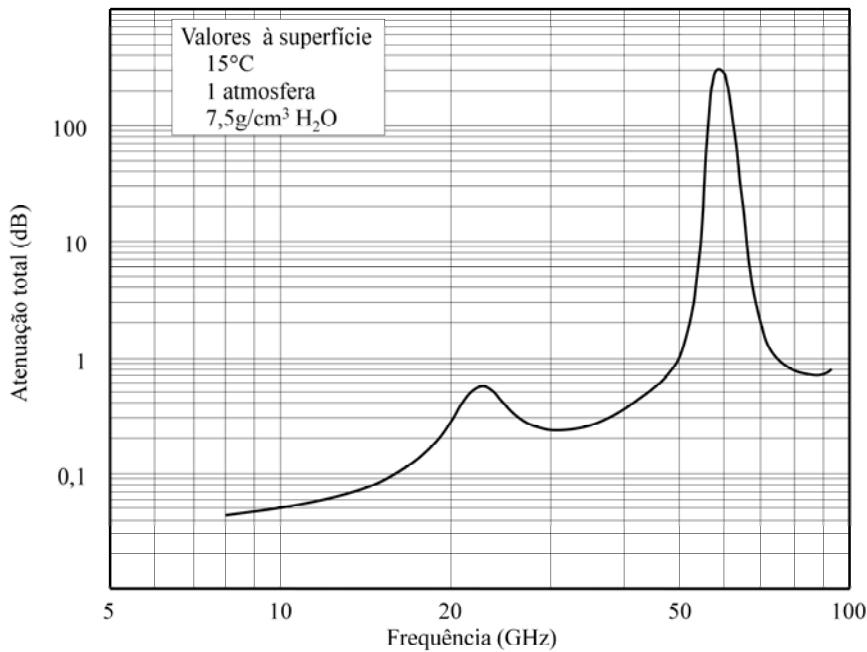
Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A expressão acima permite calcular a atenuação num trajecto inclinado, presumindo uma terra plana e uma atmosfera com absorção variável apenas com a altitude.

No entanto, para baixas elevações, a curvatura da Terra conduz a desvios da expressão, por excesso.

Ligações por satélite



Absorção pelos gases atmosféricos no zénite, desde o nível do mar ($h_e=0$)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A figura mostra os valores da absorção para um feixe apontado para o zénite, sendo evidentes os picos correspondentes às frequências de ressonância da água (22 GHz) e do oxigénio (60 GHz).

Ligações por satélite

Desvanecimentos de propagação

• Atenuação pela precipitação

- meio atenua uniformemente da altitude da estação (h_e) até à altitude da isotérmica de 0°C (h_0)
- atenuação no trajecto inclinado calcula-se a partir da atenuação na projecção horizontal (d_{hor})

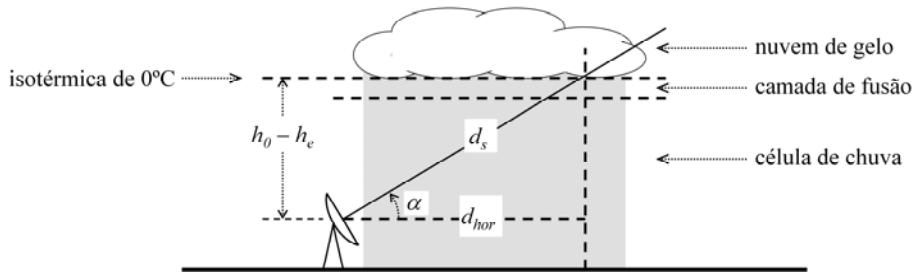
$$A_c = \frac{A_{hor}(f, P, R, d_{hor})}{\cos(\alpha)} \quad (\text{dB})$$

$$d_{hor} = \frac{h_0 - h_e}{\operatorname{tg}(\alpha)}$$

$$h_0(\text{km}) = \begin{cases} 5,0 & 0 < \theta < 23^\circ \\ 5,0 - 0,075(\theta - 23) & \theta \geq 23^\circ \end{cases}$$

P - probabilidade de ocorrência
 R - taxa de precipitação pontual

θ - latitude da estação



Geometria de cálculo da atenuação pela chuva

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

O cálculo da atenuação da ligação Terra-satélite tem que considerar a estrutura vertical e horizontal da precipitação.

No primeiro caso, considera-se que a atenuação específica é constante em função da altitude, o que se justifica admitindo, como aproximação, que as gotas caem verticalmente desde a camada isotérmica de 0°C, mantendo as suas dimensões.

O segundo caso corresponde à estrutura já analisada nos feixes terrestres, adoptando-se os mesmos modelos de cálculo.

Ligações por satélite

Ruído de sistema

Ruído térmico das ligações ascendente e descendente

- ruído do céu é geralmente reduzido
 - pequena contribuição do ruído cósmico de fundo: cerca de 3 K
 - contribuição dominante resultante da absorção ← sobretudo com baixa elevação
 - cresce significativamente se ocorrer precipitação
- ruído do sistema de recepção terrestre pode ser muito baixo
- ruído do sistema de recepção do satélite é elevado ← capta ruído da Terra quente

Intermodulação entre canais

- ocorre principalmente no satélite em configurações com
 - transpositores não regenerativos e
 - multi-portadoras com acesso simultâneo ao transpositor
- exige amplificadores com boa linearidade
 - amplificação de potência particularmente difícil
 - opera-se alguns dB abaixo da saturação ← margem de saturação - backoff
 - problema menor com portadoras digitais (margem pode ser menor)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

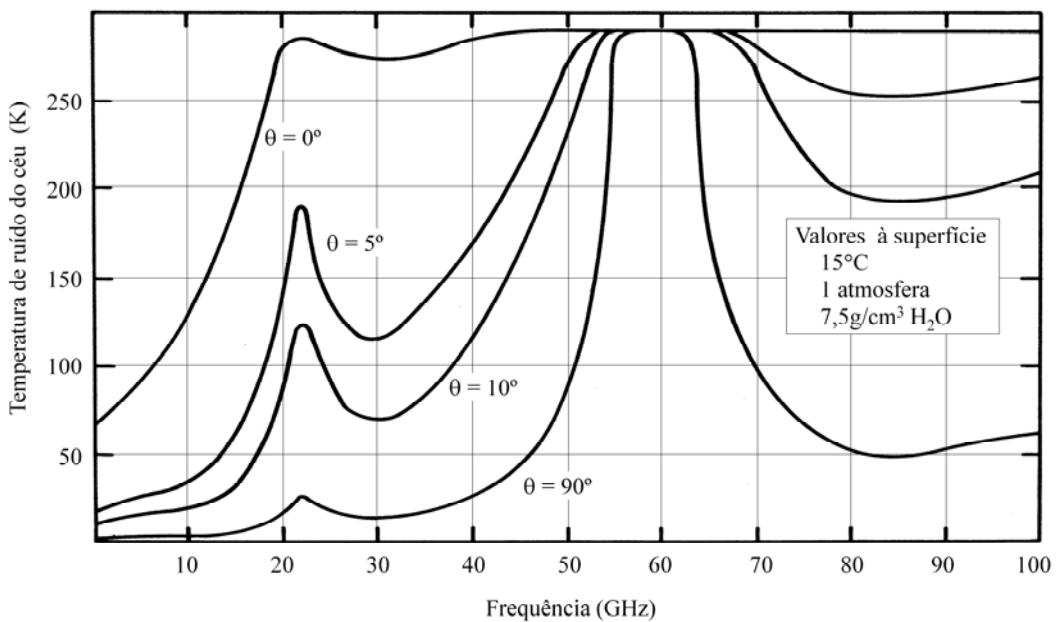
Sistemas de Comunicação por Satélite

Mais uma vez, a análise do ruído térmico efectuada para os feixes hertzianos terrestres é aplicável, com algumas adaptações. A principal diferença ocorre na ligação satélite-terra, em que o ruído do céu pode ser muito baixo.

Em sistemas por satélite que usam acesso múltiplo por divisão nas frequências (FDMA), a intermodulação entre canais terá de ser especialmente considerada.

Note-se que, no caso de existir uma única portadora por canal, como acontece tipicamente nos feixes hertzianos terrestres, ocorrem igualmente produtos de intermodulação entre as várias componentes espectrais do sinal. Contudo, como há um único sinal no canal, é possível utilizar igualizadores para reduzir este tipo de ruído.

Ligações por satélite



Temperatura de ruído do céu em tempo limpo em função da elevação θ

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

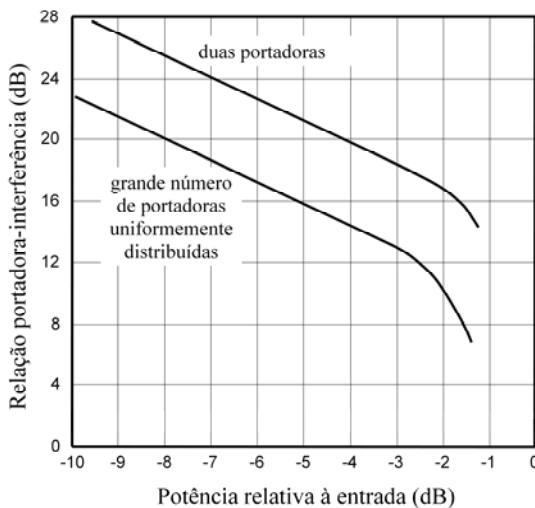
Esta figura reflecte o aumento da temperatura de ruído de céu resultante da absorção nos gases atmosféricos. Como a temperatura de ruído cósmico de fundo T_{cosm} é muito baixa (cerca de 3 K), a temperatura de ruído do céu $T_{céu}$ pode ser calculada usando a expressão

$$T_{céu} = LT_{cosm} + (1 - L) T_m \text{ (K)}$$

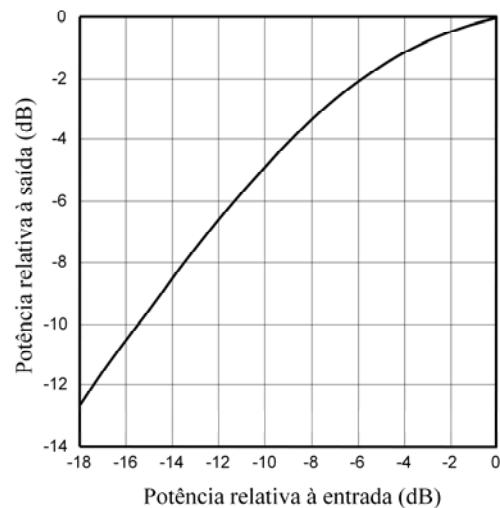
$T_{céu} \approx (1 - L) T_m \text{ (K)}$

em que L é a perda introduzida pelos gases atmosféricos e T_m é a temperatura de absorção do meio

Ligações por satélite



**Relação C/I em função da potência
à entrada do transpositor
(referida à potência de saturação)**



**Potência de saída versus potência
de entrada num transpositor
(valores referidos à saturação)**

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Como se pode observar no gráfico da esquerda, admitindo o caso de duas portadores, se se pretender uma relação C/I de 24 dB, deverá ser assegurada uma margem de saturação à entrada de 7 dB (*input backoff*) - ou seja, a potência à entrada tem de estar 7 dB abaixo da potência de saturação.

Por outro lado, no gráfico da direita pode verificar-se que resulta uma margem de saturação à saída (*output backoff*) de cerca de 3 dB - logo, a potência à saída está 3 dB abaixo da potência máxima de saturação.

Obviamente que a introdução da margem de saturação reduz o EIRP na ligação descendente, degradando por sua vez a relação C/N. Estes efeitos contraditórios terão que ser pesados numa perspectiva de compromisso entre os efeitos em jogo.

Ligações por satélite

Ruído de sistema

Interferências entre canais

- resultam da reutilização de frequências
 - banda C (6/4 GHz) até 6 vezes por satélite
 - banda Ku (14/11 GHz) até 2 vezes por satélite
- garante-se separação mínima entre satélites
 - banda C (6/4 GHz) 4°
 - banda Ku (14/11 GHz) 3°
 - banda Ka (30/20 GHz) 1°

com separação espacial e polarizações ortogonais

- exige-se planeamento adequado de frequências
 - banda ascendente e descendente muito afastadas entre si
 - bandas de guarda entre canais
- agravam-se com efeitos de propagação
 - despolarização pela chuva
 - despolarização pelo gelo ou neve

capacidade da órbita geoestacionária é limitada

coordenação mundial ao nível da UIT

cria atenuação diferencial
cria esfasamento diferencial

Ofuscação pelo Sol

- já discutido anteriormente

A análise de interferência entre canais baseia-se na capacidade das antenas discriminarem direccionalmente e na polarização ortogonal, tendo em conta ainda efeitos de propagação que criam despolarização.

Esta análise permite concluir qual o grau permitido de reutilização de frequências e de separação entre satélites, de modo a optimizar a capacidade global dos sistemas por satélite.

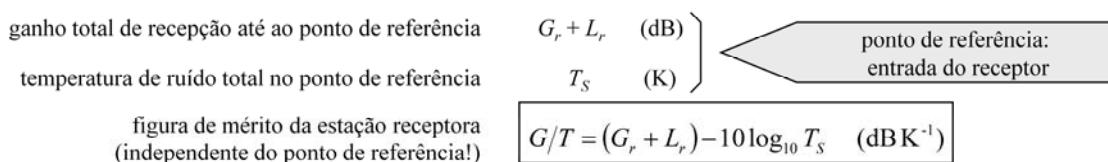
Ligações por satélite

Relação portadora-ruído térmico numa ligação simples em espaço livre

Expressão geral para uma ligação

$$C/N = EIRP + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} + L_g + G_r + L_r - 10 \log_{10} kT_s B$$

Figura de mérito da estação receptora



Relação portadora-ruído à saída do receptor	
Ligação	Balanço de potência e de ruído (dB)
Analógica Digital	$C/N = EIRP + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} + L_g + G/T - 10 \log_{10} k - 10 \log_{10} B$
Digital	$E_b/N_0 = EIRP + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d} + L_g + G/T - 10 \log_{10} k - 10 \log_{10} R_b$

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A única particularidade da aplicação da relação portadora-ruído aos sistemas por satélite é a identificação da figura de mérito da estação terrestre (G/T), que, tal como o nome indica, traduz, num único parâmetro, o desempenho global do sistema de recepção, por combinar o ganho de recepção e a temperatura de ruído de sistema.

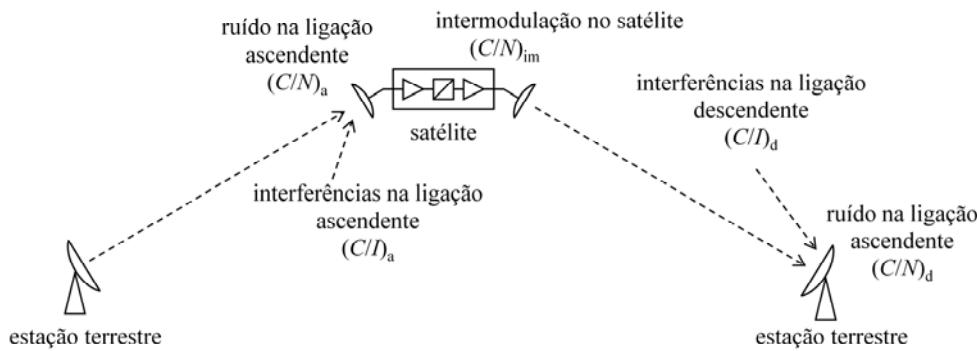
Como já tínhamos visto, do lado da emissão, o parâmetro equivalente que traduz o desempenho do sistema de emissão é a potência isotrópica radiada efectiva (EIRP), uma vez que combina a potência emitida e o ganho de emissão.

Ligações por satélite

Relação portadora-ruído total numa ligação completa

- as fontes de ruído podem ser consideradas de tipo gaussiano
- assume-se que não são correlacionadas
 - apenas aproximado, no caso de ruído de intermodulação

$$(C/N)^{-1} = (C/N)_a^{-1} + (C/I)_a^{-1} + (C/N)_{im}^{-1} + (C/N)_d^{-1} + (C/I)_d^{-1}$$



Relação portadora-ruído total numa ligação completa

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A equação acima presume ruído aditivo, sendo por isso aplicável apenas no caso de não haver regeneração a bordo do satélite. Se este for o caso, teremos de calcular separadamente a relação C/N na ligação ascendente e na ligação descendente.

Nas páginas seguintes, exemplifica-se o cálculo de ligações em situações típicas de satélites de serviço fixo, de serviço de difusão e de serviço móvel.

SATÉLITE DE SERVIÇO FIXO (FSS)

LIGAÇÃO ASCENDENTE 6 GHz			
Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de emissão	190 W	22,8 dB W	
Ganho da antena terrestre (1)	61,7 dB	61,7 dB	
EIRP		84,5 dB W	84,5 dBW
$10 \log_{10} (4\pi d^2)$		162,6 dB m ²	
Densidade de fluxo no satélite		-78,1 dBW/m ²	
Perdas em espaço livre			-199,6 dB
Ganho da antena do satélite	23,1 dB	23,1 dB	
Temperatura de ruído de sistema do satélite	575 K	(-) 27,6 dB K	
Figura de mérito do satélite		-4,5 dB K ⁻¹	-4,5 dB K ⁻¹
Constante de Boltzmann			(-) -228,6 dB W Hz ⁻¹ K ⁻¹
Largura de banda do transpositor	36 MHz		(-) 75,6 dB Hz
Perdas diversas	-3,5 dB		-3,5 dB
Relação portador-ruído em tempo limpo			29,9 dB

LIGAÇÃO DESCENDENTE A 4 GHz			
Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de saída do satélite	5 W	7,0 dB W	
Ganho da antena do satélite	22,5 dB	22,5 dB	
EIRP		29,5 dB W	29,5 dB W
$10 \log_{10} (4\pi d^2)$		(-) 162,6 dB m ²	
Densidade de fluxo na Terra		-133,1 dBW/m ²	
Perdas em espaço livre			-196,1 dB
Ganho da antena terrestre (1)	58,2 dB	58,2 dB	
Temperatura de ruído de sistema terrestre	75 K	(-) 18,8 dB K	
Figura de mérito do sistema terrestre		39,4 dB K ⁻¹	39,4 dB K ⁻¹
Constante de Boltzmann			(-) -228,6 dB W Hz ⁻¹ K ⁻¹
Largura de banda do transpositor	36 MHz		(-) 75,6 dB Hz
Perdas diversas			-3,0 dB
Relação portador-ruído em tempo limpo			22,9 dB

LIGAÇÃO COMPLETA			
Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Relação portador-ruído ascendente	29,9 dB		29,9 dB
Relação portador-ruído descendente	22,9 dB		22,9 dB
Relação portador-ruído total (2)			22,1 dB

Notas:

(1) As antenas terrestres têm cerca de 24 m de diâmetro e larguras de feixe de 0,2° a 4 GHz e 0,15° a 6 GHz

(2) Assume-se que o repetidor do satélite é não regenerativo e que o ruído térmico é dominante

SATÉLITE DE SERVIÇO DE DIFUSÃO (BSS)

LIGAÇÃO DESCENDENTE 12,2 GHz			
Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de saída do satélite (1)	120 W	20,8 dB W	
Ganho da antena do satélite (2)	37 dB	37,0 dB	
EIRP		57,8 dB W	
$10 \log_{10} (4\pi d^2)$		(-) 162,6 dB m ²	
Perdas por absorção	-0,5 dB	-0,5 dB	
Densidade de fluxo na Terra		-105,3 dBW/m ²	
Diâmetro da antena terrestre	0,7 m	0,7 m	
Eficácia da antena terrestre	60%	0,6	
Área equivalente de recepção		-6,37 dB m ²	
Estação no limite da cobertura	-3 dB	-3,0 dB	
Perda de polarização	-0,5 dB	-0,5 dB	
Erro de pontaria da antena receptora (3)	-1 dB	-1,0 dB	
Perdas nas ligações	-1 dB	-1,0 dB	
Perdas totais		-5,5 dB	
Potência recebida		-117,2 dB W	-117,2 dB W
Constante de Boltzmann			-228,6 dB W Hz ⁻¹ K ⁻¹
Temperatura de ruído de sistema (4)	120 K	20,8 dB K	20,8 dB K
Largura de banda do canal (FI)	36 MHz		75,6 dB Hz
Potência de ruído			(-) -132,2 dB W
Relação portadora-ruído em tempo limpo			15,1 dB
Relação portadora-ruído mínima	10 dB		(-) 10,0 dB
Margem disponível			5,1 dB

Notas:

- (1) A potência de 120 W, sendo elevada, aumenta o custo e complexidade do satélite, mas permite que milhões de utilizadores utilizem pequenos sistemas de recepção, de baixo custo
- (2) A antena do satélite tem uma largura do feixe de 3°×2°, correspondente a uma cobertura de 2000×1400 km
- (3) A antena de recepção de 0,7 m tem 2,5° de largura de feixe; para apontá-la com um erro de 1 dB é necessário uma precisão de 0,7°
- (4) Uma temperatura de ruído de sistema de 120 K é compatível com a tecnologia actual de LNBs de baixo ruído e custo reduzido

SATÉLITE DE SERVIÇO MÓVEL (MSS)

LIGAÇÃO ASCENDENTE 1 636,5 - 1 645 MHz			
Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Potência de emissão	10 W	10,0 dB W	
Ganho da antena do barco (1)	27 dB	27,0 dB	
EIRP		37,0 dB W	
Perdas em espaço livre		-188,3 dB	
Ganho da antena do satélite (2)	18 dB	18,0 dB	
Potência recebida no satélite		-133,3 dB W	-133,3 dB W
Temperatura de ruído de sistema do satélite	500 K	27,0 dB K	
Constante de Boltzmann		-228,6 dB W Hz ⁻¹ K ⁻¹	
Largura de banda do canal	30 kHz	44,8 dB Hz	
Potência de ruído no satélite		-156,8 dB W	(-) -156,8 dB W
Relação portador-ruído			23,5 dB

LIGAÇÃO DESCENDENTE 1 535 - 1543,5 MHz			
Característica	Dados	Cálculos Intermédios	Cálculo Final
Distância	38000 km		
Número de canais	40	40	
Potência de saída do satélite	10 W	10 W	
Potência de saída por canal		-6,0 dB W	
Ganho da antena do satélite (2)	17,5 dB	17,5 dB	
EIRP		11,5 dB W	11,5 dBW
Perdas em espaço livre			-187,8 dB
Figura de mérito do sistema de recepção	-4 dB K ⁻¹		-4,0 dB K ⁻¹
Constante de Boltzmann			(-) -228,6 dBW Hz ⁻¹ K ⁻¹
Largura de banda do canal	20 kHz		(-) 43,0 dB Hz
Relação portador-ruído			5,3 dB

Notas:

- (1) A antena do barco tem cerca de 2 m e 8º de largura de feixe
- (2) Considera-se o valor do ganho no limite de cobertura do satélite

Ligações por satélite

Modulações e serviços

• Ligações analógicas

- modulação FM idêntica à utilizada em feixes hertzianos terrestres

$$S/N = C/N \frac{3B_{FI} \Delta f_{ef}^2}{f_2^3 - f_1^3} \quad B_{FI} = 2(\Delta f_{max} + f_{max})$$

Características de ligações analógicas		
Multiplex telefónico FDM /FM	$(S/N)_p = C/N + 20 \log_{10} \frac{\Delta f_{ef}}{f_{max}} + 10 \log_{10} \frac{B_{FI}}{b} + a + p \quad (\text{dB})$	$a = 4,0 \text{ dB}$ $p = 2,5 \text{ dB}$
Monocanal telefónico SCPC	$(S/N)_p = C/N + 20 \log_{10} \frac{\Delta f_{ef}}{f_{max}} + 10 \log_{10} \frac{3B_{FI}}{f_{max}} + a + p + c \quad (\text{dB})$ c - melhoria da relação sinal/ruído resultante da compressão do sinal analógico	$a = 4,0 \text{ dB}$ $p = 2,5 \text{ dB}$ $c = 16 \text{ dB}$ (tipicamente)
Televisão SCPC	$(S/N)_p = C/N + 20 \log_{10} \frac{\Delta f_{ef}}{f_{max}} + 10 \log_{10} \frac{3B_{FI}}{f_{max}} + a + p \quad (\text{dB})$	$a = 2,0 \text{ dB}$ $p = 7,4 \text{ dB}$

SCPC - Single Channel per Carrier

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Para o multiplex telefónico e televisão, as técnicas de processamento utilizadas em banda base são idênticas às utilizadas em feixes hertzianos, nomeadamente a acentuação (ênfase), de que resulta uma melhoria objectiva da relação sinal ruído (parâmetro a das equações).

Da mesma forma, é habitual considerar uma ponderação, que se traduz numa melhoria subjectiva da relação sinal ruído (parâmetro p das equações).

No caso do monocanal telefónico, além da acentuação e ponderação, aplica-se a compressão do sinal analógico. Esta técnica consiste no seguinte:

- antes da modulação, reduz-se a gama dinâmica do sinal, isto é, amplifica-se o sinal tanto mais quanto menor for a sua potência - por exemplo, se o sinal original à entrada do compressor cobrir uma gama dinâmica entre -50 dBm e 0 dBm, à saída poderá variar entre -25 dBm e 0 dBm;
- à saída do desmodulador efectua-se a operação inversa.

É sabido que os sinais de baixo nível são os mais afectados pelo ruído. Ora, a vantagem desta técnica decorre precisamente do facto de, nesta situação, os sinais sofrerem uma atenuação à saída do desmodulador, e, consequentemente, o ruído ser atenuado do mesmo valor. Resulta, assim, uma melhoria associada à ausência de ruído percebido, por exemplo, durante silêncios da conversação. Considera-se um aumento equivalente da relação sinal-ruído, de um valor típico de 16 dB.

Outra técnica utilizada frequentemente em telefonia monocanal é a activação de voz, que consiste na activação da portadora apenas durante o período de conversação. Durante os períodos de silêncio, a portadora é suprimida, resultando uma redução efectiva da potência média de transmissão.

Ligações por satélite

Modulações e serviços

• Ligações digitais

Características gerais

- modulações de fase de m estados: BPSK ($M=2$) / QPSK - MSK ($M=4$)

- eficiência de potência é determinante
- modulação MSK tem espectro compacto e permite menores interferências

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right)$$

$$\frac{R_b}{\log_2 M} < B_{FI} < \frac{2R_b}{\log_2 M}$$

$$B_{FI} \approx 1,2R_b \quad \text{BPSK}$$
$$B_{FI} \approx 0,6R_b \quad \text{QPSK - MSK}$$

- métodos de correcção de erros

- utilizados em muitos sistemas
- permitem operar com menores EIRP e G/T
- são usados códigos FEC (*Forward Error Correction*)
- ganho de codificação (f) dependente do método

com correcção
de erros (FEC)

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} f\right)$$

exemplo: $10 \log_{10} f = 5,5 \text{ dB}$
(código convolucional com eficiência de 50%)

códigos ARQ não são adequados:
atraso de propagação é elevado

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

Em relação aos feixes hertzianos digitais terrestres, os sistemas por satélite apresentam as seguintes particularidades ao nível dos moduladores:

- modulações com poucos estados, mais eficientes em potência;
- utilização mais frequente de códigos de correcção de erros de tipo FEC;
- adopção de métodos de encriptagem de dados, devido à maior possibilidade de intrusão de estranhos na recepção dos sinais.

Ligações por satélite

Modulações e serviços

• Ligações digitais

Serviços suportados

- telefonia digital
- dados não restritos
- tele-serviços de tipo RDIS
- televisão

monocanal / multicanal

SCPC - Single Channel per Carrier ou
TDM - Time Division Multiplex

SCPC - Single Channel per Carrier ou
MCPC - Multiple Channel per Carrier

Serviços digitais por satélite

telefonia digital	PCM 64 kbit/s ADPCM 32 kbit/s <i>vocoders</i> 16 / 4,8 / 2,4 kbit/s (codificadores de fonte para voz)	dados não restritos	interligação de redes tráfego Internet e Intranets tráfego transaccional
tele-serviços tipo RDIS	videotelefonia teleconferência telemedicina educação à distância controlo remoto	televisão	DPCM 34 Mbit/s MPEG-2 distribuição 4 - 5 Mbit/s contribuição 7 - 8 Mbit/s HDTV 20 - 24 Mbit/s

Projeto de Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Comunicação por Satélite

A designação MCPC é normalmente utilizada em serviços de distribuição de televisão, sendo naturalmente uma forma de multiplexagem temporal TDM.

Na secção seguinte, discutiremos vários exemplos de configurações de comunicação por satélite, adequadas ao suporte deste tipo de serviços.

Acesso a satélites

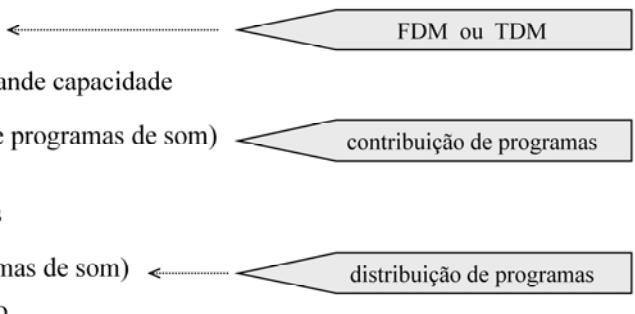
Acesso simples

Definição de acesso simples: uma única estação terrestre transmite através de um transpositor de um satélite

Características gerais

- baixa complexidade de operação
- ausência de intermodulação entre canais

Aplicações

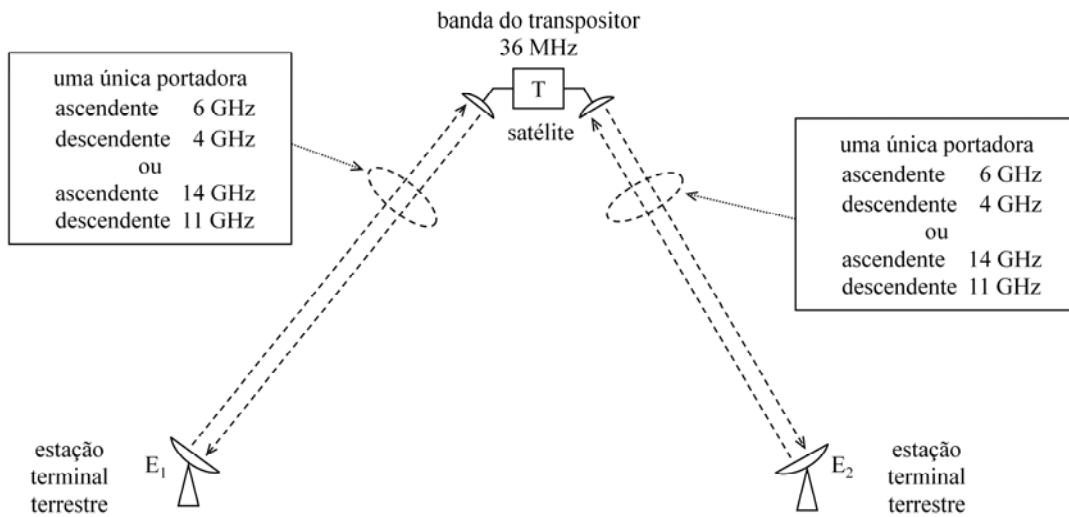
- ligações ponto-a-ponto da rede fixa
 - configuração não flexível
 - adequado apenas a sistemas de grande capacidade
- ligações ponto-a-ponto de televisão (e programas de som)
 - ligações permanentes
 - ligações temporárias programadas
- difusão directa de televisão (e programas de som) 
 - recepção individual de baixo custo
 - cobertura de um número muito vasto de utilizadores

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

As configurações de acesso simples permitem ligações ponto-a-ponto em tudo semelhantes às disponibilizadas por feixes hertzianos terrestres. Acresce ainda a configuração de difusão directa de televisão, uma das áreas de maior expansão dos sistemas por satélite.

Acesso a satélites

Acesso simples



Exemplo de configuração de uma ligação ponto-a-ponto bidireccional com acesso simples

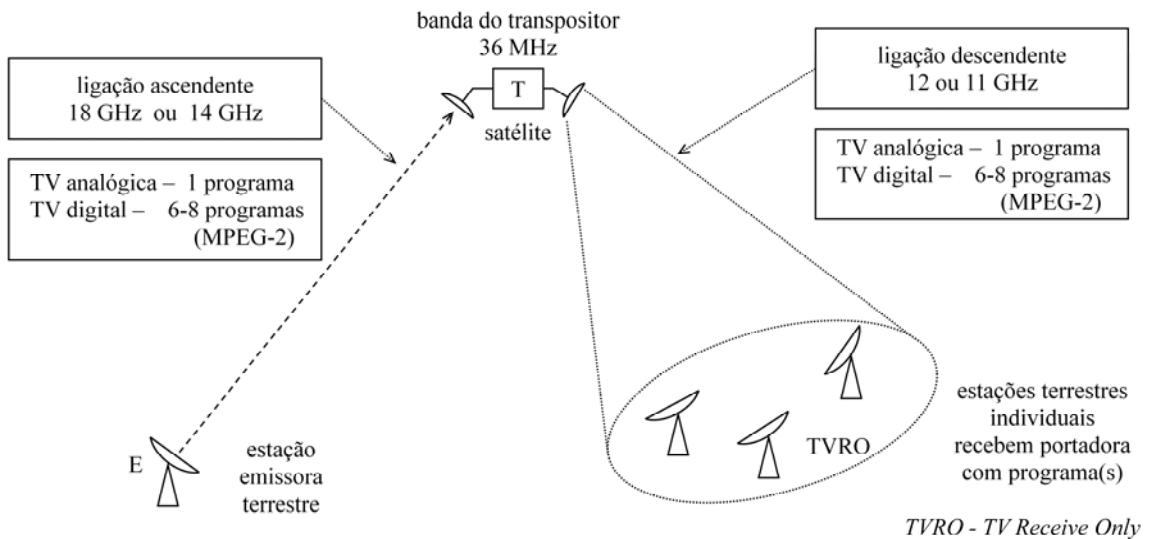
Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Referem-se dois exemplos desta configuração, no contexto de satélites Intelsat:

- sistema analógico FDM/FM (muito usado no passado, actualmente obsoleto)
 - multiplex FDM $\rightarrow N=972$ canais; banda base [12, 4028] kHz
 - modulação FM $\rightarrow B= 36$ MHz
- sistema digital TDM/PSK
 - multiplex TDM $\rightarrow R_b = 55$ Mbit/s
 - modulação QPSK $\rightarrow B= 36$ MHz

Acesso a satélites

Acesso simples



Exemplo de configuração de distribuição de televisão

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A transmissão de televisão analógica permite apenas um programa por canal (SCPC). Para um sinal PAL modulado em FM, a largura de banda típica dos transpositores é de 27 MHz.

No caso de televisão digital, a configuração mais frequente é MCPC.

Exemplo típico de difusão digital de TV, em modo MCPC:

- 8 programas de TV ou 6 programas de TV + 10 programas de áudio
- débito de informação MPEG-2: 38,02 Mbit/s
- débito binário após codificação de blocos Reed-Solomon (16 octetos por pacote MPEG de 188 octetos): $38,02 \times 204/188 = 41,25$ Mbit/s
- débito binário após codificação convolucional de Viterbi (eficiência 3/4): $R_b = 41,25/(3/4) = 55$ Mbit/s
- débito de símbolos com modulação QPSK: $R_s = R_b/2 = 27,5$ Mbaud
- largura de banda mínima do transpositor: $B_{FI} = 33$ MHz
- largura de banda efectiva do transpositor: $B = 36$ MHz

Acesso a satélites

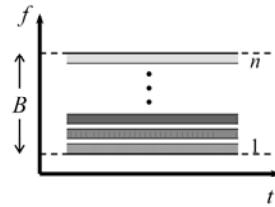
Acesso múltiplo

Definição de acesso múltiplo: várias estações terrestres transmitem através do mesmo transpositor de satélite

Técnicas de acesso múltiplo

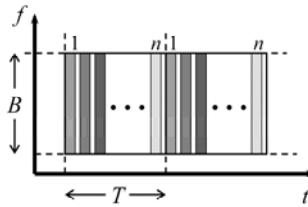
FDMA - Frequency Division Multiple Access

- estações accedem ao transpositor do satélite ao mesmo tempo
- cada estação transmite na sua própria banda de frequência



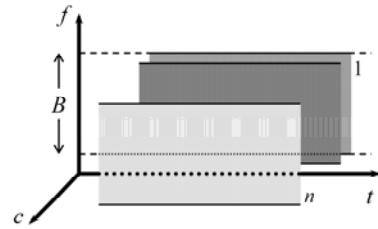
TDMA - Time Division Multiple Access

- estações transmitem uma de cada vez (sequencialmente)
- cada estação transmite no seu próprio intervalo de tempo



CDMA - Code Division Multiple Access

- estações transmitem ao mesmo tempo, em banda espalhada
- cada estação transmite com um código próprio



Acesso múltiplo de n estações a um transpositor

(B - largura de banda do transpositor T - comprimento de trama)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A técnica de acesso FDMA usa a dimensão frequência para assegurar a partilha de recursos, enquanto a técnica TDMA utiliza a dimensão tempo. Em CDMA, a separação dos canais é assegurada pela introdução de uma nova dimensão, o código: a transmissão de todas as estações faz-se na mesma banda, ao mesmo tempo, com sinais codificados, de tal forma que apenas o receptor que detém o código igual ao usado na emissão, num certo canal, irá recuperar os respectivos dados.

Acesso a satélites

Acesso múltiplo

- Métodos de acesso aos recursos

Acesso fixo ou pré-determinado (PA, Pre-Assigned)

- estabelece-se antecipadamente um plano de utilização dos recursos
- adequado a situações de grande tráfego aproximadamente constante
- não adaptável a tráfego variável

apenas no caso de
FDMA ou TDMA

Acesso por atribuição a pedido (DA, Demand Assigned)

- recursos são atribuídos a pedido com base nas condições de tráfego presentes
- preferível em situações de tráfego reduzido ou esporádico
- vários formas de atribuição de canais

apenas no caso de
FDMA ou TDMA

- controlo centralizado
através de sinalização
por escrutínio (*polling*)

- controlo distribuído
protocolos Aloha de acesso aleatório

protocolo Aloha mais usado - CSMA/CD
Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Os protocolos de atribuição de canais são variantes de protocolos genericamente utilizados em redes centralizadas ou distribuídas.

Um protocolo *Aloha* de tipo CSMA/CD poderá operar da seguinte forma, fazendo intervir uma estação de controlo que recebe os sinais de um transpositor de satélite, que, por sua vez, os recebe das estações dispersas da rede:

- a transmissão é efectuada em intervalos de tempo pré-definidos (*slotted Aloha*);
- uma estação terrestre só envia pacotes de informação quando detecta um canal livre (a estação de controlo pode fornecer esta indicação continuamente a todas as estações participantes na rede);
- se mais do que um terminal começar a transmitir ao mesmo tempo, existirão colisões;
- as colisões são reconhecidas na estação de controlo e sinalizadas aos terminais;
- estes suspendem a transmissão e tentam de novo após um tempo aleatório.

Acesso a satélites

FDMA - Frequency Division Multiple Access

• Sistemas FDM/FM/FDMA

banda base analógica ou digital

Emissão

- cada estação modula em frequência todo o seu tráfego de saída numa portadora (ou várias)
 - largura de banda do sinal em banda base: $4 \text{ kHz} \times N$ (número de canais)

Recepção

- a estação recebe as portadoras de todas as outras estações com quem tem conectividade
 - num sistema de n estações, são necessários pelo menos $n-1$ receptores e desmoduladores
- a estação acede apenas à porção da banda-base FDM que lhe diz respeito

Plano de frequências

- banda do transpositor 36 MHz
- atribuição de banda
 - 1 portadora de 972 canais - banda base de 12 a 4 028 kHz
 - 12 portadoras de 72 canais - banda base de 12 a 300 kHz

valor muito utilizado em sistemas correntes

exemplo de acesso único

exemplo de acesso múltiplo

Método de acesso aos recursos

- acesso fixo, de um modo geral

reconfiguração de recursos complexa

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A reconfiguração de recursos exigiria a alteração da largura de banda dos canais na emissão e na recepção, o que se tornaria muito complexo. Por esta razão, os sistemas FDM/FM/FDMA, já obsoletos, operavam, de um modo geral, em acesso fixo.

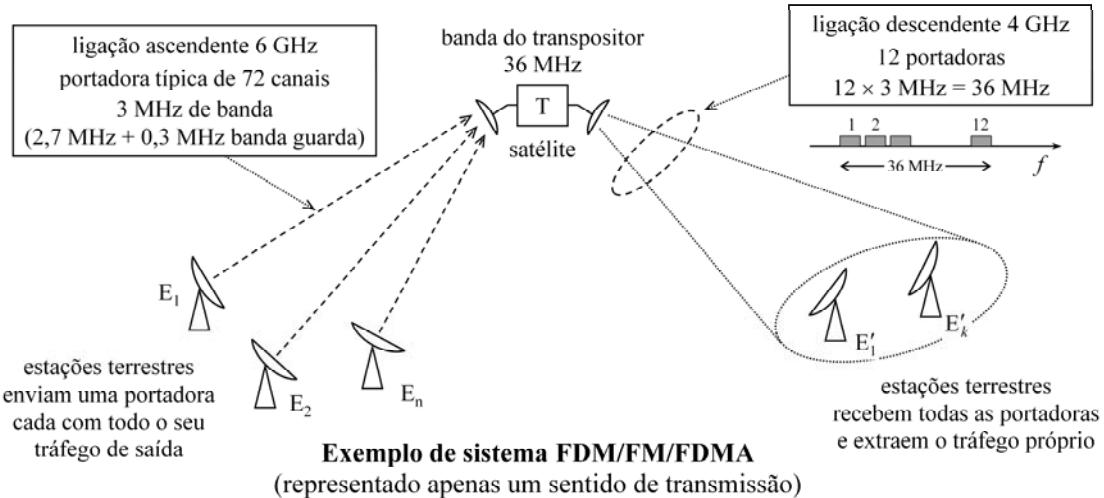
Acesso a satélites

FDMA - Frequency Division Multiple Access

- Sistemas FDM/FM/FDMA

Aplicações

- ligações ponto-a-ponto da rede fixa, de média/grande capacidade



Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Do ponto de vista da interconexão entre estações terrestre, este sistema pode ser visto como uma matriz de comutação de acesso total, isto é, qualquer estação de origem pode enviar qualquer parcela do tráfego total para qualquer estação de destino.

Acesso a satélites

FDMA - Frequency Division Multiple Access

- Sistemas SCPC/FDMA ← SCPC/FM/FDMA ou SCPC/PSK/FDMA

Emissão e receção

- cada estação transmite/recebe um canal modulado numa portadora independente
 - canal telefónico analógico comprimido e modulado em FM
 - canal digital com débitos até 64 kbit/s, modulado em PSK
- tráfego é agregado numa estação central
- assegura a interligação com a rede fixa

evolução de sistemas analógicos para digitais

Plano de frequências

- largura de banda atribuída por canal entre 22,5 e 45 kHz (64 kbit/s), nos sistemas correntes

Método de acesso aos recursos

- acesso fixo (equivalente a linhas alugadas) ou a pedido (tráfego esporádico)
- portadora normalmente activada apenas quando há voz ou dados a transmitir
 - não tem efeito na banda ocupada
 - reduz potência transmitida pelo transpositor
 - reduz interferências

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Os sistemas SCPC/FDMA permitem configurações de acesso de muito baixa capacidade, inclusivamente individuais, com estações terrestres de reduzido custo e de pequena potência, especialmente a partir da altura em que se passou a utilizar satélites de órbita LEO ou MEO.

O acesso pode ser fixo ou a pedido, neste último caso correspondendo a atribuir, ou não, a banda de um canal a cada estação terminal.

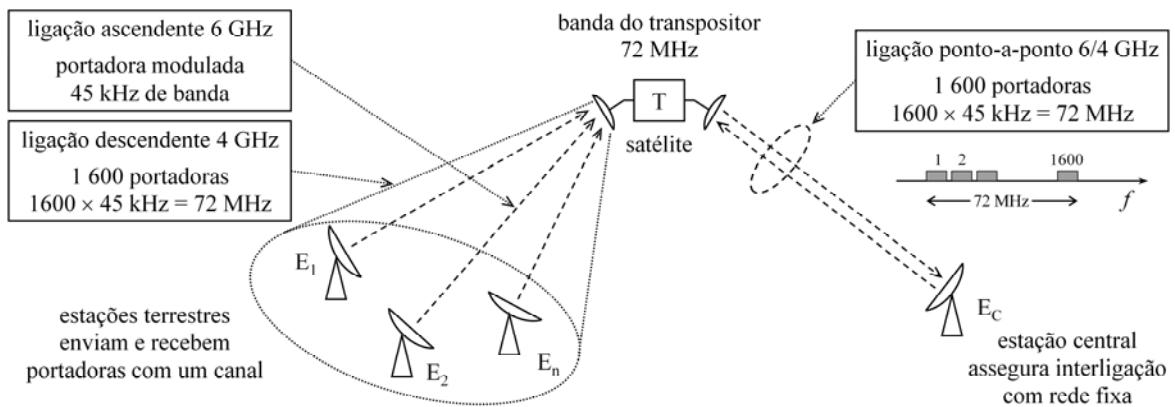
Acesso a satélites

FDMA - Frequency Division Multiple Access

- Sistemas SCPC/FDMA

Aplicações

- ligações ponto-a-ponto do serviço fixo, de muito pequena capacidade



Exemplo de sistema SCPC/FDMA para pequenas estações terrestres

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Nesta configuração, o acesso das estações terrestres ao satélite faz-se em SCPC, nos sistemas mais recentes com portadoras com modulação digital.

A ligação estação central-satélite pode fazer-se do mesmo modo, isto é, em SCPC (como mostra a figura), ou, em alternativa, usando uma única portadora modulada com um sinal TDM, competindo então às estações terrestres identificar neste sinal TDM o canal que lhes diz respeito.

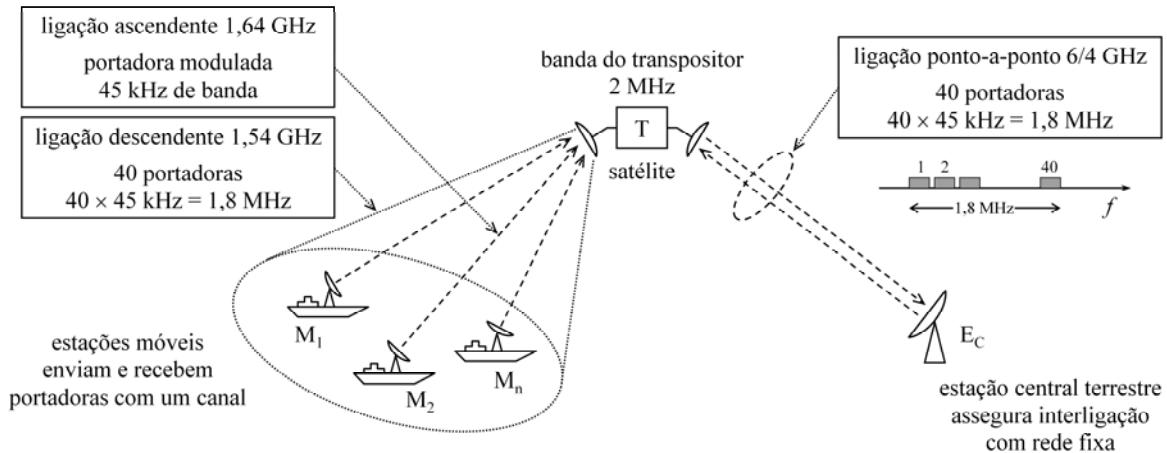
Acesso a satélites

FDMA - Frequency Division Multiple Access

- Sistemas SCPC/FDMA

Aplicações

- comunicações móveis de voz/dados



Exemplo de sistema SCPC/FDMA para serviço móvel marítimo

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Esta configuração é idêntica à anterior.

Acesso a satélites

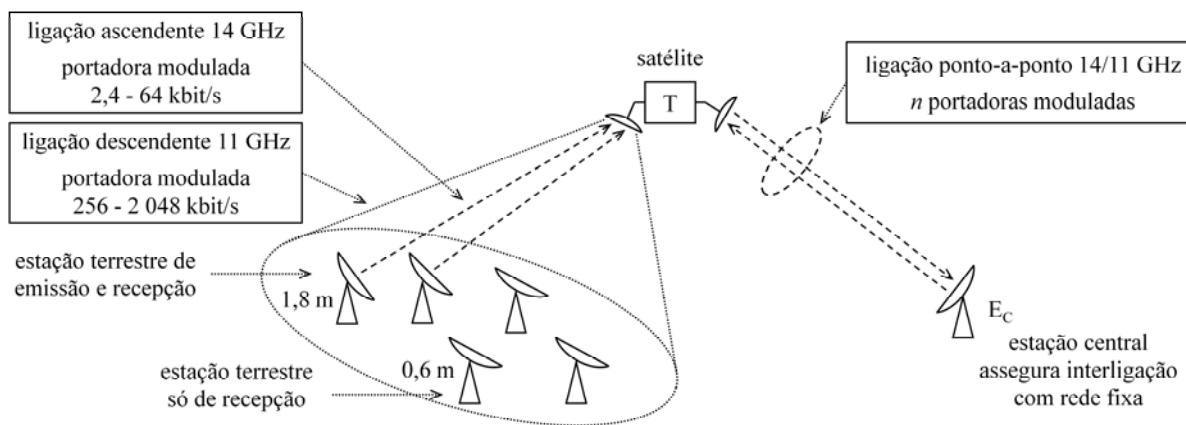
FDMA - Frequency Division Multiple Access

• Sistemas SCPC/FDMA

Aplicações

- comunicações empresariais de voz/dados/tele-serviços RDIS

com terminais VSAT
Very Small Aperture Terminal



Exemplo de sistema SCPC/FDMA com terminais VSAT

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A designação VSAT exprime a possibilidade de se utilizarem antenas de pequenas dimensões para permitir o acesso de terminais a redes de comunicação em aplicações empresariais.

Em certos cenários, as estações terrestres apenas precisam de receber sinais difundidos pelo satélite, usando-se neste caso antenas de menores dimensões do que no caso de estações de emissão-recepção.

Acesso a satélites

FDMA - Frequency Division Multiple Access

- Sistemas TDM/PSK/FDMA

designação Intelsat:
IDR - Intermediate Data Rate carrier

Emissão e Recepção

- portadoras com modulação digital de sinais em banda base TDM com débitos até 45 Mbit/s
- interconexão entre estações idêntica a FDM/FM/FDMA

Plano de frequências

- banda do transpositor 36 MHz ou superior
- atribuição de banda
 - canais com bandas compatíveis com os débitos suportados

Método de acesso aos recursos

- acesso fixo, de um modo geral

reduz-se a complexidade com
prejuízo da eficiência

Aplicações

- evolução de sistemas analógicos FDM/FM/FDMA sistemas digitais TDM/FDMA
 - ligações ponto-a-ponto do serviço fixo, de pequena/média capacidade
- novos serviços digitais
 - ligações Internet

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A configuração TDM/PSK/FDMA tem vindo a ser utilizada em ligações ponto-a-ponto do serviço fixo, de média capacidade, permitindo custos mais baixos do que os sistemas TDMA.

O acesso fixo é uma solução adequada a aplicações em que a capacidade é atribuída de forma semi-permanente.

Neste sistema, por se basear em FDMA, não se faz normalmente a atribuição dinâmica de capacidade, pois iria exigir ajustes da largura de banda, o que se tornaria complexo. Note-se que esta complexidade não existe no caso já referido de SCPC/FDMA, em que é relativamente simples efectuar uma atribuição dinâmica de recursos, sem haver ajustes na largura de banda dos canais (a banda de um canal é unicamente atribuída ou não).

Acesso a satélites

TDMA - Time Division Multiple Access

• Sistemas TDMA

banda base digital:
é necessário memorizar dados

Emissão

- cada estação acede ao transpositor em exclusivo num intervalo de tempo, na sua vez
- transmite uma "rajada" de bits modulando a sua portadora
- a sequência das transmissões de todas estações constitui uma trama

Recepção

- a estação recupera a portadora e relógio de cada rajada da trama
- identifica a origem de cada uma das rajadas
- selecciona os sinais em banda base que lhe dizem respeito

Plano temporal

- cada estação utiliza um ou vários intervalos de tempo
- o número ou a duração dos intervalos é ajustável de acordo com a capacidade requerida

Método de acesso e partilha dos recursos

- acesso fixo (PA-TDMA)
- acesso a pedido (DA-TDMA)
- interpolação de voz (DSI , *Digital Speech Interpolation*)

método mais simples

métodos que permitem maior eficiência

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Em TDMA, a possibilidade de ajustar dinamicamente o número e duração dos intervalos de tempo das rajadas de cada estação permite a implementação de técnicas de acesso a pedido. Nestas técnicas, há uma estação de controlo que assume um papel central, autorizando os pedidos e coordenando globalmente a atribuição de intervalos de tempo às estações que participam no sistema.

Além disso, a utilização obrigatória de técnicas digitais em TDMA, nomeadamente em serviços de comunicações de voz, permite a aplicação de uma outra técnica através da qual, nos períodos de pausas de conversação, os canais de satélite são libertados para serem utilizados por outras comunicações. Esta técnica, denominada DSI, *Digital Speech Interpolation* (interpolação de voz), pressupõe o estabelecimento de um período de tempo a partir do qual se considera que não há actividade no canal se o nível de sinal estiver sempre abaixo de um dado limiar (de desactivação); e o estabelecimento de um outro período de tempo (curto) a partir do qual se considera que há actividade no canal se o nível de sinal estiver sempre acima de um outro limiar (de activação). Neste processo estatístico de tomada e libertação de canais de satélite, há sempre uma certa probabilidade de o número de canais terrestres que requerem activação exceder os canais de satélite disponíveis, o que acarretará cortes mais ou menos longos na conversação entre utilizadores. A técnica DSI permite ganhos típicos entre 2 e 2,5 (relação entre o número de canais de satélite e o número de canais terrestres).

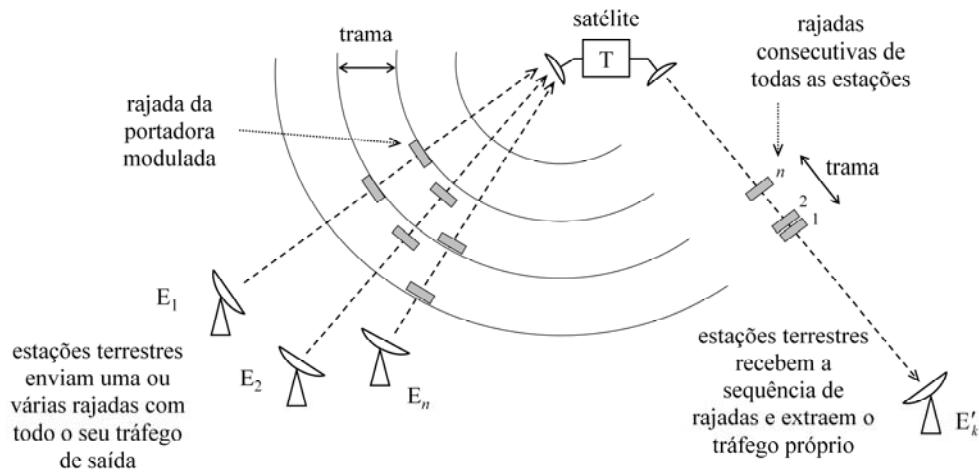
Mais recentemente, a técnica DSI tem vindo a ser utilizada em conjunto com ADPCM a 32 kbit/s ou outras técnicas de compressão, permitindo duplicar, pelo menos, o ganho total. Este sistema é conhecido por DCME (*Digital Circuit Multiplication Equipment*).

Acesso a satélites

TDMA - Time Division Multiple Access

- Sistemas TDMA

Operação de um sistema TDMA



Emissão e recepção num sistema TDMA
(representado apenas um sentido de transmissão)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Note-se que, em TDMA, a temporização das emissões de rajadas das estações é definida de modo a que à entrada do transpositor do satélite as rajadas de todas as estações estejam em sequência, sem sobreposição nem intervalos excessivos (apenas um certo tempo de guarda entre rajadas adjacentes). Isto implica que a temporização de uma dada estação resulte não só da posição relativa da sua rajada na sequência de rajadas TDMA, mas também da distância a que a estação se encontra do satélite.

Acesso a satélites

TDMA - Time Division Multiple Access

• Sistemas TDMA

Sincronização da transmissão TDMA

- estação de controlo envia rajadas de referência da trama TDMA
- estações participantes sincronizam-se com a estação de referência tendo em conta
 - sequência da estação na trama
 - distância da estação ao satélite
- método de auto-sincronização método mais simples
 - aplicável se a estação terrestre "ouve" as suas próprias transmissões
 - a estação envia rajadas de baixa potência (sem interferir com as transmissões em curso)
 - recebe o "eco" do satélite
 - mede a sua temporização relativamente à rajada de referência
 - em operação normal, ajusta continuamente a temporização
- método de sincronização cooperativo método mais seguro
 - medidas de temporização relativa efectuadas numa estação de controlo
 - valores são transmitidos a todos as outras estações, para ajustarem as suas transmissões
 - estação de controle pode retirar de serviço as estações que não cumpram os valores

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

O método de auto-sincronização, mais simples mas menos seguro, é utilizado sobretudo em redes com um grande número de estações de pequena dimensão, em que as preocupações de custos são determinantes.

O método de sincronização cooperativa, mais complexo mas mais seguro, é preferido nas aplicações de grande capacidade da rede fixa, nas quais as estações já têm, de qualquer modo, um nível de complexidade elevado.

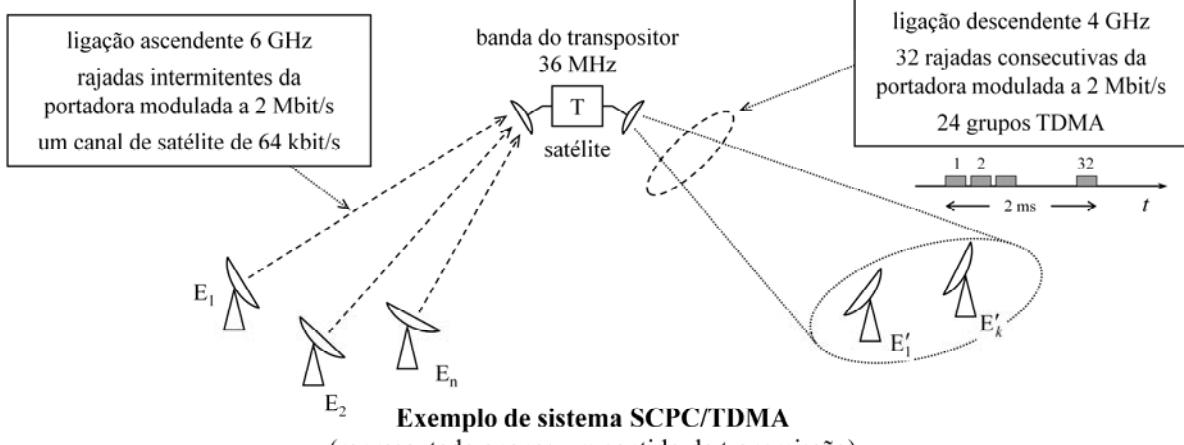
Acesso a satélites

TDMA - Time Division Multiple Access

• Sistemas SCPC/TDMA

Aplicações

- serviço fixo pequena capacidade
- comunicações móveis
- redes empresariais (VSAT)



Exemplo de sistema SCPC/TDMA

(representado apenas um sentido de transmissão)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Neste sistema, opera-se em TDMA em cada uma de 24 sub-bandas em que se divide a banda total do transpositor. Por combinar os métodos FDMA e TDMA, aplica-se frequentemente a designação F-TDMA.

Em cada grupo TDMA, há, no máximo, 32 estações a transmitir, cada uma, um tráfego de 64 kbit/s. A trama TDMA tem um período de 2 ms, o que significa que, em cada rajada, são transmitidos 16 octetos de tráfego de utilizador, a um débito de cerca de 2 Mbit/s.

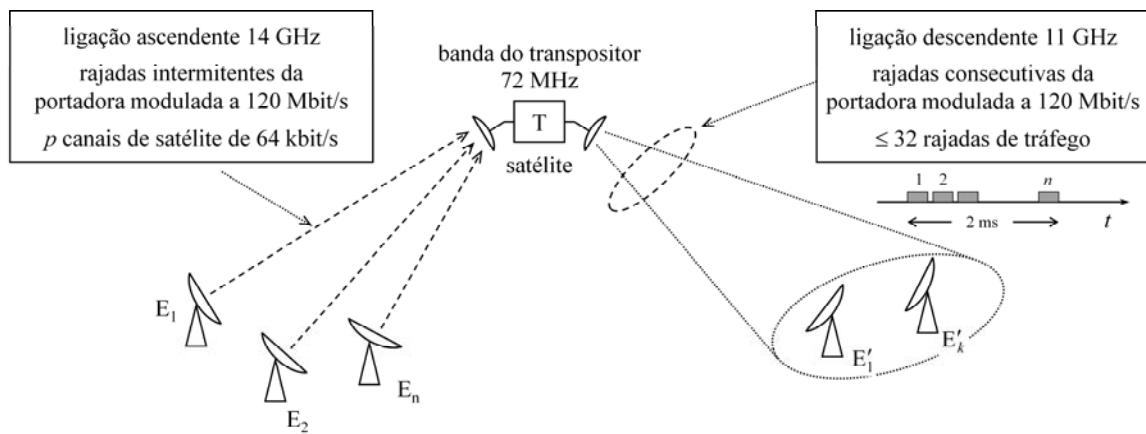
Acesso a satélites

TDMA - Time Division Multiple Access

- Sistemas TDM/PSK/TDMA

Aplicações

- ligações TDM ponto-a-ponto da rede fixa, de grande capacidade



Exemplo de sistema TDM/TDMA
(representado apenas um sentido de transmissão)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

O sistema representado nesta e nas páginas seguintes refere-se a satélites Intelsat, o qual, por sua vez, exibe muitas características comuns a outros sistemas.

Cada estação terrestre suporta um certo número de canais de satélite, embora, como foi discutido anteriormente, possa ser suportado um maior número de conexões de canais terrestres, se forem utilizadas as referidas técnicas de interpolação de voz.

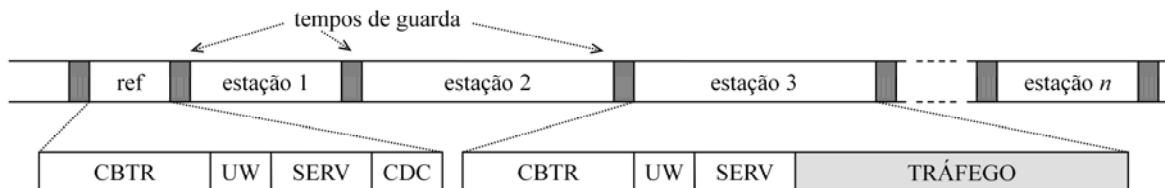
Acesso a satélites

TDMA - Time Division Multiple Access

- Sistemas TDM/PSK/TDMA

Estrutura da trama TDMA

- uma rajada de referência (ou duas, transmitidas por duas estações, para redundância)
- sequência de rajadas com tráfego das estações, separadas por tempos de guarda



CBTR - *Carrier and Bit Timing Recovery*

- sequência de bits para sincronização da portadora e da recuperação de relógio bit

UW - *Unique Word*

- palavra de alinhamento da transmissão série

SERV - Serviço

- indicação da estação, comunicações de serviço

CDC - *Control and Delay Channel*

- controlo da temporização entre estações

Exemplo de estrutura de trama num sistema TDMA

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A recuperação de sincronismo de portadora e de relógio de bit terá de ser executada em cada rajada, pelo que o próprio sistema transmite uma sequência de símbolos no campo CBTR (*Carrier and Bit Timing Recovery*) para facilitar o processo e torná-lo muito rápido.

A transmissão da sequência UW (*Unique Word*) evita a necessidade de utilizar codificação PSK diferencial, já que a ambiguidade de fase pode ser removida procurando a ocorrência do padrão de bits associado a UW, nas diversas fases possíveis (quatro, no caso de QPSK).

No campo CDC (*Control and Delay Channel*) executa-se o protocolo de sincronização cooperativo entre estações.

Acesso a satélites

CDMA - Code Division Multiple Access

- Sistemas CDMA

Emissão

- o terminal transmite logo que tenha dados disponíveis
- cada bit é modulado por uma sequência de pseudo-aleatória de bits (código ou chave) atribuída ao terminal (tipicamente constituída por 100 a 10 000 bits)
- o sinal resultante é assim espalhado numa banda muito maior do que a necessária para transmitir o sinal original (*spread spectrum*)

Recepção

- a mesma sequência é utilizada para reagrupar o sinal recebido e recuperar os dados
- os sinais de outros utilizadores constituem interferências sobre o sinal recebido

Atribuição de códigos

- cada estação tem um código ortogonal ao das outras estações, para minimizar a interferência

Método de acesso aos recursos

- acesso fixo
- acesso a pedido

não requer coordenação entre utilizadores, a não ser a atribuição de códigos ortogonais entre si

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A grande vantagem do CDMA é a possibilidade de operar sem necessidade de coordenação entre as estações: não é necessário nenhum método de atribuição de banda ou intervalos de tempo, nem se exige sincronização.

A entrada em modo de transmissão de um novo utilizador apenas aumenta a interferência sobre os outros utilizadores, não existindo, por isso, um limite rígido para a capacidade. Da mesma forma, o sistema aproveita intrinsecamente os períodos de pausa, nos quais, não havendo transmissão, a interferência reduz-se, permitindo a entrada de outros utilizadores: por isso, são dispensáveis os métodos de gestão dinâmica de recursos, como o DS1.

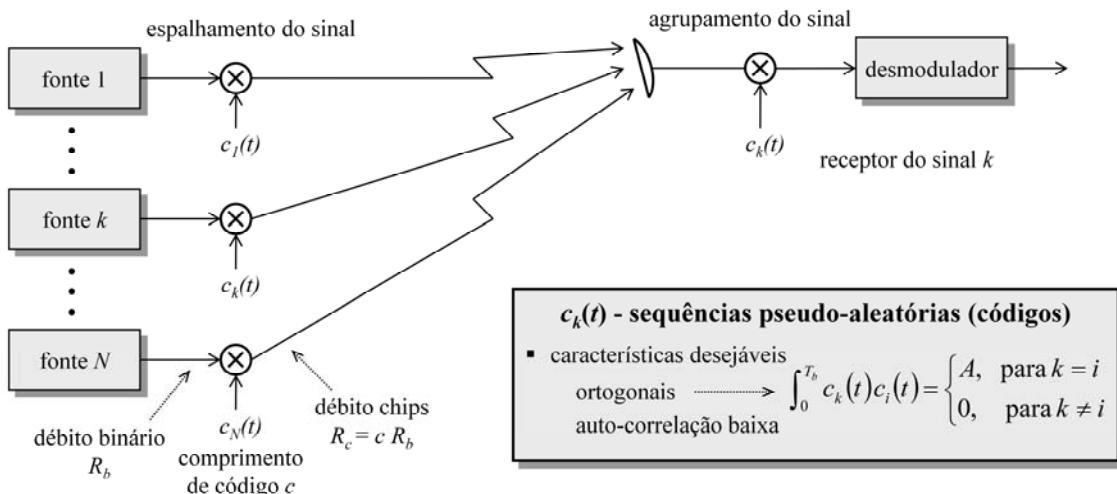
Veremos já de seguida algumas desvantagens.

Acesso a satélites

CDMA - Code Division Multiple Access

- Sistemas CDMA

Operação de um sistema CDMA



Multiplexagem de canais em CDMA

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Conforme está indicado na figura, após a multiplicação pelo código, o sinal transmitido tem um débito e, consequentemente, uma largura de banda, muito maiores do que o original.

Os códigos são sequências pseudo-aleatórias (PRS, *pseudo-random sequence*), também designadas de sequências de pseudo-ruído (PN, *pseudo-noise*).

A ortogonalidade entre os códigos garante que não haverá correlação entre os sinais dos vários canais, constituindo apenas interferência mútua, com as propriedades do ruído branco.

A auto-correlação baixa permite sincronizar a detecção no receptor de um dado canal, que usa o mesmo código empregue no correspondente emissor. Para este efeito, fazem-se deslocamentos chip a chip no receptor até ser obtido um sinal acima de um nível de referência (como a auto-correlação é baixa, enquanto os chips recebidos não estiverem alinhados com o código no receptor, não haverá sinal detectado). Um problema é que, para sequências muito longas, este processo pode ser relativamente demorado.

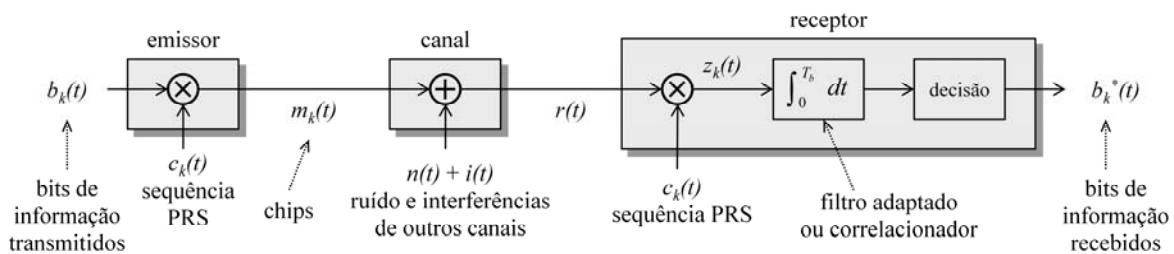
Para lidar com diferentes débitos de fonte, altera-se normalmente o comprimento dos códigos de modo a garantir um débito de chips constante: o processo apresenta, contudo, limitações para débitos mais elevados, podendo optar-se por atribuir múltiplos códigos à mesma fonte, de modo a disponibilizar dois ou mais canais para suportar uma única conexão de alto débito.

Acesso a satélites

CDMA - Code Division Multiple Access

- Sistemas CDMA

Operação de um sistema CDMA



Modelo de um sistema CDMA em banda base

$$r(t) = c_k(t)b_k(t) + n(t) + i(t) \xrightarrow{\text{mesma potência na recepção}} i(t) = \sum_{i \neq k} c_i(t)b_i(t)$$

$$z_k(t) = c_k(t)r(t) = c_k^2(t)b_k(t) + c_k(t)[n(t) + i(t)] = b_k(t) + c_k(t)[n(t) + i(t)]$$

$$b_k^*(t) = b_k(t) \quad \text{se não existirem erros}$$

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A dedução acima demonstra a capacidade de recuperar os dados num sistema CDMA. Na presença de ruído e, em especial, de outros sinais interferentes no mesmo sistema, que ocupam a mesma banda, o filtro adaptado, ao fim do tempo T_b de bit, apresentará à saída um nível correspondente ao sinal original, mais uma componente aleatória de média nula. A remoção dos termos indesejáveis é possível, precisamente pelo facto de os códigos serem ortogonais. O dispositivo de decisão removerá este termo aleatório, regenerando o sinal original, eventualmente com erros.

Deve notar-se que a situação ideal só ocorrerá se os sinais de todos os canais forem recebidos com a mesma potência. Caso contrário, haverá sinais que dominam no receptor, reduzindo significativamente a capacidade de recepção dos sinais mais débeis.

A condição de potências equivalentes na recepção só pode ser garantida com um sistema relativamente complexo de controlo adaptativo da potência transmitida, o que constitui um inconveniente do CDMA.

Note-se que no sinal $r(t)$ que chega ao receptor, a potência do sinal desejado pode estar muito abaixo da potência de ruído e interferências. Isto é, em sistemas com espalhamento de banda, o sinal pode estar "escondido" por baixo de outros sinais, o que do ponto de vista de segurança constitui uma vantagem enorme para certas aplicações, nomeadamente militares.

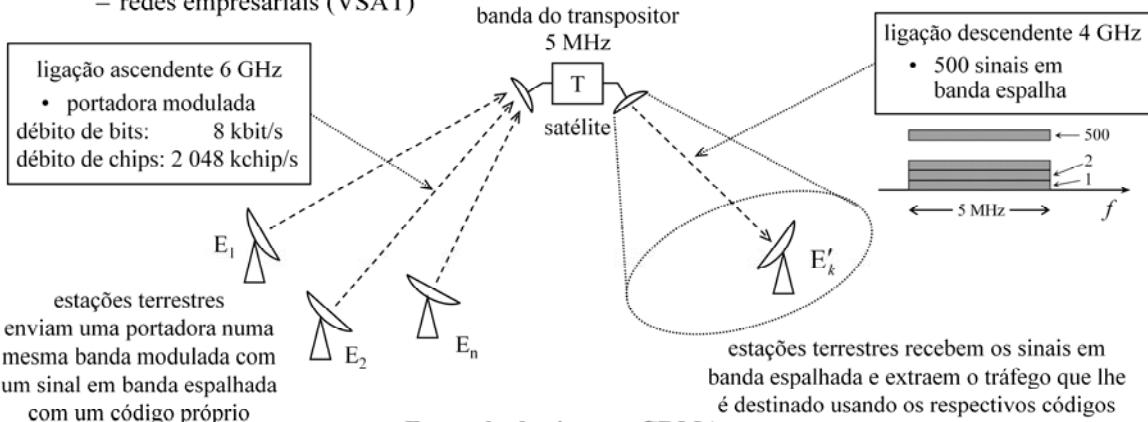
Acesso a satélites

CDMA - Code Division Multiple Access

• Sistemas CDMA

Aplicações

- serviço fixo pequena capacidade
- comunicações móveis
- redes empresariais (VSAT)



Exemplo de sistema CDMA

(representado apenas um sentido de transmissão)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A figura ilustra uma aplicação de um sistema CDMA que utiliza códigos de 256 bits. Cada sinal de 64 kbit/s é espalhado numa banda de 5 MHz, sendo reagrupado no receptor com o código respectivo.

Acesso a satélites

Satélites digitais

Tipos de transpositores

- transpositores de tipo *bent pipe* ("tubo encurvado")
 - funções de amplificação e transposição de frequência
 - utilizados em ligações analógicas (necessariamente) e em ligações digitais
- transpositores digitais
 - processamento de sinais a bordo
 - utilizados em ligações digitais

ruido cumulativo na ligação

diversas optimizações do sistema

Processamento a bordo

- regeneração e correcção de erros FEC
- reconfiguração de recursos do satélite
- comutação dinâmica de feixes
- multiplexagem de conteúdos no satélite

ganho de alguns dB

flexibilidade de alteração de cobertura e serviços

aumento substancial da capacidade do sistema

melhor exploração de redes de difusão de TV e dados

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A introdução de satélites regenerativos apresenta um conjunto de vantagens equivalentes às existentes nos feixes hertzianos terrestres, quando os repetidores passam a ser regenerativos.

Há, contudo outros benefícios a ter em conta, nomeadamente em termos de flexibilidade de reconfiguração semi-permanente de recursos de satélite, que requer capacidade de interconexão a bordo:

- nos satélites não regenerativos, a interconexão faz-se no domínio das frequências, em RF ou IF, envolvendo toda a banda dos transpositores, ou em sub-bandas (nunca muito estreitas), recorrendo a baterias de filtros com alguma complexidade;
- nos satélites regenerativos, o processamento digital a bordo baseado em matrizes de comutação temporal permite maior simplicidade e grande flexibilidade, com excelente granularidade, até ao nível do canal de satélite.

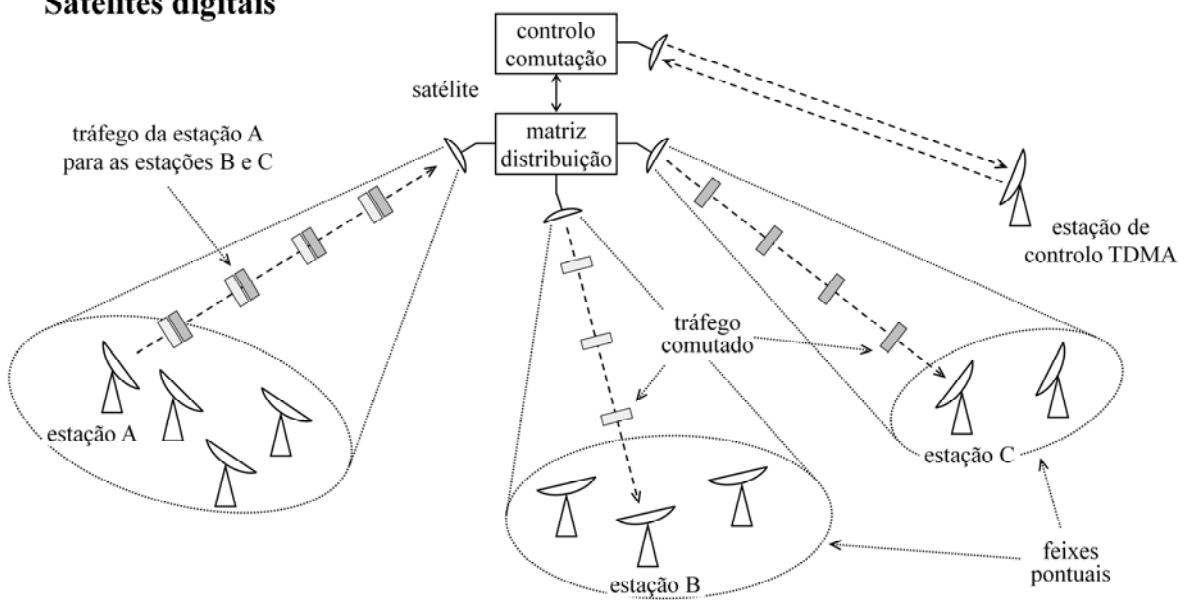
A comutação dinâmica em satélites TDMA é outro avanço significativo, discutido em mais detalhe na página seguinte.

Em geração mais recentes de satélites digitais, tem sido explorada a capacidade de agregar directamente no satélite conteúdos de informação, especialmente programas de televisão em MPEG-2, mas também outros conteúdos, como tráfego Internet:

- nos satélites não regenerativos, os pacotes digitais de programas de televisão são constituídos em cada estação terrestre de emissão → exige meios adicionais de transporte para transferir os programas dos locais de produção de conteúdos para os locais onde se faz a emissão da ligação ascendente;
- nos satélites regenerativos, existe a possibilidade de os programas serem individualmente transmitidos para o satélite directamente a partir do respectivo local de produção, com estações de pequena dimensão, já que as ligações são de débito relativamente baixo (da ordem dos 4-5 Mbit/s) → permite efectuar directamente no satélite a composição dos pacotes digitais.

Acesso a satélites

Satélites digitais



Princípio da comutação de feixes
(representado apenas um sentido de transmissão)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A comutação dinâmica de feixes é utilizada em satélites TDMA e baseia-se nos seguintes princípios (explicação referida à figura):

- no sistema TDMA convencional, se a estação A pretendesse transmitir para as estações B e C, o feixe descendente teria de ter uma cobertura alargada, que abrangesse simultaneamente as estações B e C;
- em alternativa, neste sistema, o satélite disponibiliza feixes pontuais para cobertura de regiões muito mais limitadas no espaço;
- as rajadas da estação A, que contêm sub-rajadas destinadas às estações B e C (e eventualmente outras), são agora comutadas no satélite, de forma a encaminhar o tráfego para os feixes pontuais respectivos.

As vantagens deste sistema são múltiplas:

- ao utilizar feixes pontuais, o ganho das antenas do satélite é maior, logo aumenta o EIRP e o G/T dos sub-sistemas do satélite, ou em alternativa, permite reduzir as potências de transmissão;
- como os feixes pontuais estão separados geograficamente, aumenta a capacidade global de reutilização de frequências.

Esta separação espacial explora uma nova dimensão no processo de acesso múltiplo. Por isso, esta técnica é muitas vezes designada de acesso múltiplo por divisão de espaço (SDMA, *Space Division Multiple Access*), sendo o equivalente da divisão em células utilizada em redes de comunicação móvel.

Acesso a satélites

Comparação entre sistemas de acesso

Características	Técnica de acesso múltiplo		
	FDMA	TDMA	CDMA
tecnologia	simples e dominada há largos anos	mais complexa, nomeadamente em termos de controlo global, mas actualmente dominada	a mais complexa de todas
sincronização entre estações	não necessária	↑ crítica para o bom funcionamento do sistema	não necessária
intermodulação entre canais	introduzida pelo transpositor, sobretudo à saída do amplificador de potência	só está presente uma portadora no transpositor: o canal pode ser igualizado	↑ introduzida pelo transpositor, sobretudo à saída do amplificador de potência
eficiência de potência	mais baixa: o transpositor tem de operar abaixo da saturação	elevada: o transpositor pode operar próximo da saturação	↑ mais baixa: o transpositor tem de operar abaixo da saturação
controlo de potência da ligação ascendente	necessária em ligações muito afectadas por interferências por intermodulação	não necessária	↑ necessária em todas as ligações para não privilegiar nenhum canal
memorização de informação	não necessária	↑ necessário armazenar grandes quantidades de informação: aumenta o atraso total	não necessária

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Esta tabela e a seguinte resumem as principais características das técnicas de acesso já analisadas, agora numa perspectiva de comparação em que se destacam vantagens e desvantagens relativas.

Não é possível eleger nenhuma técnica fora do contexto concreto, já que continuam a ter as suas áreas próprias de aplicação, em que as suas vantagens são decisivas e as desvantagens menos relevantes.

Acesso a satélites

Comparação entre sistemas de acesso

Características	Análise comparativa de FDMA, TDMA e CDMA		
	FDMA	TDMA	CDMA
capacidade total do sistema	limite rígido imposto pela banda total do sistema	limite rígido imposto pelo débito total do sistema	limitado apenas pela interferência aceitável, mas sem limite rígido de canais ↑
capacidade dos canais de tráfego	permite canais de banda larga, desde que não seja ultrapassada a banda total do sistema ↑	permite canais de débito elevado, desde que não seja ultrapassado o débito total do sistema ↑	difícil suportar canais de débito mais elevado: exige, por exemplo, códigos múltiplos ↑
ajuste dinâmico de tráfego	difícil ajustar dinamicamente o tráfego: exige emissão e recepção com banda variável	fácil ajustar dinamicamente o tráfego: basta atribuir intervalos de tempo de maior ou menor duração ↑	fácil ajustar dinamicamente o tráfego: basta variar o comprimento do código utilizado pelo canal ↑
aproveitamento de pausas de comunicação	difícil gerir a activação / desactivação canais para aproveitar as pausas	utilizadas técnicas de interpolação de voz (DSI , Digital Speech Interpolation) ↑	aproveitamento intrínseco: basta não transmitir o sinal para reduzir a interferência sobre outros canais ↑
reconfiguração de tráfego no satélite	difícil reconfigurar cobertura e serviços: interconexão complexa no domínio das frequências	fácil reconfigurar cobertura e serviços: interconexão simples no domínio dos tempos ↑	relativamente difícil reconfigurar cobertura e serviços: exige descodificar todos os canais ↑
comutação dinâmica a bordo	praticamente inviável	permite comutação dinâmica do tráfego entre estações: comuta rajadas de tráfego ↑	pouco adaptado a técnicas de comutação a bordo: exige descodificar todos os canais ↑

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Acesso a satélites

Resumo de serviços por satélite *versus* sistemas de acesso

		Sinal analógico transmitido						
		Monocanal telefonia		FDM		TV		
Acesso simples	Serviços			FDM / FM	serviço fixo de grande capacidade	SCPC / FM	contribuição ou distribuição de programas	
	Formas de acesso				acesso fixo		acesso fixo	
FDMA	Serviços	SCPC / FM / FDMA	serviço fixo de pequena capacidade	FDM / FM / FDMA	serviço fixo de média ou grande capacidade			
	Acesso		comunicações móveis		acesso fixo			
TDMA	Serviços							
	Formas de acesso							
CDMA	Serviços							
	Formas de acesso							

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Esta tabela e a seguinte sintetizam a aplicação dos sistemas de acesso aos diversos tipos de serviço considerados.

Quando se analisa as técnicas de acesso para cada tipo de serviço eliminam-se algumas possibilidades sem interesse prático, continuando a existir casos em que as técnicas de acesso competem entre si, para um dado tipo de serviço.

Acesso a satélites

Resumo de serviços por satélite *versus* sistemas de acesso

		Sinal digital transmitido					
		Monocanal telefonia / dados		TDM		TV	
Acesso simples	Serviços			TDM / PSK	serviço fixo de grande capacidade	SCPC / PSK ou MCPC / PSK	contribuição ou distribuição de programas
	Formas de acesso				acesso fixo		
FDMA	Serviços	SCPC / PSK / FDMA	serviço fixo de pequena capacidade comunicações móveis VSAT	TDM / PSK / FDMA	serviço fixo de média ou grande capacidade		
	Acesso		acesso fixo ou a pedido		acesso fixo		
TDMA	Serviços	SCPC / PSK / TDMA	serviço fixo de pequena capacidade comunicações móveis VSAT	TDM / PSK / TDMA	serviço fixo de média ou grande capacidade		
	Formas de acesso		acesso fixo ou a pedido		acesso fixo ou a pedido		
CDMA	Serviços	SCPC / PSK / CDMA	serviço fixo de pequena capacidade comunicações móveis VSAT				
	Formas de acesso		acesso fixo ou a pedido				

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A tendência é, naturalmente, de evolução para os sistemas digitais reflectidos neste quadro.

Segmento do satélite

Subsistemas do satélite

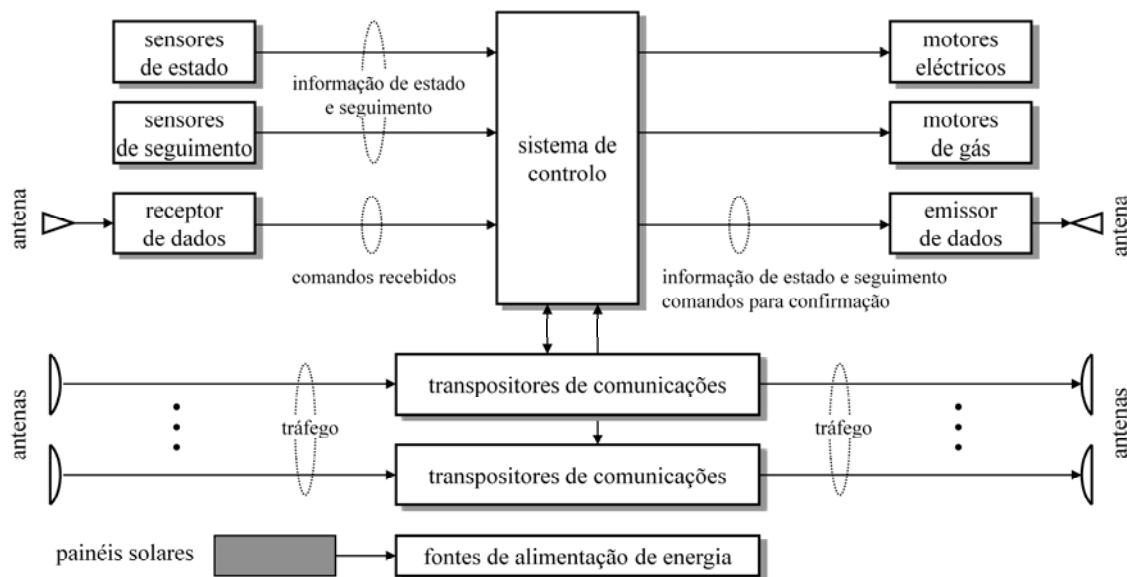


Diagrama-blocos simplificado de um satélite típico de telecomunicações

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Analisaremos os seguintes subsistemas de um satélite de telecomunicações:

- subsistema de controlo de atitude e órbita;
- subsistema de telemetria, seguimento e comando;
- subsistema de alimentação de energia;
- subsistemas de comunicação.

Segmento do satélite

Subsistema de controlo de atitude e órbita

- Atitude do satélite ← correcção a menos de $\pm 0,1^\circ$ em cada eixo

Sistema de estabilização de três eixos

- três discos giratórios, (um por eixo) ou um disco montado em engrenagens giratórias
- um motor de gás por cada eixo (polarizam o momento angular dos discos)

Sistema de estabilização por rotação do corpo do satélite

motores eléctricos
geram efeito giroscópico

- o corpo do satélite roda em torno do seu eixo
- as antenas e subsistemas de comunicações rodam relativamente ao corpo do satélite por forma a apontarem para a Terra permanentemente
- dois motores de gás permitem correcções nas direcções perpendiculares à do eixo do satélite

- Órbita do satélite ← correcção da posição a menos de $\pm 0,1^\circ$
 $(\pm 75 \text{ km})$ da situação nominal

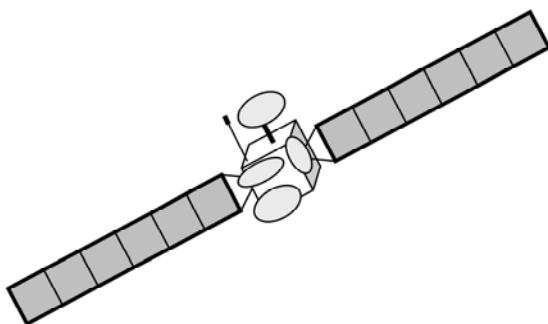
- não podem ser usados discos de momento controlados electricamente
- são usados motores de gás para criar acelerações lineares

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

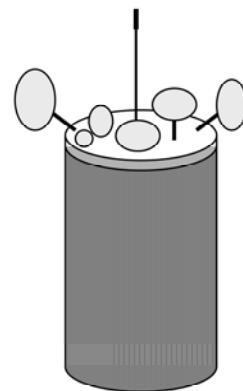
Este subsistema é constituído por motores de gás destinados a mover o satélite para a sua órbita correcta, quando forças externas o desviam da sua posição normal, e motores de gás ou motores eléctricos com efeito giroscópico que controlam a atitude (orientação) do satélite.

Segmento do satélite

Subsistema de controlo de atitude e órbita



Satélite com estabilização de três eixos



Satélite com estabilização por rotação do corpo do satélite

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

O tipo de estabilização de um satélite é imediatamente reconhecido pela forma geral do satélite:

- satélite com estabilização de três eixos: corpo de tipo paralelepípedico, antenas nas faces e painéis solares planos e orientáveis (ver sistema de alimentação de energia);
- satélite com estabilização por rotação do corpo do satélite: corpo cilíndrico de grandes dimensões revestido de células solares, com antenas montadas numa plataforma situada numa das bases.

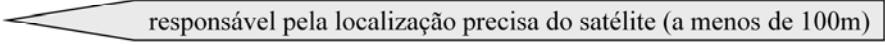
Segmento do satélite

Telemetria, seguimento e comando (TT&C, Telemetry, Tracking and Command)

- Telemetria  responsável pelo envio de informação de sensores no satélite

Informação de estado

- combustível
- tensão e corrente na fonte
- tensão e corrente em cada parte crítica do subsistema de comunicações
- temperatura

- Seguimento  responsável pela localização precisa do satélite (a menos de 100m)

Informação de seguimento

- medidas no satélite de sensores de aceleração, de velocidade e de pontaria para a Terra
- observação terrestre do efeito Doppler na portadora de TT&C (ver adiante)
- medidas angulares precisas efectuadas em estações terrestres
- radar (o satélite é o alvo que opera como repetidor activo)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Estes sistemas estão parcialmente no satélite e na estação terrestre de controlo.

O sistema de telemetria envia para a estação de controlo informação de vários sensores do satélite, que monitoram o funcionamento dos sistemas mais importantes.

O sistema de seguimento, embora se considere associado ao segmento do satélite, está efectivamente situado na estação terrestre de controlo. Destina-se a obter estimativas dos elementos orbitais do satélite, a partir de diversos tipos de parâmetros medidos no satélite e na Terra. Através destes parâmetros será possível calcular a elevação, azimute e distância do satélite em relação a qualquer estação terrestre. Recolhe ainda informação de sensores de pontaria do satélite para a Terra.

Segmento do satélite

Telemetria, seguimento e comando (TT&C, Telemetry, Tracking and Command)

- Comando

responsável pela execução de acções no satélite

Acções de comando

- alterações da altitude e órbita
- controlo do subsistema de comunicações (antenas e transpositores)
- controlo das manobras de entrada na órbita nominal

Protocolo de comando

- garantia de segurança
- operação típica
 - o comando é convertido numa palavra de código que é enviada para o satélite
 - o satélite verifica a validade da palavra e repete-a para Terra
 - a estação terrestre confirma a palavra e envia um comando de execução

Sistema de transmissão da informação de TT&C

- portadora modulada digitalmente em PSK ou FSK
- débito baixo para permitir obter elevado S/N
- bandas utilizadas: UHF, banda S, banda C

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

O sistema de comando processa a informação de telemetria e seguimento e envia comandos para os motores do satélite, de forma a corrigir a posição e altitude do satélite. Controla ainda a pontaria das antenas e a configuração dos transpositores, de acordo com os requisitos de tráfego. A fiabilidade destas operações é assegurada através de um protocolo baseado em confirmações.

A transmissão de dados dos sensores e de comandos entre a estação de controlo e o satélite suporta-se numa ligação independente, com redundância. Na fase de lançamento do satélite, a ligação principal poderá não estar operacional, recorrendo-se então a ligações alternativas em UHF com antenas quase omnidireccionais.

Segmento do satélite

Alimentação de energia

Fonte primária de alimentação: painéis solares

- intensidade da radiação: 1,39 kW/m²
- eficiência: 10 a 15% (decrece com a idade devido ao bombardeamento de partículas)

Satélite com estabilização por rotação

- corpo cilíndrico revestido de células solares

Satélite com estabilização de três eixos

- painéis planos abertos quando o satélite entra na órbita geoestacionária
- para a mesma potência, os painéis planos requerem 1/3 da área do corpo cilíndrico
- os painéis planos estão sujeitos a maiores temperaturas e bombardeamentos de partículas

Alimentação durante os eclipses

- o satélite transporta baterias de reserva
- alguns subsistemas de comunicação (ex.: TV) são desligados
- se possível, os satélites são normalmente colocados a 20°W da região de cobertura para que o eclipse se dê por volta da 1 hora da madrugada

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Todos os componentes do satélite são alimentados por células solares. A maior parte da energia é utilizada pelo subsistema de comunicações, e em especial pelos seus emissores.

Segmento do satélite

Subsistema de comunicação

• Transpositores *transponder:* designação corrente para um repetidor de satélite

- para evitar sinais de banda muito larga recorre-se a vários transpositores (ex.:6, 12, 20, 24)
- cada transpositor tem uma banda reservada no plano de frequências (ex.:36, 40 ou 72 MHz)
- cada transpositor fica associado a uma única ou a um conjunto de estações terrestres
- características mais importantes
 - boa rejeição de frequências fora da banda (outros canais e produtos de intermodulação)
 - boa linearidade da resposta em amplitude e fase
 - baixa distorção harmónica
 - potência de saída significativa

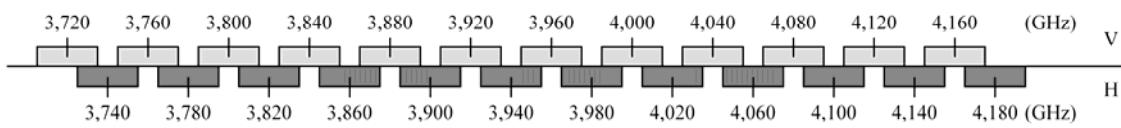
Exemplos de configurações

Bandas 6 / 4 GHz	Bandas 14 / 11 GHz
<ul style="list-style-type: none">• 500 MHz de banda total• 12 transpositores por polarização• 36 MHz banda / 40 MHz separação• reutilização de frequência e polarização• conversão de frequência simples	<ul style="list-style-type: none">• 260 MHz de banda total• 6 transpositores por polarização• 36 MHz banda / 40 MHz separação• reutilização de frequência e polarização• conversão de frequência dupla (14/11GHz)

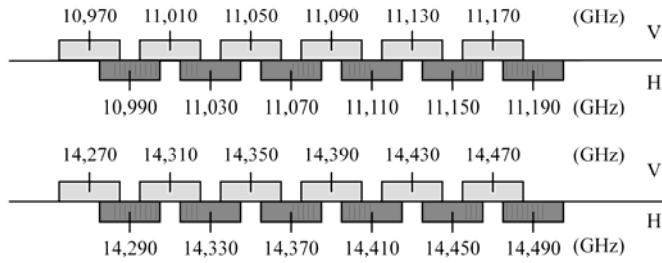
Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

O sistema de comunicações é a parte fundamental de um satélite de comunicações, e a parte restante do satélite tem como função dar suporte a este sistema. No entanto, o equipamento de comunicações representa apenas uma pequena percentagem do peso e volume do satélite.

Segmento do satélite



(a) Bandas 6 / 4 GHz



(b) Banda 14 / 11 GHz

Exemplos de planos de frequências e polarizações

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

A necessidade de rentabilizar o espectro obriga à reutilização de frequência e polarização. Desta forma, pode duplicar-se o número de transpositores em cada satélite em relação à situação de uma única polarização. O reverso desta optimização é o aumento significativo das interferências, em especial quando, numa dada região, são usadas polarizações ortogonais nas mesmas bandas.

Os sistemas correntes adoptam uma grande diversidade de planos de frequência e polarização. Contudo, uma característica muito comum, destinada a reduzir as interferências, consiste em fazer coincidir as frequências de uma dada polarização com as bandas de guarda da polarização ortogonal, como mostram os exemplos acima nas bandas de 6/4 GHz e 14/11 GHz.

Segmento do satélite

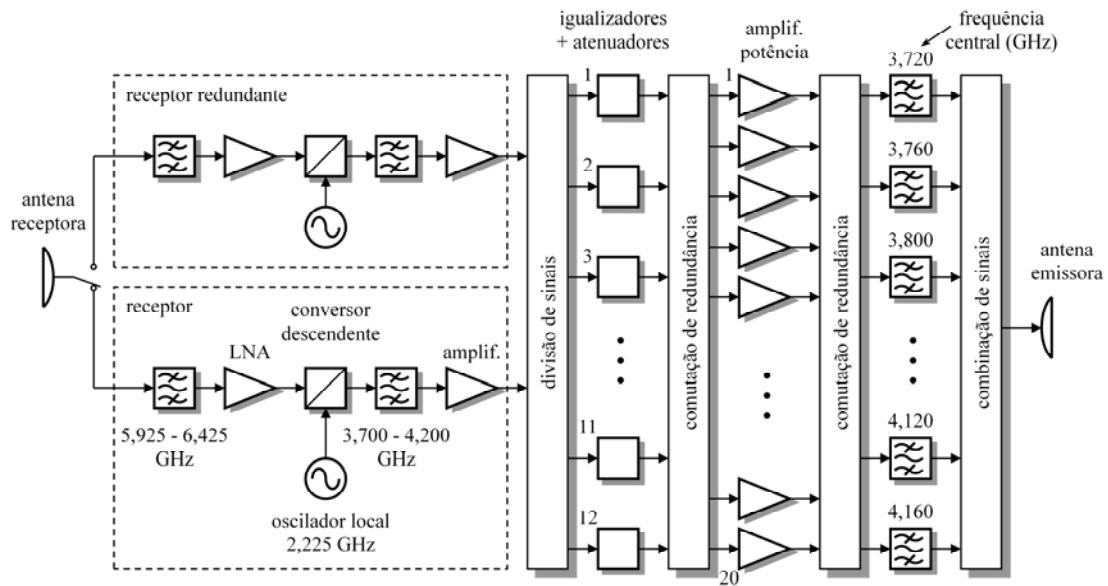


Diagrama-blocos simplificado do subsistema de comunicação com transpositores de conversão simples

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Os transpositores de conversão simples são os mais simples, mas têm piores características por efectuarem a maior parte da filtragem, amplificação e igualização à frequência relativamente alta correspondente à emissão.

O andar de entrada é um receptor de banda larga com um pré-amplificador de baixo ruído, normalmente com um FET de GaAs. É incluído um receptor de reserva que poderá ser utilizado se o outro ficar inoperacional. O ganho total do receptor, é repartido entre o pré-amplificador e o amplificador após o conversor. Desta forma evitam-se oscilações que poderiam ocorrer se toda a amplificação fosse feita à mesma frequência.

Os atenuadores permitem controlar o ganho total do transpositor e, consequentemente, a potência de saída. É através destes elementos que se estabelece a margem de saturação (*backoff*) de cada amplificador de potência.

Os amplificadores de potência poderão ser de estado sólido (SSPA, *Solid State Power Amplifier*) ou tubos de ondas progressivas (TWTA, *Travelling Wave Tube Amplifier*). Os primeiros têm limitações de potência, pelo que nos satélites de grande capacidade e potência o recurso a TWTs é incontornável.

Embora seja necessário algum grau de redundância ao nível dos diversos componentes dos transpositores, os TWs, em especial, têm tempos médios de vida relativamente baixos, pelo que se torna necessário disponibilizar um número adicional de dispositivos de reserva, os quais, em caso de falha do elemento operacional, poderão entrar em funcionamento através de operações de comutação (no exemplo da figura, a redundância dos amplificadores de potência é do tipo 12+8).

Segmento do satélite

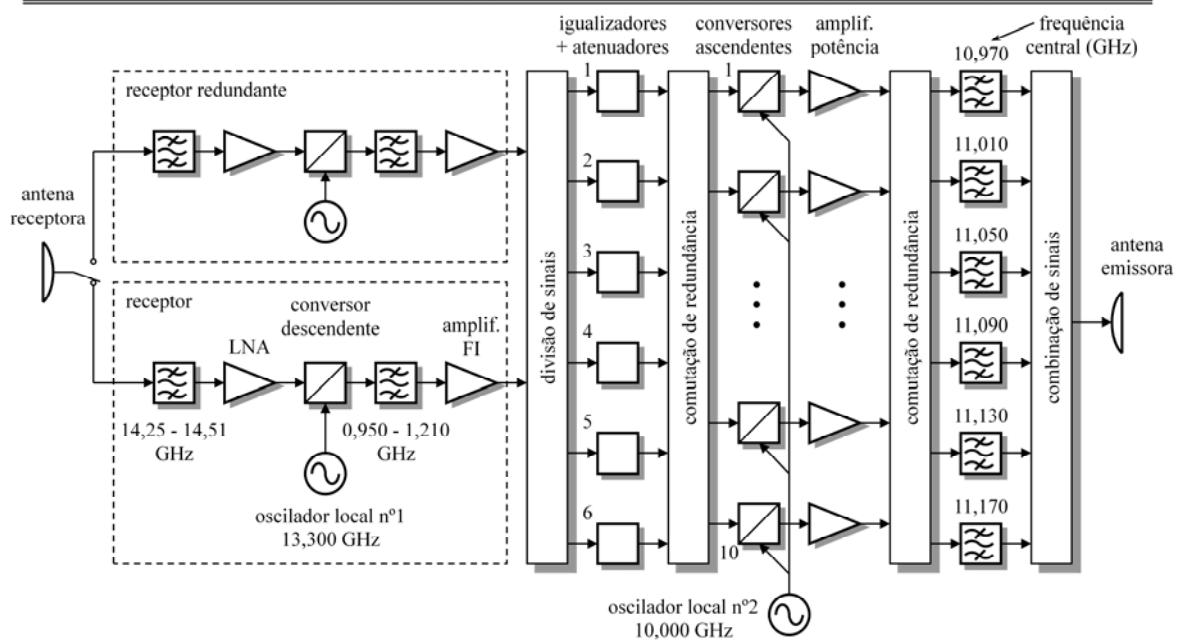


Diagrama-blocos simplificado do subsistema de comunicação com transpositores de conversão dupla

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Os transpositores de conversão dupla optimizam as suas características recorrendo a uma frequência intermédia relativamente mais baixa, assegurando um melhor controlo da filtragem, amplificação e igualização. Neste caso, é necessário utilizar um segundo conversor por transpositor, para elevar a frequência intermédia para a frequência de emissão.

Segmento do satélite

Subsistemas de comunicação

• Antenas

Monopolos e dipolos

- diagramas de radiação de grande largura de feixe ou mesmo omnidireccionais
- aplicação em feixes de TT&C em UHF

Cornetas (*horns*)

- diagramas de radiação com largura de feixe média (tipicamente de 10 a 20°)
- aplicação em feixes de cobertura global e feixes de TT&C

Antenas com reflectores

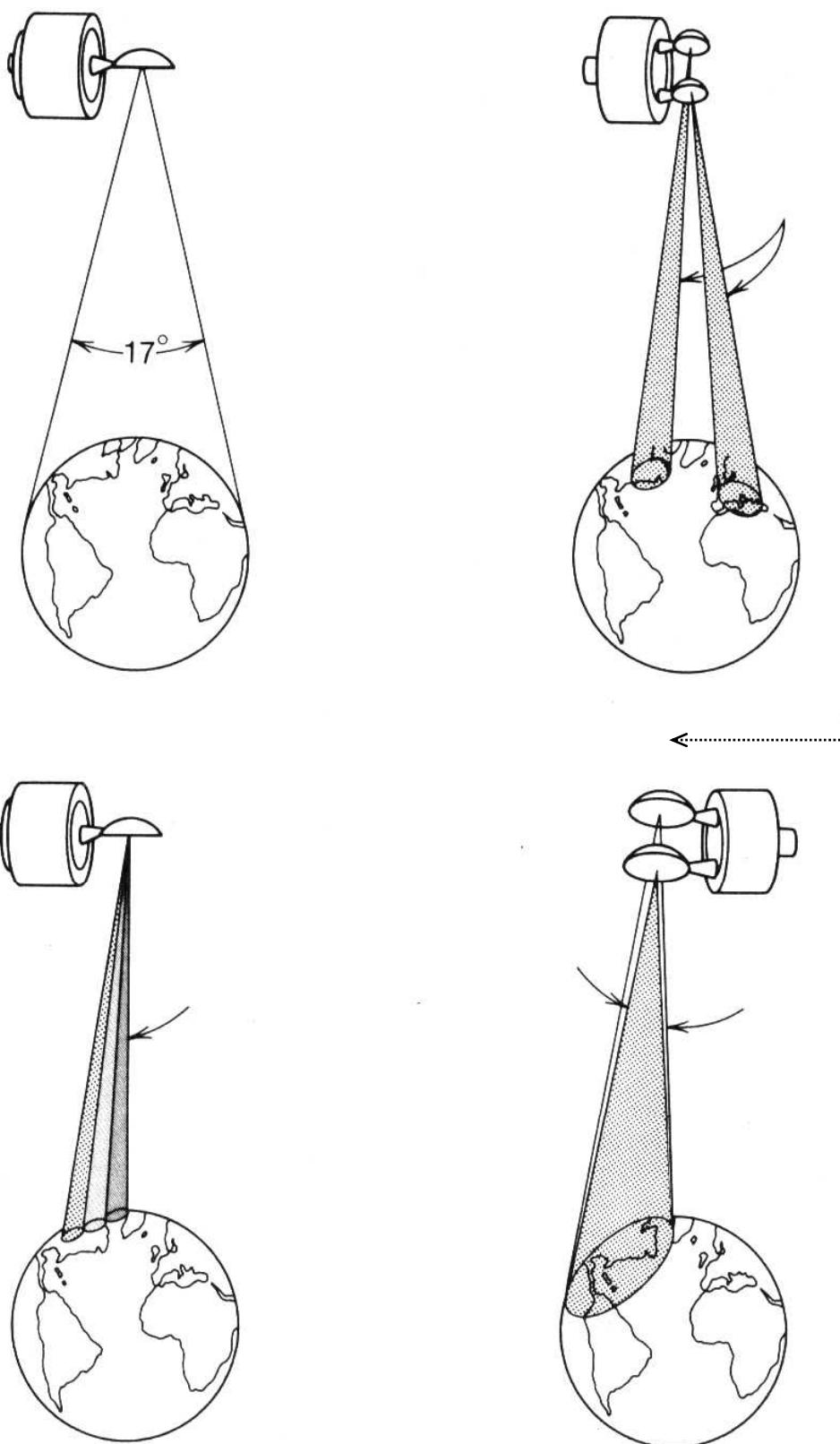
- diagrama de radiação de pequena largura de feixe
- configuração do diagrama de radiação
 - reflector principal iluminado por uma ou mais cornetas alimentadoras
 - fase de alimentação das cornetas permite sintetizar o diagrama para uma dada região
 - a mesma antena pode ser usada para feixes múltiplos (comutados ou não)
- aplicação em feixes de cobertura de zona limitada

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

As antenas que suportam os feixes de tráfego poderão ser muito complexas e produzir diagramas de radiação configurados para a cobertura pretendida. Além de aumentar o EIRP, esta solução permite controlar o nível de interferência entre feixes que cobrem zonas contíguas. A opção por feixes comutados, apesar de mais complexa, permite aumentar ainda mais o EIRP e reduzir significativamente as interferências.

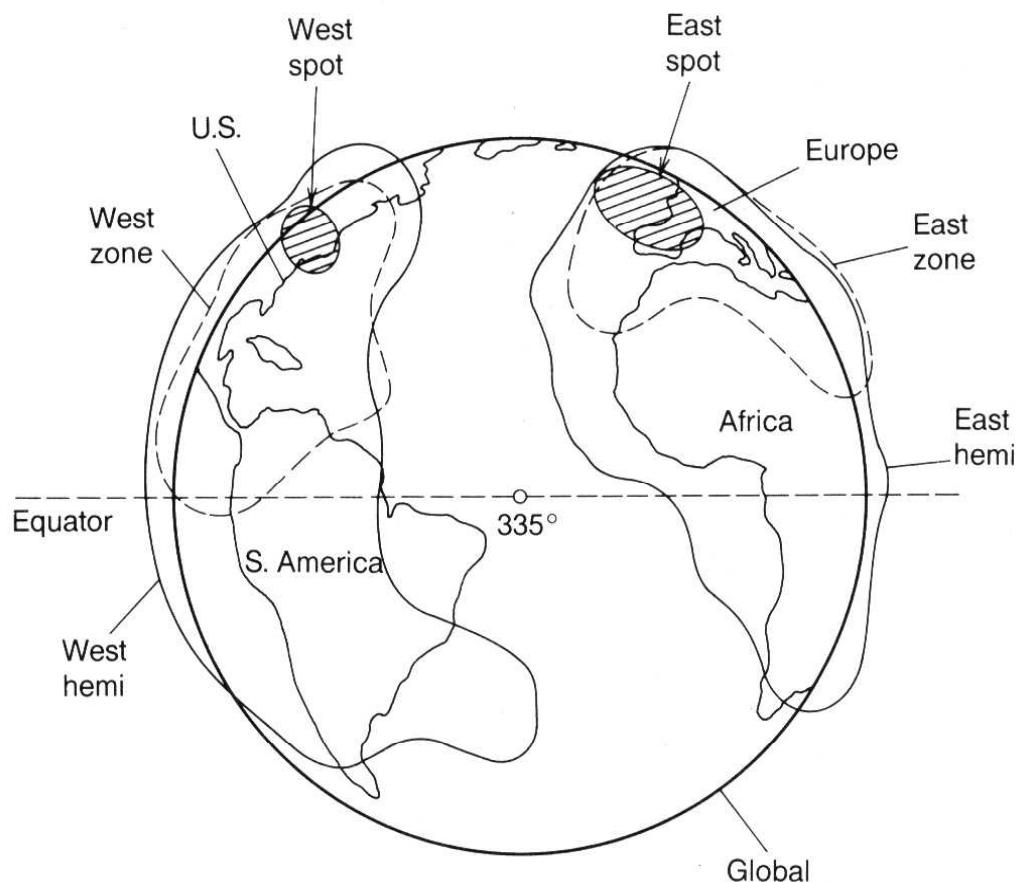
Além de uma adequada separação espacial, as antenas de muitos sistemas têm de operar em dupla polarização com um bom isolamento entre as polarizações ortogonais (pelo menos 25 dB em toda a área de cobertura).

As antenas de grandes dimensões têm a complicaçāo adicional de terem de ser dobradas na fase de lançamento, e só quando o satélite se encontra na sua posição orbital nominal é que são abertas. Este tipo de requisitos requer, naturalmente, soluções construtivas mais ou menos complexas.



Largura do feixe	Diâmetro de cobertura na Terra
10°	6 274 km
5,7°	3 576 km
2,8°	1 787 km
1°	627 km
0,57°	358 km

Tipos de cobertura de antenas de satélite



Cobertura típica de um satélite INTELSAT sobre o Atlântico

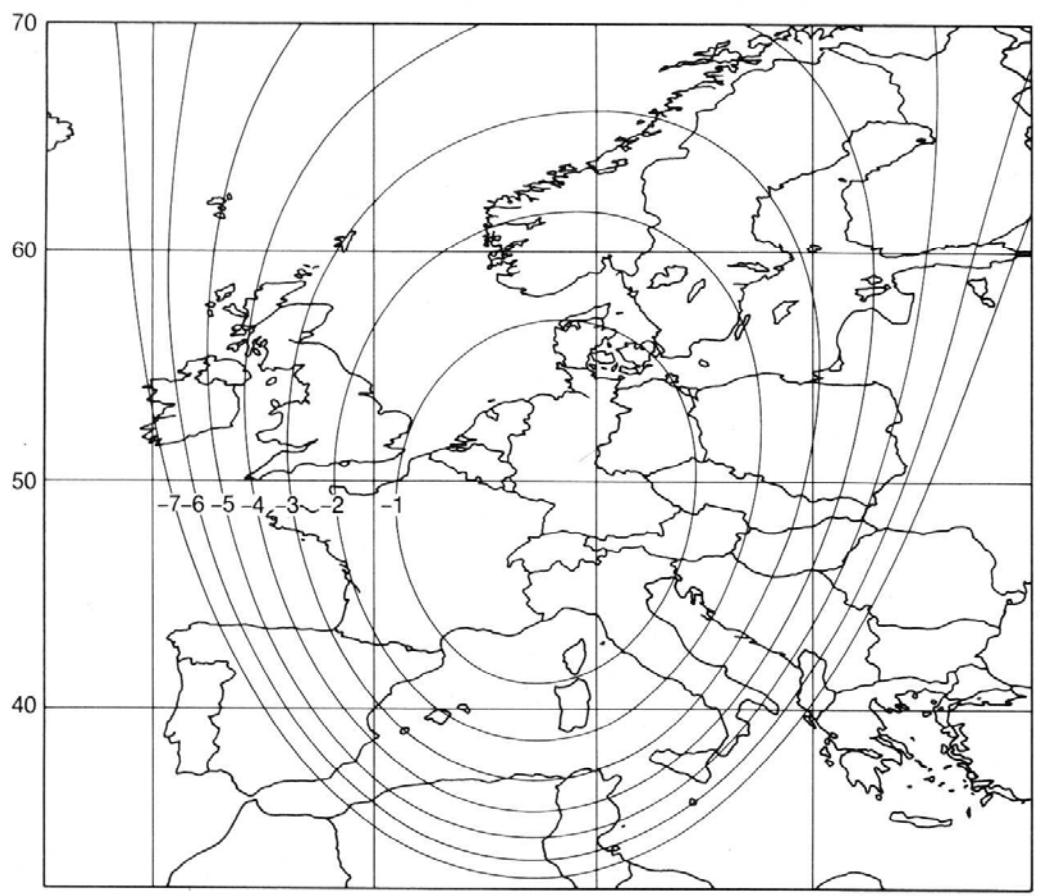
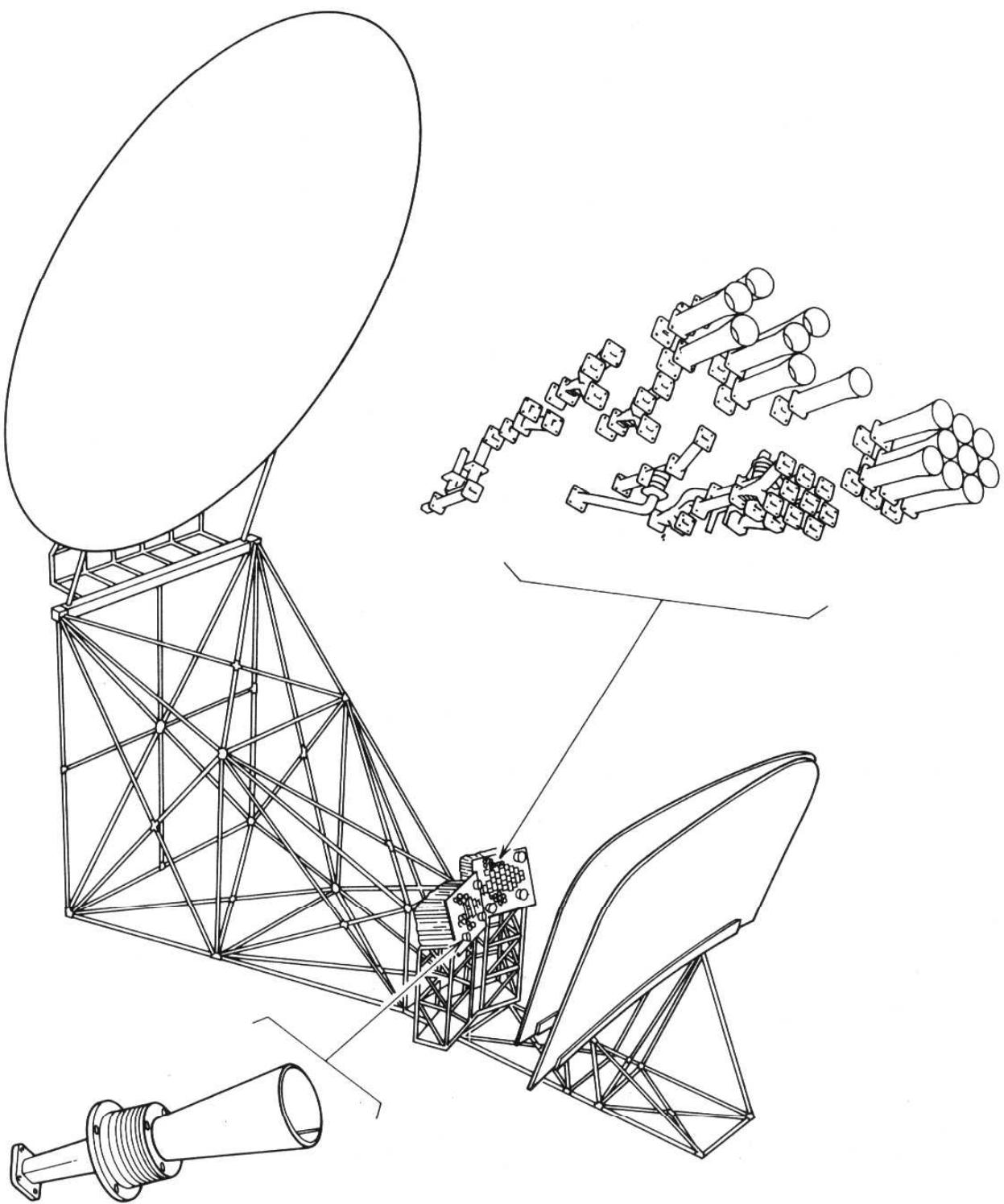


Diagrama de contorno de um feixe pontual de um satélite



Antena com reflector com cobertura de feixes múltiplos

Segmento terrestre

Tipos de estações terrestres

Difusão (BSS, *Broadcasting Satellite Service*)

- estação de recepção individual de TV
 - estação de recepção colectiva de TV
 - estação de recepção comunitária de TV
- 
- TVRO - *TV Receive Only*

Comunicações Fixas (FSS, *Fixed Satellite Service*)

- estação de grande capacidade com acesso simples
- estação de pequena / média / grande capacidade com acesso múltiplo (FDMA / TDMA)

Comunicações Móveis (MSS, *Mobile Satellite Service*)

- terminais de bolso ou transportáveis para voz / dados
- estações em veículos, barcos e aeronaves para voz / dados

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

As estações terrestres diferem muito entre si, em função do tipo de serviço que prestam, desde estações de grandes dimensões, com antenas de 30 m de diâmetro e 250 toneladas de peso, até terminais de bolso de pequenas dimensões e peso.

Para o serviço de difusão directa de TV por satélite, as estações terrestres têm apenas função de recepção, sendo por isso as mais simples de todas. Existem, contudo, algumas diferenças:

- sistema de recepção individual de TV → recepção doméstica
 - cada utilizador recebe os programas em frequência intermédia num receptor de TV por satélite que, por sua vez, disponibiliza ao receptor convencional de TV apenas um programa de um satélite, em cada instante;
- sistema de recepção colectiva de TV → pequeno conjunto de utilizadores (ex.: edifício)
 - se a distribuição dos canais de satélite for em estrela e em frequência intermédia, a partir de um nó de distribuição, a situação é idêntica à anterior para cada utilizador, que deverá possuir um receptor de TV por satélite, mas diferentes utilizadores têm acesso a diferentes programas do mesmo satélite;
 - se a distribuição for em barramento na banda de UHF, os receptores de TV por satélite estão no nó de distribuição e cada utilizador pode aceder a múltiplos programas de vários satélites em simultâneo, directamente a partir do receptor convencional de TV;
- sistema de recepção comunitária de TV → largo número de utilizadores (ex.: *head end* de uma rede de cabo)
 - a distribuição é efectuada em barramento na banda de UHF, tal como na segunda opção do sistema anterior de recepção colectiva de TV.

Nesta disciplina, no âmbito das aulas práticas, são estudadas as estações deste tipo, que operam nas bandas de 10,7 a 12,75 GHz.

Em relação aos outros tipos de estações, não faremos o estudo das suas características, mas apenas alguns tipos no âmbito das monografias do ano corrente, podendo ainda ser consultadas monografias de anos anteriores e a bibliografia sugerida.

Séries e constelações de satélites

Comunicações Fixas (FSS, *Fixed Satellite Service*)

- Intelsat (INTernational TELEcommunication SATellite)
- Eutelsat (EUropean TELEcommunication SATellite)

Difusão (BSS, *Broadcasting Satellite Service*)

- Astra (Société Européenne des Satellites - SES)
- Eutelsat (EUropean TELEcommunication SATellite)
- HISPASAT (Sistema Español de Comunicaciones por Satélite)

Comunicações Móveis (MSS, *Mobile Satellite Service*)

- Inmarsat (INternational MARitime SATellite)
- Iridium
- Globalstar

Navegação (localização)

- GPS (Global Positioning System)
- GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System)
- Galileo

Observação da Terra e Atmosfera

- Meteosat (METEOrological SATellite)
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

Projeto de Sistemas de Telecomunicações Sistemas de Comunicação por Satélite

Algumas organizações operam grande número de satélites, quer em termos de sucessivas gerações com vários satélites da mesma geração, quer em termos de constelações que asseguram cobertura global.

Para os principais operadores de sistemas de satélite acima indicados, poderá ser encontrada informação relevante nas páginas WWW a seguir referenciadas:

– Intelsat	www.intelsat.com
– Eutelsat	www.eutelsat.com
– Astra	www.astra.lu
– HISPASAT	www.hispasat.es
– Inmarsat	www.inmarsat.com
– Iridium	www.iridium.com
– Globalstar	www.globalstar.com
– Meteosat	www.eumetsat.de/ www.esoc.esa.de/external/mso/meteosat.html
– NOAA	www.noaa.gov