

Sistemas de Transmissão

- **Sistemas de longa distância**
 - Sistemas por fibra ótica
 - **Sistemas por feixe hertziano**
 - **Sistemas por satélite**
- Multiplexagem por divisão de comprimento de onda
(WDM – Wavelength Division Multiplexing)

Sistemas de longa distância

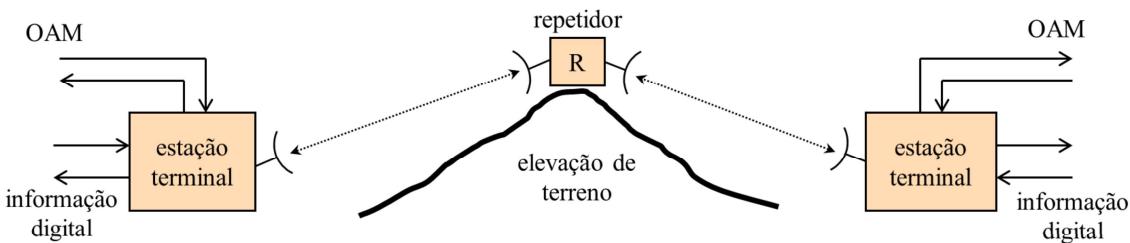
Sistemas por feixe hertziano

Características gerais

- estações terminais em cada extremo
 - modulação e emissão
 - receção e desmodulação
- sistemas de antena: radiam/recebem o sinal com diretividade
- meio não guiado: o espaço livre
- repetidores intermédios: amplificam e regeneram o sinal e contornam obstáculos
- frequências de portadora acima de 1 GHz

espetro eletromagnético é limitado

- feixes hertzianos só deverão ser utilizados se não forem possíveis meios guiados



Sistema básico de transmissão digital por feixe hertziano

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A necessidade de grande largura de banda para transmitir sinais de alto débito e a já elevada ocupação do espetro, obrigou à utilização de sistemas de portadora a frequências muito elevadas, superiores a 1 GHz. Estes sistemas são designados de **feixes hertzianos** ou **feixes de microondas**.

Estes sistemas apresentam as seguintes particularidades:

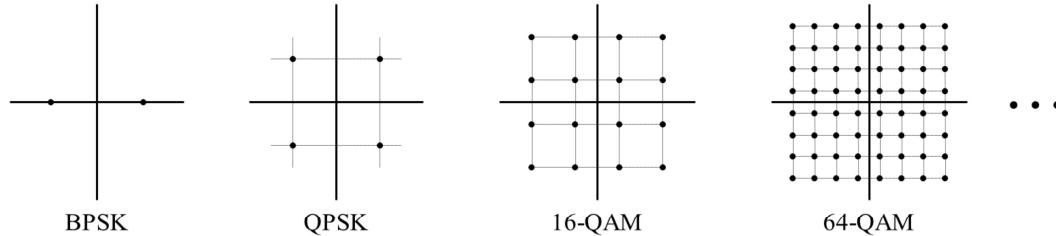
- o comprimento de onda é relativamente pequeno, podendo utilizar-se **antenas parabólicas de dimensões aceitáveis**, com boa diretividade (ganhos da ordem de 30 dB ou superior);
- a propagação faz-se “em **linha de vista**”, isto é, não pode haver obstruções no trajeto (edifícios, vegetação, acidentes do terreno, curvatura da terra), obrigando a que as antenas sejam muitas vezes colocadas em torres e os repetidores sejam situados em pontos elevados;
- utilizam modulações PSK (2 ou mais estados) ou QAM (4 ou mais estados);
- são afectados por problemas de propagação na atmosfera, designadamente **atenuação** e despolarização devidas à **precipitação** e **efeitos de refração**.

Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

Características gerais

- modulações de amplitude-fase tipo M-QAM



Eficiência		Modulação M-QAM							
		M=2	M=4	M=16	M=64	M=128	M=256	M=512	
Nominal	$\rho_{nom} = R_b / B_{nom} = (\log_2 M)/2$	(1)	0,5	1	2	3	3,5	4	4,5
Máxima	$\rho_{max} = R_b / B_{min} = \log_2 M$	(2)	1	2	4	6	7	8	9

(1) – B_{nom} : largura de banda “nulo-a-nulo” (lobo principal do sinal retangular não filtrado)

(2) – B_{min} : largura de banda de Nyquist (sinal seno cardinal sem interferência intersimbólica)

Modulações M-QAM e respectivas eficiências

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

As **modulações M-QAM** são largamente utilizadas em feixes hertzianos, devido à sua elevada eficiência. Contudo, à medida que se aumenta o número de estados, reduz-se a eficiência de potência, isto é, requer-se maior potência de sinal para a mesma probabilidade de erro.

As técnicas de transmissão de RF têm sido apuradas durante décadas, permitindo obter sistemas com eficiência próxima da eficiência máxima, tornando-se necessário reduzir a interferência intersimbólica aplicando técnicas sofisticadas de igualização do canal.

Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

Sistemas ponto-a-ponto de baixa / média capacidade

- utilizados na rede local / regional

Modulação	Sistema e respetiva largura de banda (MHz)						Eficiência
	2 Mbit/s	2 x 2 Mbit/s	8 Mbit/s	2 x 8 Mbit/s	34 Mbit/s	2 x 34 Mbit/s	
BPSK	3,5	7	14	28	56		≈ 0,6
QPSK	1,75	3,5	7	14	28	56	≈ 1,2
16-QAM		1,75	3,5	7	14	28	≈ 2,4

Sistemas ponto-a-ponto de alta capacidade

- utilizados na rede regional / nacional

Modulação	Sistema	B (MHz)	Eficiência	Modulação	Sistema	B (MHz)	Eficiência
16-QAM	140 Mbit/s	40	3,5	128-QAM	140 Mbit/s	30	4,7
	155 Mbit/s	55	2,8		155 Mbit/s		5,2
64-QAM	140 Mbit/s	30	4,7	256-QAM	2 x 140 Mbit/s	40	7
		40	3,5		2 x 155 Mbit/s		7,1
	155 Mbit/s		3,9				

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

As recomendações da UIT especificam uma grande variedade de sistemas de pequena, média e alta capacidade, a que correspondem canais com larguras de banda muito diversificada, desde 2,5 a 220 MHz.

A tendência actual de desenvolvimento continua a ser a procura de sistemas de maior capacidade que rentabilizem o escasso recurso que é o espaço eletromagnético do espaço livre. Como se pode constatar pelos exemplos acima identificados, alguns sistemas permitem atingir eficiências próximas da eficiência máxima.

Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

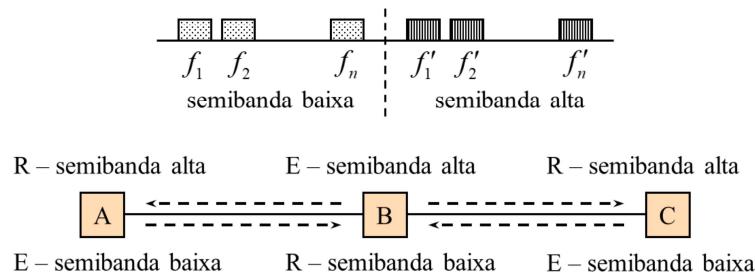
Bandas mais utilizadas

- 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz, 11 GHz e 18 GHz

Plano de frequências – semibandas

- banda total é dividida em 2 semibandas com uma banda de guarda
- cada estação emite numa semibanda e recebe na outra semibanda
- os canais são separados entre si por uma banda de guarda
- cada antena suporta um máximo de 4 canais não adjacentes

reduz interferências



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Para a transmissão multi-canais, bidirecional e por saltos, a exploração da banda por divisão em semibandas constitui um elemento fundamental para reduzir as interferências.

Outro aspecto é o estabelecimento de bandas de guarda entre canais, devendo notar-se que o espaçamento entre o canal superior da semibanda inferior e o canal inferior da semibanda superior é, em geral, superior ao espaçamento dentro das semibandas.

A distribuição de canais por cada antena procura maximizar o afastamento entre canais e limitar o número máximo de canais em condições mais desfavoráveis de interferência.

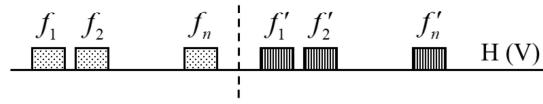
Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

Plano de frequências – polarização dos canais

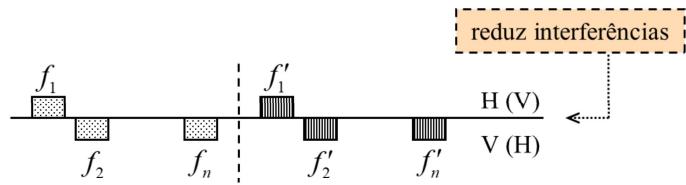
- plano simples

- uma única polarização



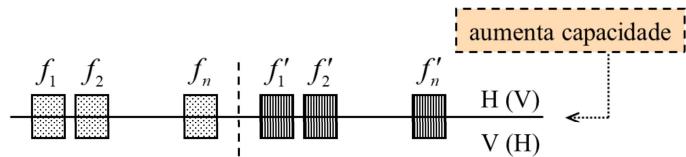
- plano simplesmente alternado

- canais adjacentes ortogonais



- plano sobreposto

- canais sobrepostos ortogonais



Utilização de polarizações ortogonais em feixes hertzianos

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Nos planos alternados, a **utilização de polarizações ortogonais** em canais adjacentes conduz a um **grau superior de isolamento** entre canais. Os planos simplesmente e duplamente alternados permitem vários arranjos de ligação de emissores e receptores a antenas.

Os planos sobrepostos permitem operar na mesma frequência com polarizações ortogonais, embora possam ser afetados por efeitos de propagação que originam despolarização (já referidos anteriormente).

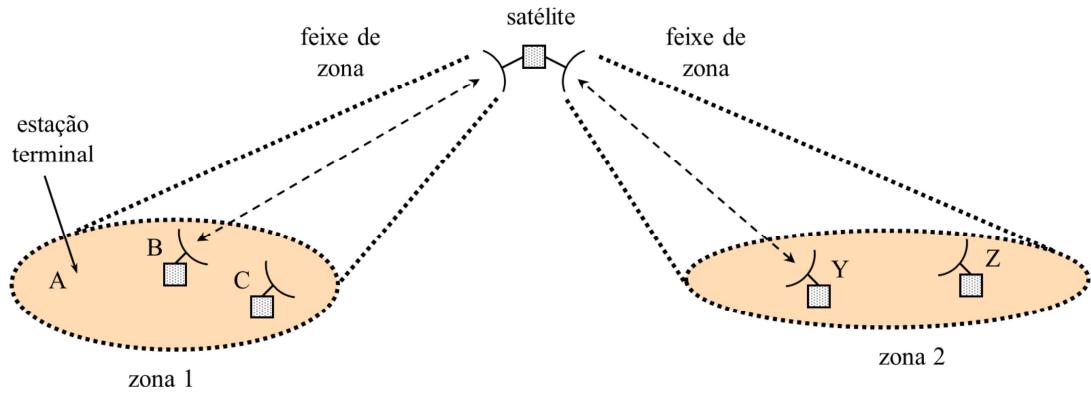
Os **sistemas de microondas** são muito mais baratos e rápidos de instalar do que os sistemas de linha (fibra ótica), mas saturam rapidamente o espetro disponível: por isso, representam geralmente uma **pequena parte do tráfego total transportado** na rede de transmissão.

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Princípios do sistema

- feixes hertzianos 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 relevante:** órbita circular equatorial geoestacionária (altitude=36 000 km)
- permitem uma grande flexibilidade de acesso aos recursos de transmissão



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Como caso especial de sistemas de microondas, nos sistemas por satélite :

- o repetidor é colocado no espaço num satélite artificial;
- as órbitas de satélites mais importantes são as seguintes:

geoestacionária – órbita equatorial com cerca de 42 000 km de raio, a única que conduz a um período de 24 horas, que por sua vez leva a que as estações terrestres vejam o satélite sempre na mesma direcção;

de baixa altitude – órbita a uma altitude geralmente inferior a 1 000 km, o que reduz a atenuação em espaço livre de forma significativa, mas não permite uma posição fixa do satélite sobre as estações terrestres (a solução para permitir uma cobertura de 24 horas é lançar “constelações” de satélites, de forma a que haja pelo menos um sobre um qualquer lugar).

A figura representa um exemplo de uma configuração de acesso de estações situadas em duas zonas fisicamente distintas (normalmente longínquas). É evidenciada a ligação B-Y, sendo possíveis quaisquer outras ligações entre estações de cada uma das zonas.

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Modulações mais utilizadas

- BPSK, QPSK, MSK

as mais eficientes em termos de potência

Bandas mais utilizadas

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

reduzem-se as interferências

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		

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Nos sistemas por satélite teremos de operar com sinais muito débeis, e, por isso, as modulações não poderão ter um elevado número de estados, tendo como consequência uma maior ocupação espectral. Ou seja, as restrições de potência em sistemas por satélite obrigam à adoção de modulações mais eficientes em termos de potência (dois ou quatro estados), sacrificando a eficiência espectral, embora sistemas mais recentes já utilizem modulações de mais estados (por exemplo, 16-QAM).

A **eficiência de potência** traduz a capacidade de um sistema operar com um objetivo de taxa de erros com uma determinada relação sinal-ruído, que deve ser o mais baixa possível.

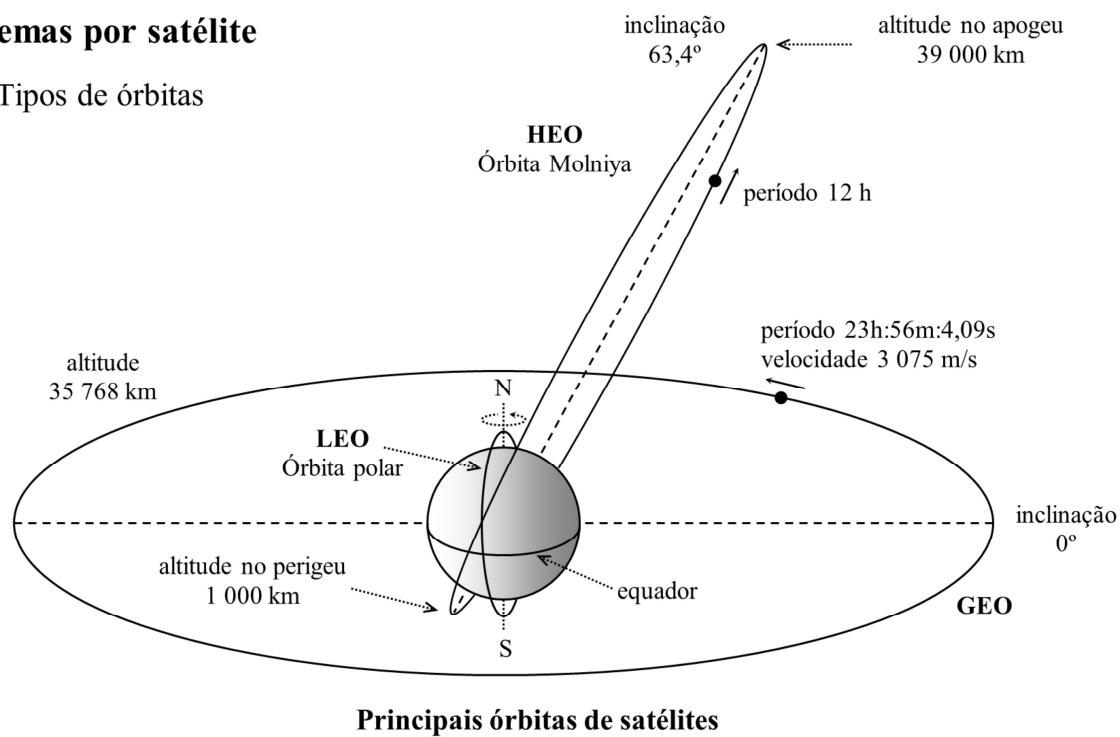
A **eficiência espectral** traduz a capacidade de um sistema suportar um objetivo de débito binário numa determinada largura de banda, que deve ser igualmente o mais baixa possível.

A ligação ascendente opera geralmente a uma frequência superior à ligação descendente. O satélite dispõe de repetidores que fazem a transposição das frequências ascendentes para as descendentes (os repetidores designam-se, por isso, de transpositores).

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Tipos de órbitas



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

As **órbitas GEO** (*Geosynchronous Earth Orbit*) têm altitude elevada, são circulares, assentes no plano equatorial e com um período de rotação igual ao da Terra, de tal forma que o satélite é visto da Terra sempre na mesma posição. Exemplos de aplicação: rede fixa de telecomunicações, difusão de televisão, comunicações marítimas, meteorologia, deteção remota.

As **órbitas LEO** (*Low Earth Orbit*) têm baixa altitude, são circulares e são normalmente muito inclinadas em relação ao plano do equador (no limite polares), de forma a assegurar uma cobertura total da Terra, embora com períodos muito curtos de permanência em cada lugar. Por exemplo, se um satélite descrever uma órbita polar com um período de 2 horas, à medida que a Terra efetua o seu movimento de rotação, o satélite vai cobrindo diferentes longitudes, e ao fim 12 ciclos terá coberto toda a Terra. Exemplos de aplicação: comunicações móveis, meteorologia, deteção remota.

As **órbitas MEO** (*Medium Earth Orbit*) – não representadas na figura, têm uma altitude intermédia, são circulares e geralmente inclinadas, permitindo uma cobertura global da Terra. Exemplos de aplicação: radiolocalização (GPS e outros).

As **órbitas HEO** (*Highly Elliptical Orbit*) são um caso muito particular de tipo elíptico, com um apogeu de elevada altitude e um perigeu de baixa altitude, de modo que, em baixas latitudes, o satélite permanece próximo visível no zénite em cerca de 2/3 do tempo. Exemplos de aplicação: rede fixa de telecomunicações (Rússia).

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Tipos de órbitas

– **GEO** (*Geosynchronous Earth Orbit*): órbita circular equatorial geossíncrona

- 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

há outras órbitas
utilizadas

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

- órbita elíptica inclinada

- perigeu de baixa altitude

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

Sistemas de Telecomunicações

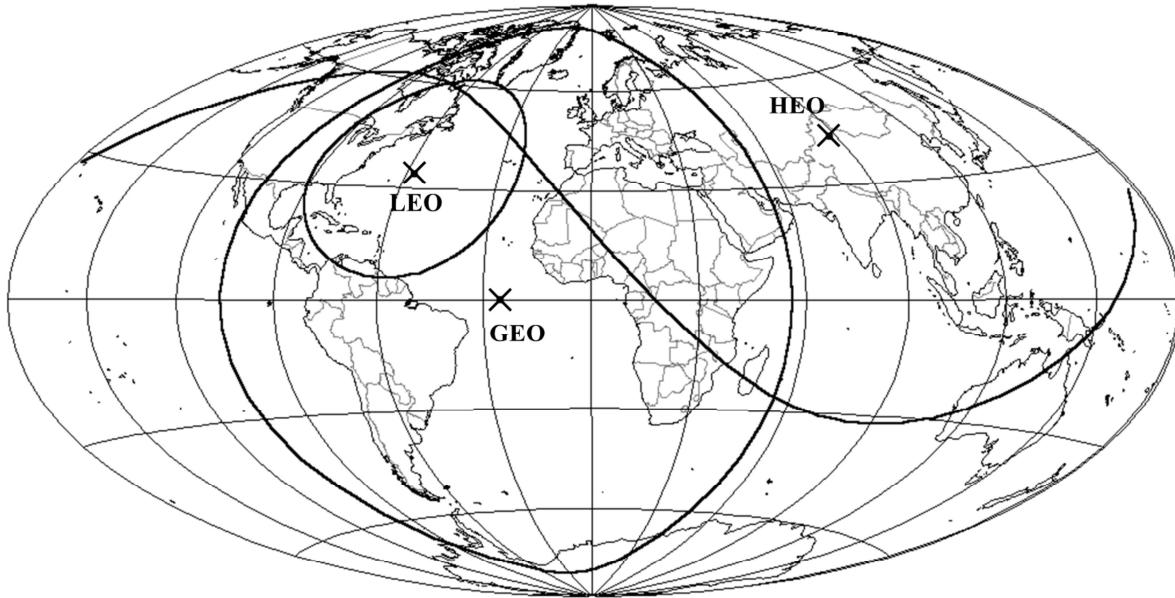
Sistemas de Transmissão

O período de revolução dos satélites geoestacionários corresponde ao chamada dia sideral – em relação ao Sol, em cada ano a Terra dá 366,25 voltas, apesar de um observador na Terra ter a percepção de que dá 365,25 voltas. Esta diferença de um dia faz lembrar o célebre romance de aventura “A Volta ao Mundo em 80 Dias”, escrito por Júlio Verne...

Os satélites de órbita baixa têm órbita na exosfera, ou seja, acima da altitude de 500 km, em que o atrito dos gases atmosféricos é desprezável.

Sistemas de longa distância

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



Cobertura terrestre de satélites com diversas órbitas

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A cobertura de um satélite corresponde à área na Terra em que o satélite é visto acima do horizonte. A cruz assinalada no mapa corresponde ao ponto da Terra onde o satélite é visto no zénite (90° de elevação). O contorno da cobertura corresponde ao lugar geométrico dos pontos em que o satélite é visto ao nível do horizonte (0° de elevação).

Devido à sua baixa altitude, os satélites LEO cobrem uma porção limitada da superfície terrestre, enquanto no outro extremo temos os satélites GEO que cobrem um pouco menos de metade da Terra.

Os satélites HEO cobrem igualmente cerca de metade da Terra num período de 8 horas em tomo da passagem no perigeu.

Sistemas de longa distância

Comparação entre os tipos de órbita mais importantes					
Características	Tipo de órbita				
	GEO	LEO	MEO	HEO (Molniya)	
cobertura terrestre assegurada por cada satélite	1/2 – 1/3 da Terra polos não cobertos	global ↑	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)	500 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 receção	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, exceto com antenas de feixe largo	indispensável, exceto com antenas de feixe largo	necessário, mas pouco complexo ↑	

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A tabela representada compara os vários tipos de órbita em função de um conjunto de características distintivas.

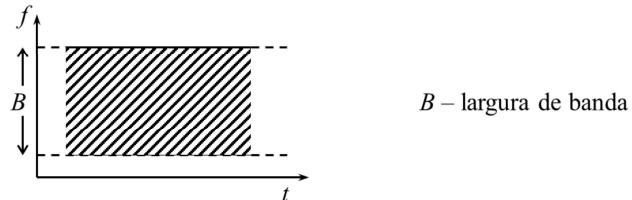
A órbita de um dado sistema de satélite é escolhida tendo em conta os respetivos objetivos operacionais: por exemplo, é natural que o serviço de difusão de TV por satélite recorra a satélites geoestacionários, utilizando antenas terrestres fixas, enquanto os serviços de comunicação móvel são suportados em satélites de baixa altitude, proporcionando a utilização de terminais portáteis com antenas omnidirecionais.

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso simples

- uma única estação terrestre transmite através de um transpositor de um satélite
- a estação ocupa toda a banda disponível no transpositor



Ocupação do tempo e banda no acesso simples a recursos de um satélite

Acesso simples	Sinal transmitido	
	TDM	TV
Serviço	serviço fixo grande capacidade	contribuição programas distribuição programas
Forma de acesso	acesso fixo	acesso fixo

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Características gerais

- baixa complexidade de operação
- ausência de intermodulação entre canais

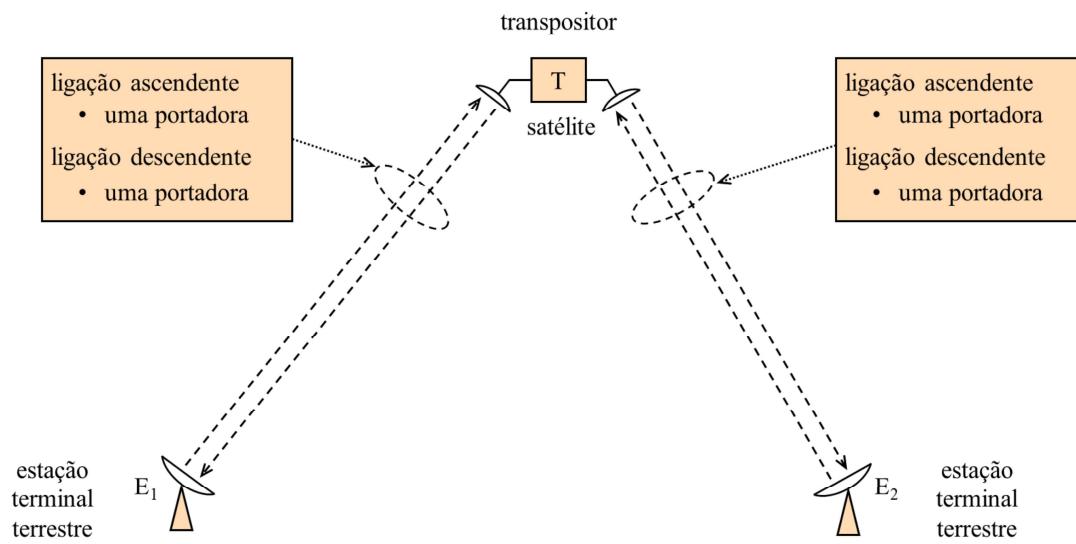
Aplicações

- 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 direta de televisão (e programas de som)
recepção individual de baixo custo
cobertura de um número muito vasto de utilizadores

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso simples



Configuração típica de uma ligação ponto-a-ponto bidirecional com acesso simples

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Exemplos:

- Ligação digital

$$R_b = 55 \text{ Mbit/s}$$

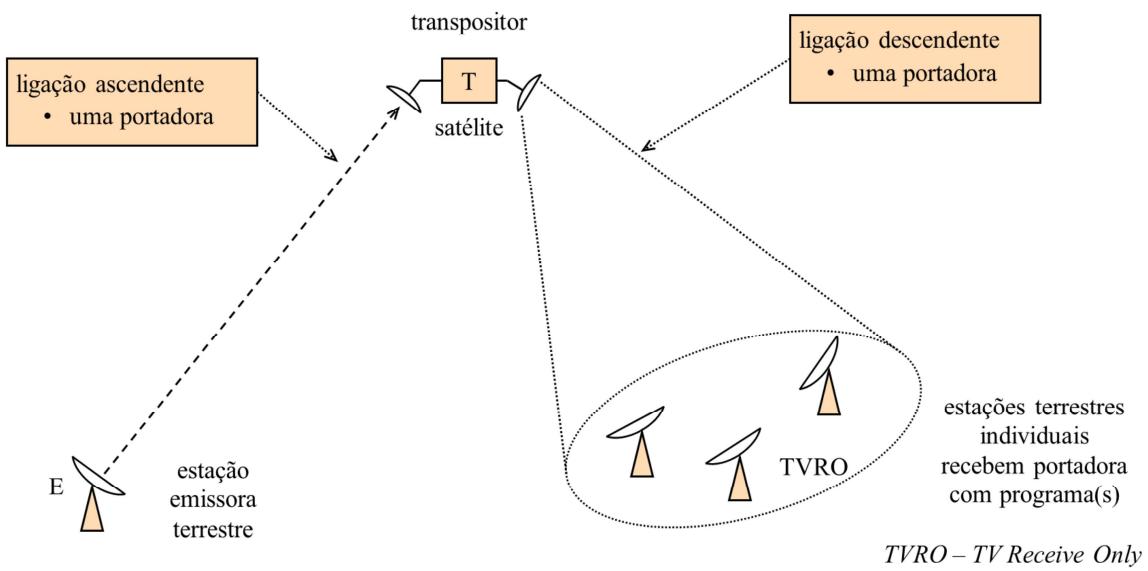
modulação QPSK

$$B = 36 \text{ MHz}$$

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso simples



Configuração típica de distribuição de televisão

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Exemplo:

– Difusão digital de TV

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: $38,02 \times 204/188 = 41,25$ Mbit/s

(16 octectos por pacote MPEG de 188 octetos)

Débito binário após codificação convolucional de Viterbi: $R_b = 41,25/(3/4) = 55$ Mbit/s

(eficiência 3/4)

Débito de símbolos com modulação QPSK: $R_s = R_b/2 = 27,5$ Mbaud

Largura de banda mínima do transpositor: $B_{FI} = 33$ MHz

Sistemas de longa distância

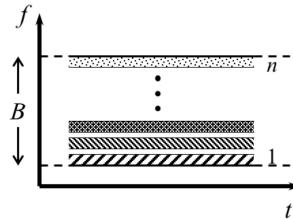
Sistemas por satélite

Acesso múltiplo

- várias estações terrestres transmitem através do mesmo transpositor de satélite

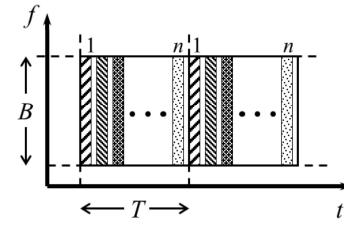
FDMA – Frequency Division Multiple Access

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



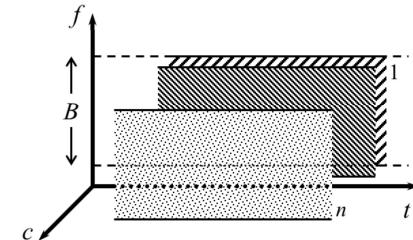
TDMA – Time Division Multiple Access

- 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 a recursos de um satélite

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

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

As **técnicas de acesso múltiplo** distinguem-se pela diferente utilização das dimensões frequência-tempo.

O **modo FDMA** requer uma banda de guarda entre os sinais transmitidos por cada estação, e tem um inconveniente grave, que é o risco de interferência entre canais no caso de ocorrerem não linearidades nos transpositores do satélite, que originam efeitos de intermodulação entre canais.

O **modo TDMA** não é afetado pelo problema de intermodulação entre canais, mas requer que as transmissões de cada estação seja feita em rajadas com um intervalo de guarda entre si, com uma temporização rigorosa que requer um sistema de controlo relativamente complexo.

O **modo CDMA** permite a transmissão em contínuo de todos os participantes, sem os inconvenientes da intermodulação entre canais nem a necessidade de qualquer temporização. Contudo, terão de ser usados códigos com técnicas de banda espalhada (*spread spectrum*) que implicam que o débito de transmissão seja muito superior ao débito binário de informação, o que constitui uma limitação para débitos elevados.

No caso de FDMA e TDMA, o acesso múltiplo poderá ser estabelecido de forma fixa ou a pedido, neste último caso exigindo-se a utilização de um protocolo de acesso adequado. No caso de CDMA, não é necessário utilizar qualquer protocolo de acesso, cada estação pode transmitir logo que tenha informação a transmitir, embora exista um limite do número total de estações que podem transmitir ao mesmo tempo.

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso múltiplo

		Sinal transmitido			
		SCPC – Single Channel per Carrier		TDM – Time Division Multiplex	
FDMA	Serviço	SCPC / PSK / FDMA	serviço fixo pequena capacidade comunicações móveis redes empresariais (VSAT)	TDM / PSK / FDMA	serviço fixo média capacidade
	Forma de acesso		acesso fixo ou a pedido		acesso fixo
TDMA	Serviço	SCPC / PSK / TDMA	serviço fixo pequena capacidade comunicações móveis redes empresariais (VSAT)	TDM / PSK / TDMA	serviço fixo média / grande capacidade
	Forma de acesso		acesso fixo ou a pedido		acesso fixo ou a pedido
CDMA	Serviço	PSK / CDMA	serviço fixo pequena capacidade comunicações móveis redes empresariais (VSAT)		
	Forma de acesso		acesso fixo ou a pedido		

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Cada **sistema de acesso múltiplo** é caracterizada por uma sequência de siglas com o seguinte significado: tipo de sinal transmitido / tipo de modulação do sinal / tipo de acesso múltiplo.

Em relação ao sinal transmitido, consideram-se duas situações distintas:

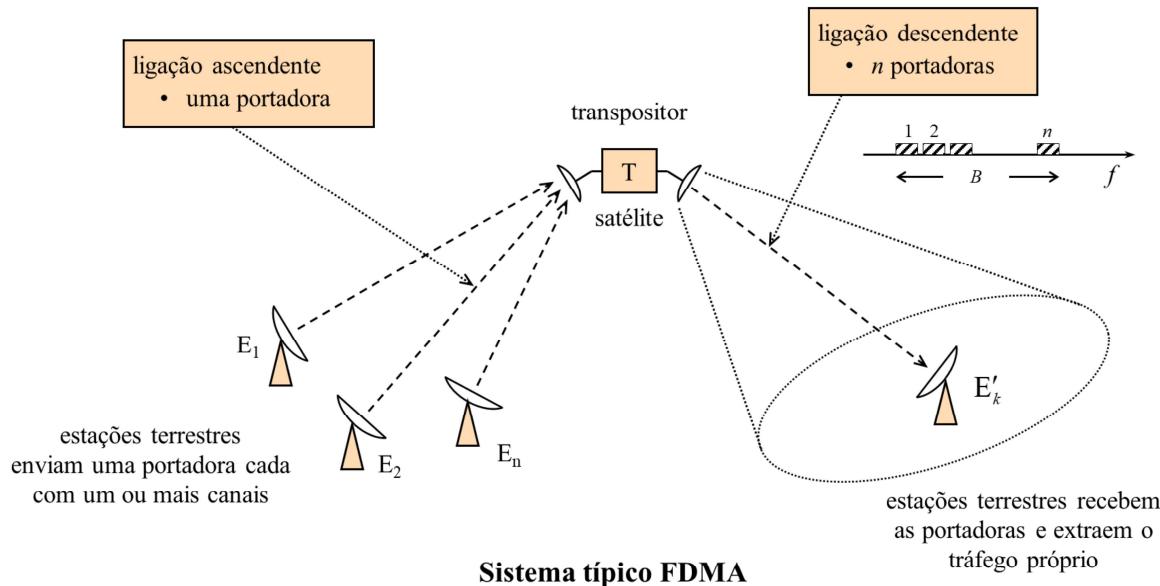
- SCPC (*Single Channel per Carrier*): cada portadora é modulada por um sinal correspondente a um único canal.
- TDM (*Time Division Multiplex*): cada portadora é modulada por um sinal correspondente a uma multiplexagem digital de vários canais.

A tabela apresenta exemplos de aplicações relevantes das diversas combinações.

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso múltiplo FDMA



Sistemas de Telecomunicações

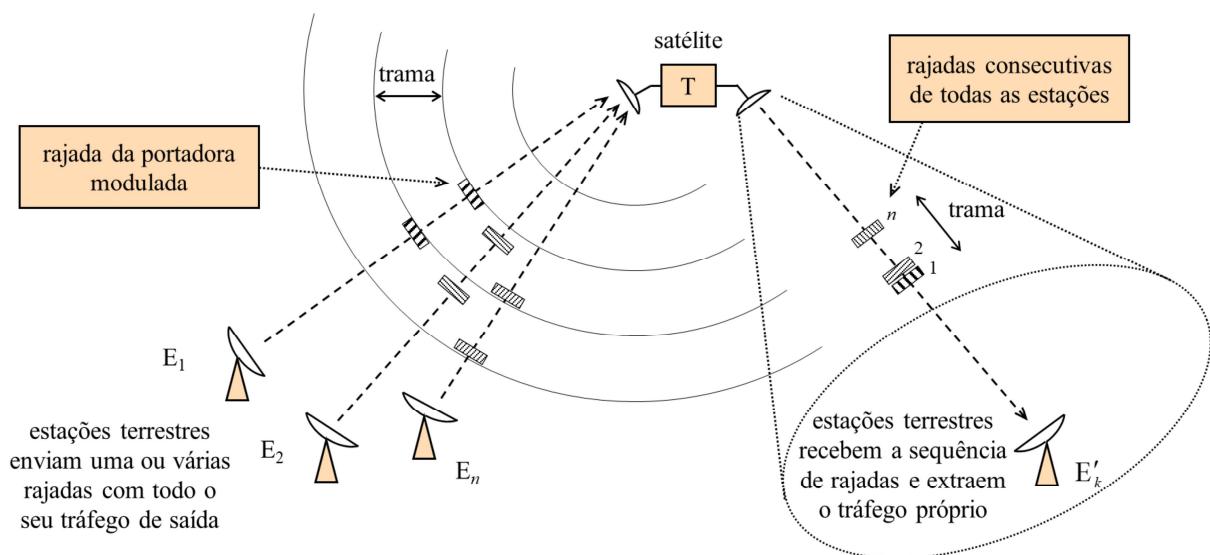
Sistemas de Transmissão

Os primeiros sistemas FDMA suportavam modulações analógicas FM, sendo actualmente utilizados com portadoras digitais. Neste caso, cada estação transmite/recebe um canal modulado numa portadora independente. As estações terrestres de ligação à rede fixa (*hubs*) transmitem e recebem múltiplas portadoras, em geral.

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso múltiplo TDMA



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

O sistema TDMA veio a ser extensivamente utilizado com **sinais digitais**, apresentando as seguintes características:

– 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

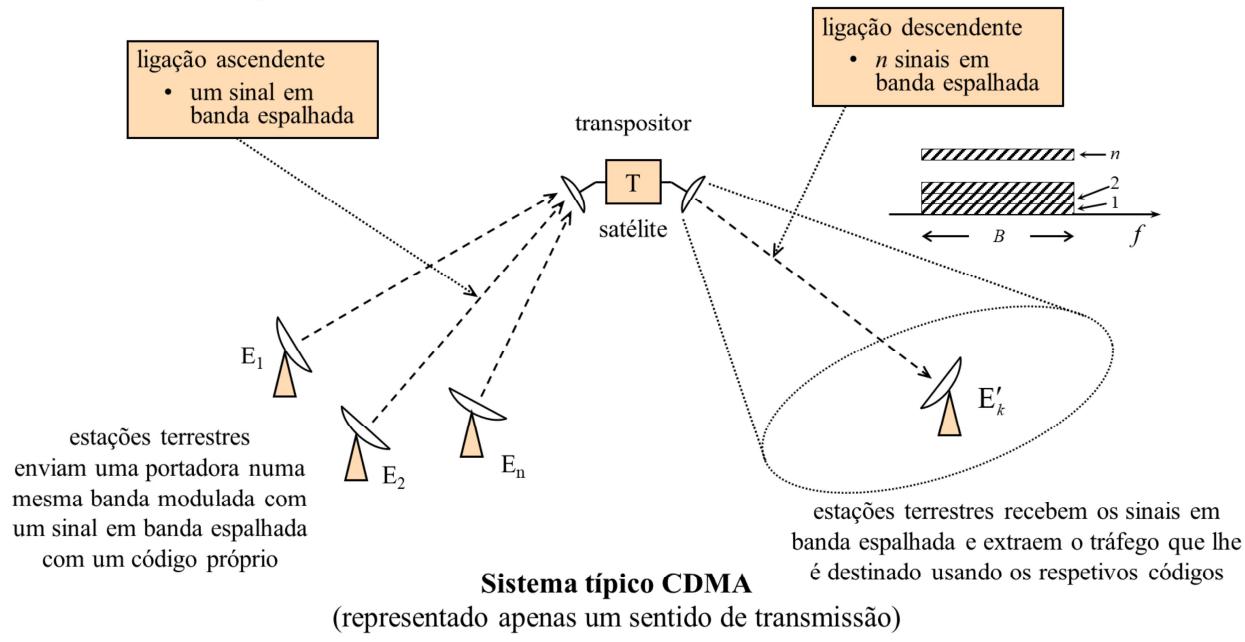
– Recepção

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

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso múltiplo CDMA



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

O método de acesso CDMA é o mais recente, operando do seguinte modo:

– Emissão

- o terminal transmite logo que tenha dados disponíveis
- cada bit é modulado por uma sequência de pseudoaleatória 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