

Redes de Computadores

Camada Física

Prof. Rodrigo de Souza Couto

ATENÇÃO

- Esta apresentação foi retirada e adaptada dos seguintes trabalhos:
 - Notas de aula do Prof. Miguel Campista da UFRJ
 - <https://www.gta.ufrj.br/~miguel/redes.2016.3.html>
 - Notas de aula do Prof. Igor Monteiro Moraes da UFF
 - <http://www2.ic.uff.br/~igor/cursos/redesI>
 - <http://www2.ic.uff.br/~igor/cursos/redespg>
 - Andrew S. Tanenbaum, David J. Wheterall, "Redes de Computadores", 5ª Edição, Editora Pearson, 2011

Base Teórica para Comunicação de Dados

- Transmissão da informação
 - Nos fios...
 - Usando a variação de alguma propriedade física:
 - Corrente e tensão
 - Variação da propriedade é representada no tempo de forma unívoca
 - Função $g(t)$ do sinal resultante
 - Sinal é modelado e analisado matematicamente
 - Análise de Fourier

Análise de Fourier

- Modelo matemático que descreve as variações de tensão e corrente a partir de funções
 - Soma de senos e cossenos pode representar qualquer função periódica razoavelmente estável

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen}(\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \text{sen}(2\pi nft) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

Amplitude do seno



Análise de Fourier

- Modelo matemático que descreve as variações de tensão e corrente a partir de funções
 - Soma de senos e cossenos pode representar qualquer função periódica razoavelmente estável

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen}(\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{cos}(2\pi nft)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \text{sen}(2\pi nft) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \text{cos}(2\pi nft) dt$$

← Amplitude do cosseno

Análise de Fourier

- Modelo matemático que descreve as variações de tensão e corrente a partir de funções
 - Soma de senos e cossenos pode representar qualquer função periódica razoavelmente estável

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{sen}(\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \text{sen}(2\pi nft) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

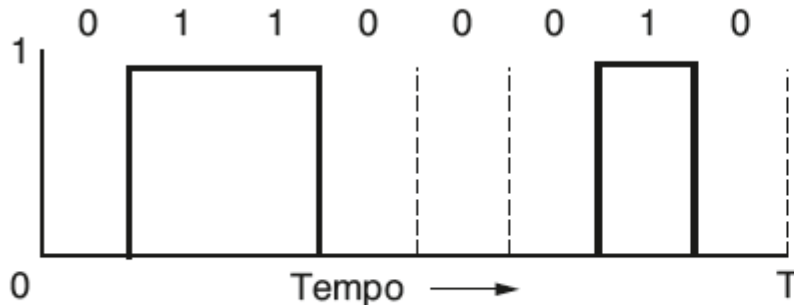
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

Constante

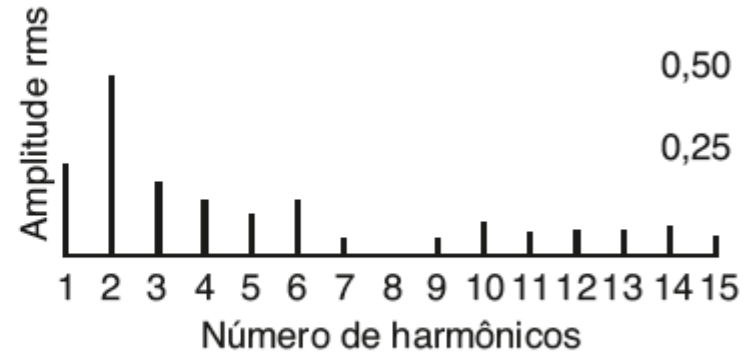


Limitação de Sinal pela Largura de Banda

Codificação binária do caractere ASCII 'b'

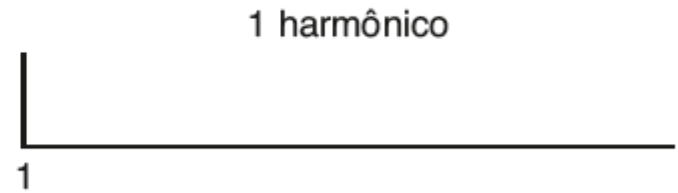
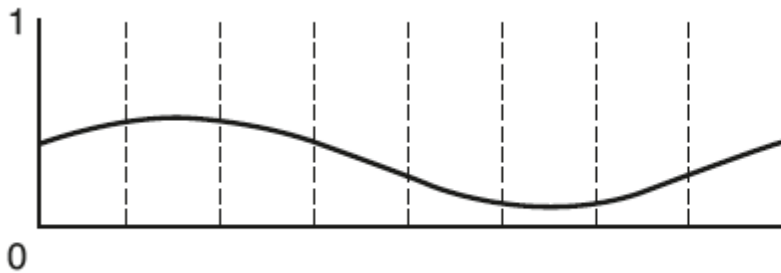


Raiz quadrada média das amplitudes de Fourier



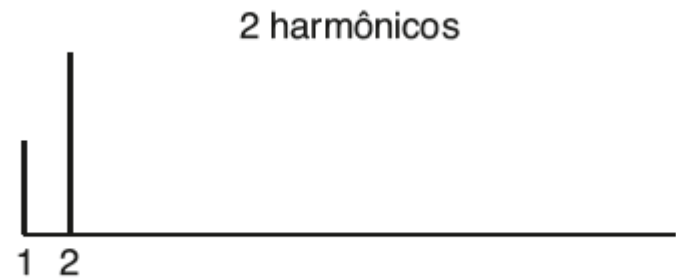
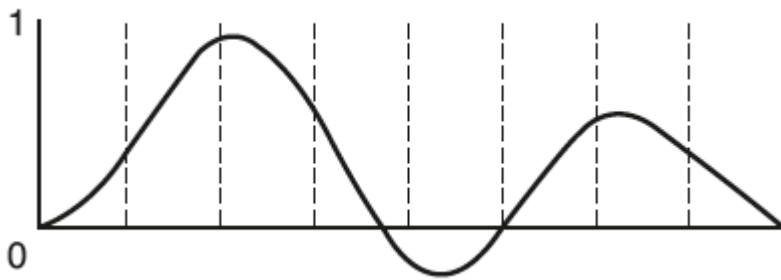
Limitação de Sinal pela Largura de Banda

Aproximações sucessivas do sinal original



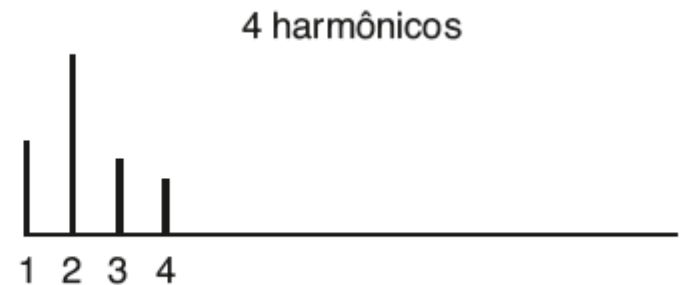
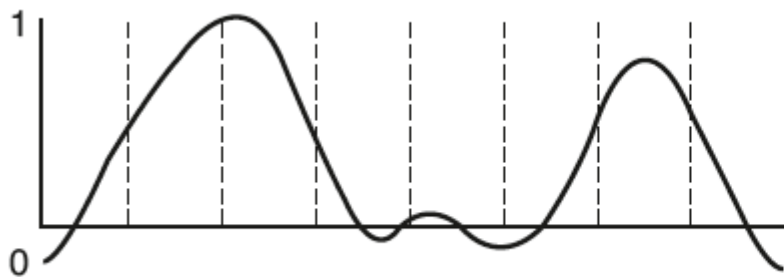
Limitação de Sinal pela Largura de Banda

Aproximações sucessivas do sinal original



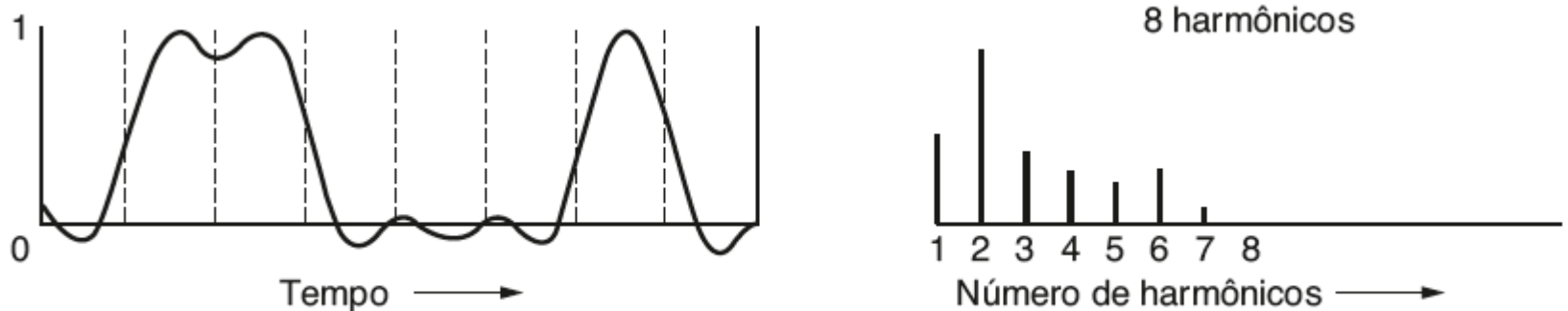
Limitação de Sinal pela Largura de Banda

Aproximações sucessivas do sinal original



Limitação de Sinal pela Largura de Banda

Aproximações sucessivas do sinal original



A partir de 8 harmônicos, o sinal digital já poderia ser reconstruído. Portanto, mais harmônicos representariam desperdício de banda passante

Limitação de Sinal pela Largura de Banda

- Nem todas os coeficientes são reduzidos igualmente
 - Caso isso aconteça, o sinal perde apenas amplitude
- Como consequência, o sinal é distorcido
 - No meio com fio, até uma frequência f_c , todas as amplitudes são enviadas sem redução

A faixa de frequências sem forte redução é chamada de largura de banda

Limitação de Sinal pela Largura de Banda

- Relação entre a taxa de dados e os harmônicos:

$$f = \frac{r \cdot n}{b}$$

f: frequência do canal

r: taxa de transmissão binária

n: número do harmônico

b: número de bits a serem enviados

Bps	T (ms)	Primeiro harmônico (Hz)	Número de harmônicos enviados
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1.200	6,67	150	20
2.400	3,33	300	10
4.800	1,67	600	5
9.600	0,83	1.200	2
19.200	0,42	2.400	1
38.400	0,21	4.800	0

Limitação de Sinal pela Largura de Banda

- Relação entre a taxa de dados e os harmônicos:

$$f = \frac{r \cdot n}{b}$$

f: frequência do canal

r: taxa de transmissão binária

n: número do harmônico

b: número de bits a serem enviados

Bps	T (ms)	Primeiro harmônico (Hz)	Número de harmônicos enviados
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1.200	6,67	150	20
2.400	3,33	300	10
4.800	1,67	600	5
9.600	0,83	1.200	2
19.200	0,42	2.400	1
38.400	0,21	4.800	0

Considerando que uma linha com qualidade de voz tem frequência de corte de 3kHz...

$$n = \frac{f \cdot b}{r} = \frac{3k \cdot 8}{9,6k} = \frac{24}{9,6} = 2,5$$

$$n = \frac{f \cdot b}{r} = \frac{3k \cdot 8}{38,4k} = \frac{24}{38,4} = 0,625$$

Taxa Máxima de Dados de um Canal de Comunicação

- **Teorema de Nyquist:** Até mesmo um canal perfeito tem capacidade de transmissão finita
 - Se um sinal arbitrário atravessar um filtro passa-baixa de largura de banda B , o sinal filtrado pode ser reconstruído a partir de $2B$ amostras
 - Amostragens da linha mais rápidas são inúteis, pois as componentes de frequências mais altas já foram filtradas
 - Se o sinal consistir em V níveis discretos então:

$$\text{taxa máxima de dados} = 2 \cdot B \cdot \log_2 V \text{ bits/s}$$

Um canal de 3kHz sem ruído poderia transmitir sinais binários ($V=2$) a uma taxa maior que 6kb/s?

Taxa Máxima de Dados de um Canal de Comunicação

- **Teorema de Nyquist:** Até mesmo um canal perfeito tem capacidade de transmissão finita
 - Se um sinal arbitrário atravessar um filtro passa-baixa de largura de banda B , o sinal filtrado pode ser reconstruído a partir de $2B$ amostras
 - Amostragens da linha mais rápidas são inúteis, pois as componentes de frequências mais altas já foram filtradas
 - Se o sinal consistir em V níveis discretos então:

$$\text{taxa máxima de dados} = 2.B.\log_2 V \text{ bits/s}$$

Um canal de 3kHz sem ruído poderia transmitir sinais binários ($V=2$) a uma taxa maior que 6kb/s?

Não, pois taxa máxima de dados = $2.3k.\log_2 2 = 6k \text{ bits/s}$

Taxa Máxima de Dados de um Canal de Comunicação

- Com ruído, a situação se degrada mais rapidamente...
 - Ruído aleatório (térmico) *sempre existe* devido à movimentação das moléculas no sistema
- Equação de Shannon e a relação sinal-ruído
 - Considerando:
 - **S**: Potência do sinal
 - **N**: Potência do ruído
 - **B**: Largura de banda

$$\text{taxa máxima de dados} = B \cdot \log_2(1 + S/N) \text{ bits/s}$$

Taxa Máxima de Dados de um Canal de Comunicação

- Com ruído, a situação se degrada mais rapidamente...
 - Ruído aleatório (térmico) sempre existe devido à movimentação das moléculas no sistema
- Equação de Shannon e a relação sinal-ruído
 - Considerando:
 - **S**: Potência do sinal
 - **N**: Potência do ruído
 - **B**: Largura de banda

Relação S/N é dada normalmente em decibéis. Portanto, $10 \cdot \log_{10} S/N = S/N$ dB

taxa máxima de dados = $B \cdot \log_2 (1 + S/N)$ bits/s

Taxa Máxima de Dados de um Canal de Comunicação

- Com ruído, a situação se degrada mais rapidamente...
 - Ruído aleatório (térmico) sempre existe devido à movimentação das moléculas no sistema
- Equação de Shannon e a relação sinal-ruído
 - Considerando:
 - S: Potência do sinal
 - N: Potência do ruído
 - B: Largura de banda

Uma rede de acesso ADSL com largura de banda de 1MHz e relação sinal-ruído de 40dB pode transmitir no máximo a que taxa?

$$\text{taxa máxima de dados} = B \cdot \log_2(1 + S/N) \text{ bits/s}$$

Taxa Máxima de Dados de um Canal de Comunicação

- Com ruído, a situação se degrada mais rapidamente...
 - Ruído aleatório (térmico) sempre existe devido à movimentação das moléculas no sistema
- Equação de Shannon e a relação sinal-ruído
 - Considerando:
 - S: Potência do sinal
 - N: Potência do ruído
 - B: Largura de banda

Uma rede de acesso ADSL com largura de banda de 1MHz e relação sinal-ruído de 40dB pode transmitir no máximo a que taxa?
Taxa máxima de dados = $10^6 \cdot \log_2(1+10^4) \sim 13\text{Mb/s}$

$$\text{taxa máxima de dados} = B \cdot \log_2(1 + S/N) \text{ bits/s}$$

Meios de Transmissão

- Objetivo da Camada Física:
 - Transmitir um fluxo bruto de bits de uma máquina para a outra
- Cada meio físico...
 - Tem propriedades particulares de:
 - Largura de banda
 - Atraso
 - Custo
 - Facilidade de instalação
 - Manutenção

Meios Guiados X Meios Não-Guiados

Meios Guiados:

- Mídia magnética
- Par trançado
- Cabo coaxial
- Linhas de energia elétrica
- Fibra óptica

Meios Não-Guiados:

- Redes terrestres sem-fio
- Satélite
- Raios laser transmitidos pelo ar

Meios Guiados

Mídia Magnética

- Dados escritos em mídia magnética
 - Pode representar uma forma de baixo custo para transporte de dados quando a rede de comunicação tiver custo elevado por bit transferido
 - Ex.: DVDs, fitas e discos
 - Pode representar a única forma de transferência de grandes massas de dados de regiões sem comunicação em rede
 - Ex.: Plataforma de petróleo em alto mar

Mídia Magnética

- Velocidade da transmissão de dados
 - Nunca subestime a velocidade de uma "carroça" cheia de "fitas" em uma rodovia de alta velocidade...



Mídia Magnética

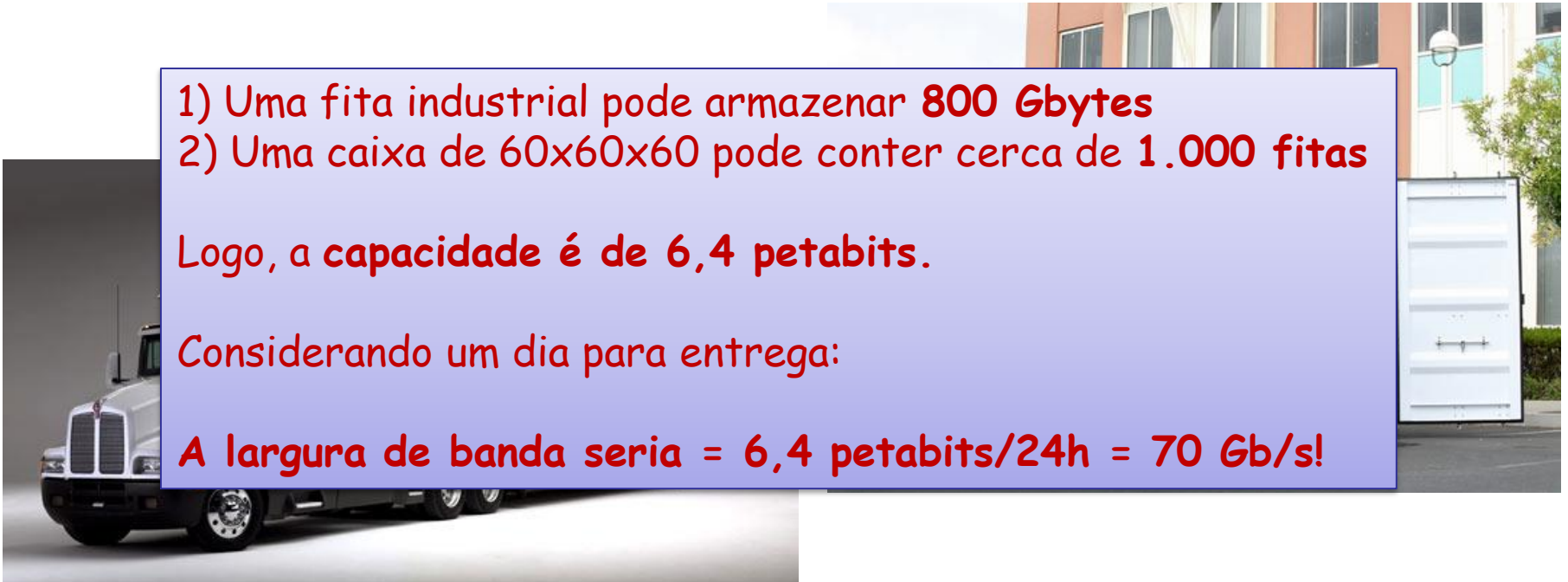
- Velocidade da transmissão de dados
 - Nunca subestime a velocidade de uma "carroça" cheia de "fitas" em uma rodovia de alta velocidade...

- 1) Uma fita industrial pode armazenar **800 Gbytes**
- 2) Uma caixa de 60x60x60 pode conter cerca de **1.000 fitas**

Logo, a capacidade é de **6,4 petabits**.

Considerando um dia para entrega:

A largura de banda seria = **$6,4 \text{ petabits}/24\text{h} = 70 \text{ Gb/s}$**



Mídia Magnética

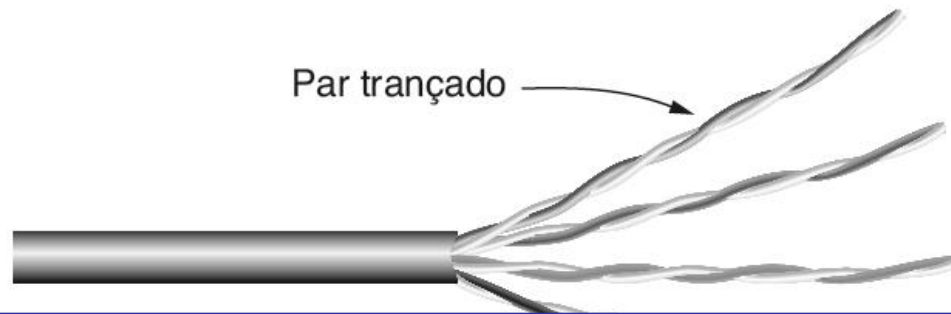
- Velocidade da transmissão de dados
 - Nunca subestime a velocidade de uma "carroça" cheia de "fitas" em uma rodovia de alta velocidade...



Apesar da largura de banda elevada, como ficariam as aplicações com restrições de atraso?

Par Trançado

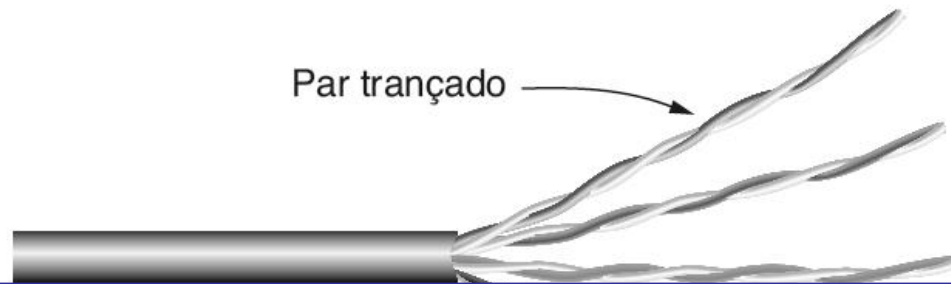
- Um dos meios de comunicação mais antigos e ainda um dos mais comuns
 - Um par consiste em dois fios de cobre encapados com cerca de 1mm de espessura
 - Ex.: Cat 5 UTP: cabo com quatro pares trançados



Por que os fios são trançados?

Par Trançado

- Um dos meios de comunicação mais antigos e ainda um dos mais comuns
 - Um par consiste em dois fios de cobre encapados com cerca de 1mm de espessura
 - Ex.: Cat 5 UTP: cabo com quatro pares trançados



Por que os fios são trançados?
Em paralelo, eles formariam uma antena, o que geraria interferência.

Par Trançado

- Aplicação mais comum
 - Sistema telefônico
 - Linhas usadas tanto para chamadas quanto para acesso à Internet via ADSL
- Alcance
 - Se estendem por quilômetros sem amplificação
- Interferência
 - Atenuada pelo trançado, mesmo quando muitos pares são colocados em um mesmo cabo com capa protetora

Par Trançado

- Tipos de sinais transmitidos
 - Analógicos e digitais
- Largura de banda
 - Depende da atenuação no par:
 - Função da espessura do fio e da distância percorrida

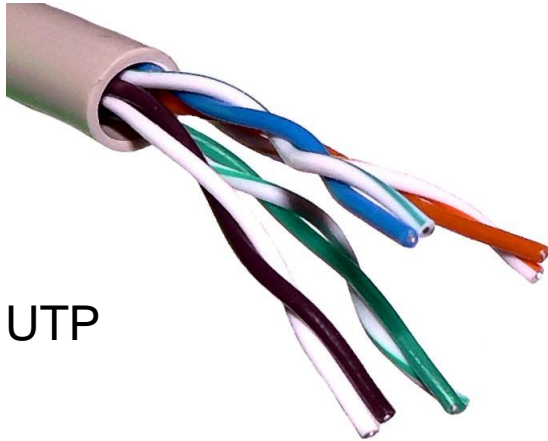
Cabos Blindados e Não blindados

- É possível blindar os cabos para reduzir interferências
 - Blindagem pode ser realizada nos pares individuais e/ou no conjunto de pares

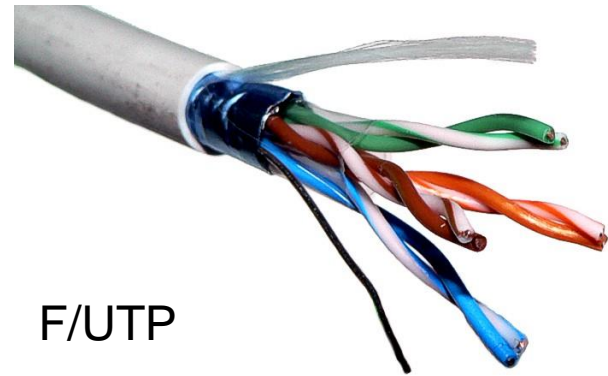
Cabos Blindados e Não blindados

- Norma ISO/IEC 11801 define uma nomenclatura para indicar o tipo de blindagem
 - xx/yTP - TP (Twisted Pair)
 - *y indica a blindagem dos pares*
 - U (*unscreened, sem blindagem*)
 - F (*foil screened, blindagem com fita metálica*)
 - *xx indica a blindagem do conjunto*
 - F (*foil screened, blindagem com fita metálica*)
 - S (*braid screened, blindagem com malha*)
 - SF, *para malha e fita metálica*

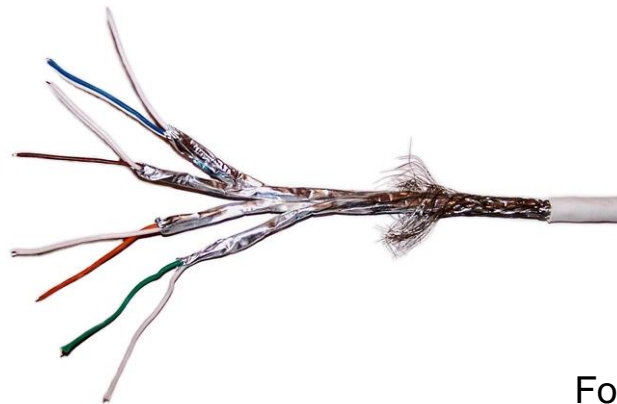
Cabos Blindados e Não blindados



UTP



F/UTP



S/FTP

Fonte das imagens: Wikimedia Commons

Categorias de pares trançados

	Cat. 3	Cat. 5	Cat. 5e	Cat. 6	Cat. 6a	Cat. 7
Blindagem	UTP	UTP	UTP	UTP ou STP	U/FTP, F/UTP, F/FTP	S/FTP
Taxa de dados Máxima Típica (Mbps)	10	100	1000	1000	10.000	10.000
Banda passante (MHz)	16	100	100	250	500	600

Categorias de pares trançados

	Cat. 3	Cat. 5	Cat. 5e	Cat. 6	Cat. 6a	Cat. 7
Blindagem	UTP	UTP	UTP	UTP ou STP	U/FTP, F/UTP, F/FTP	S/FTP
Taxa de dados Máxima Típica (Mbps)	10	100	1000	1000	10.000	10.000
Banda passante (MHz)	16	100	100	250	500	600

No cat5e os 4 pares são usados na recepção e transmissão.
No cat5, 2 são para transmissão e 2 para recepção

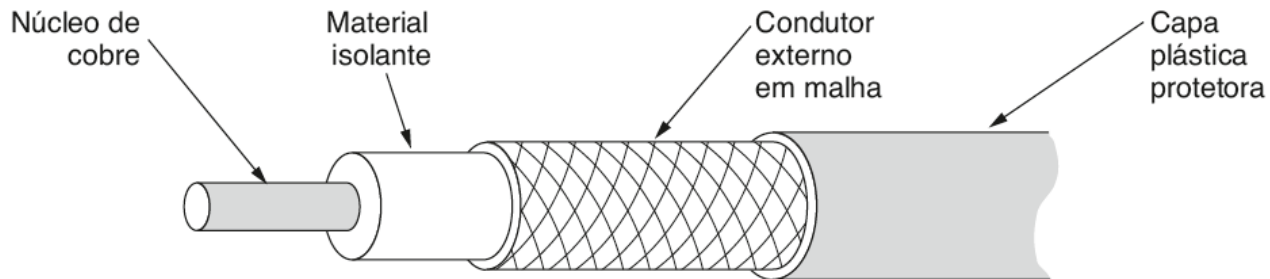
Categorias de pares trançados

	Cat. 3	Cat. 5	Cat. 5e	Cat. 6	Cat. 6a	Cat. 7
Blindagem	UTP	UTP	UTP	UTP ou STP	U/FTP, F/UTP, F/FTP	S/FTP
Taxa de dados Máxima Típica (Mbps)	10	100	1000	1000	10.000	10.000
Banda passante (MHz)	16	100	100	250	500	600

Taxa de dados apresentada é a típica. Por exemplo, Cat6 pode chegar a 10.000 Mbps, mas com cabos de apenas 55 metros

Cabo Coaxial

- Em comparação ao par trançado...
 - Tem melhor blindagem e, conseqüentemente, maior imunidade ao ruído
 - Logo, podem ser utilizados por distâncias maiores e com taxas de transmissão mais elevadas

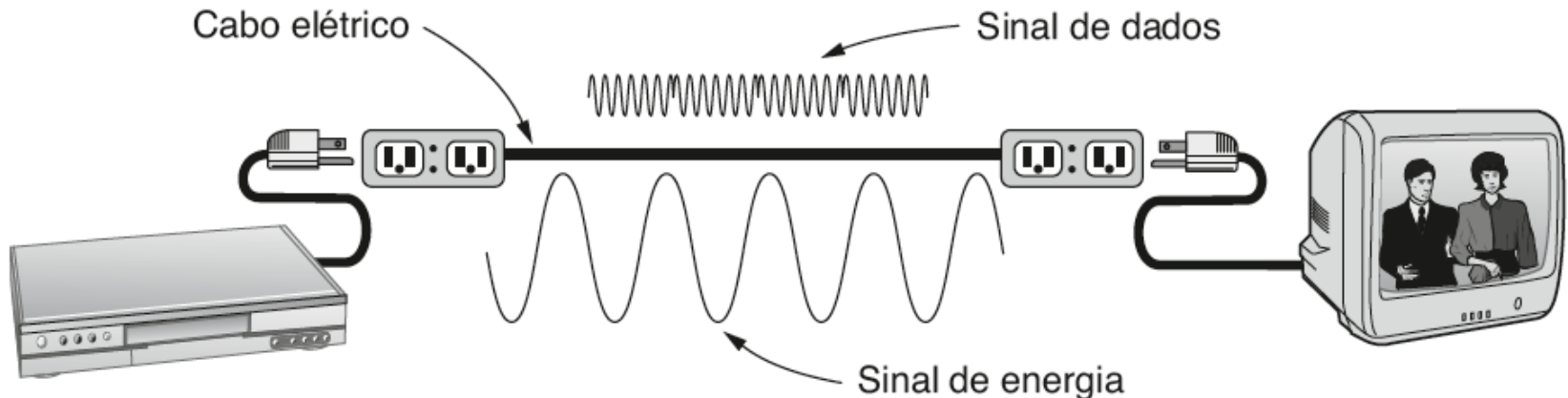


Linhas de Energia Elétrica

- Já são usadas para comunicações a baixas taxas
 - Medição remota e automação residencial (Padrão X10)
- Nos últimos anos...
 - Aumento no interesse para a comunicações de dados
 - Dentro de casa como uma LAN
 - Ex.: HomePlug
 - Fora de casa, para acesso à Internet

Linhas de Energia Elétrica

- Na rede de dados dentro de casa...
 - Eletricidade e dados poderiam compartilhar as mesmas linhas
 - **Multiplexação em frequência**
 - Problema: Forte atenuação e ruído



Fibras Ópticas

- IBM PC original (ano 1981)
 - Clock de 4,77 MHz
 - PC atuais (ano 2009)
 - Múltiplos núcleos com clocks de 3 GHz
- 16x maior...
- Enlaces de comunicação remoto
 - Linha T3 do sistema telefônico (ano 1981)
 - Taxa de 45 Mb/s
 - Linha moderna
 - Taxa de 100 Gb/s
- Aproximadam.
16x maior...

Fibras Ópticas

- Evolução das CPUs
 - Isoladamente, estão alcançando os limites físicos
 - **Evoluindo em número de núcleos**
- Evolução das fibras
 - Podem ultrapassar taxas da ordem de 50.000 Gb/s

O problema da evolução da fibra óptica é a incapacidade de processamento no domínio óptico. Dessa forma, o sinal deve ser convertido para o domínio elétrico, onde ele encontra uma velocidade de processamento limitada...

Fibras Ópticas

- Fibra até a última milha e até os consumidores
 - FTTH (*Fiber to the Home*)
 - Custo de instalação elevado
- Fibra nas transmissões por longas distâncias
 - Backbones das redes e em algumas LANs de alta velocidade

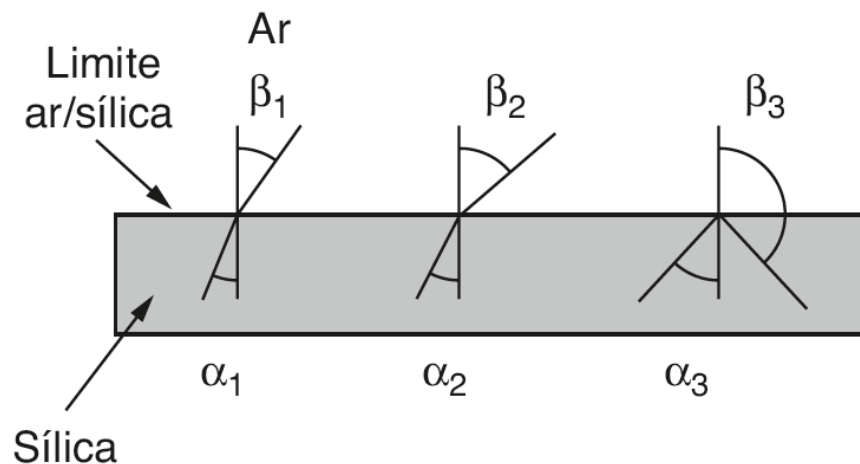
Sistema de Transmissão Óptica

- Possui três componentes principais:
 - Fonte de luz
 - Pulso de luz: Bit 1
 - Ausência de luz: Bit 0
 - Meio de transmissão
 - Fibra de vidro ultrafina
 - Detector
 - Gera um pulso elétrico quando detecta a incidência da luz

Conectando uma fonte de luz a uma extremidade da fibra e um detector na outra, tem-se um sistema unidirecional de transmissão óptica!

Sistema de Transmissão Óptica

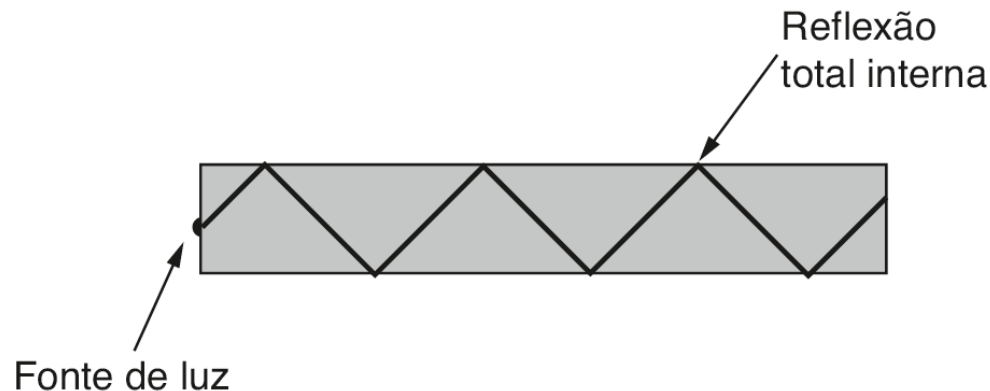
- Como acontece a transmissão da luz na fibra?
 - Propriedades físicas de refração e reflexão devido à mudança do meio físico (entre o ar e a fibra) são usadas
 - Lei de Snell-Descartes (Quem lembra?)
 - Três exemplos de raios de luz incidentes internamente



Ângulo de incidência α_i ,
ângulo de refração β_i e
índice de refração

Sistema de Transmissão Óptica

- Ângulo de incidência maior ou igual ao ângulo limite...
 - Luz confinada pela reflexão total interna



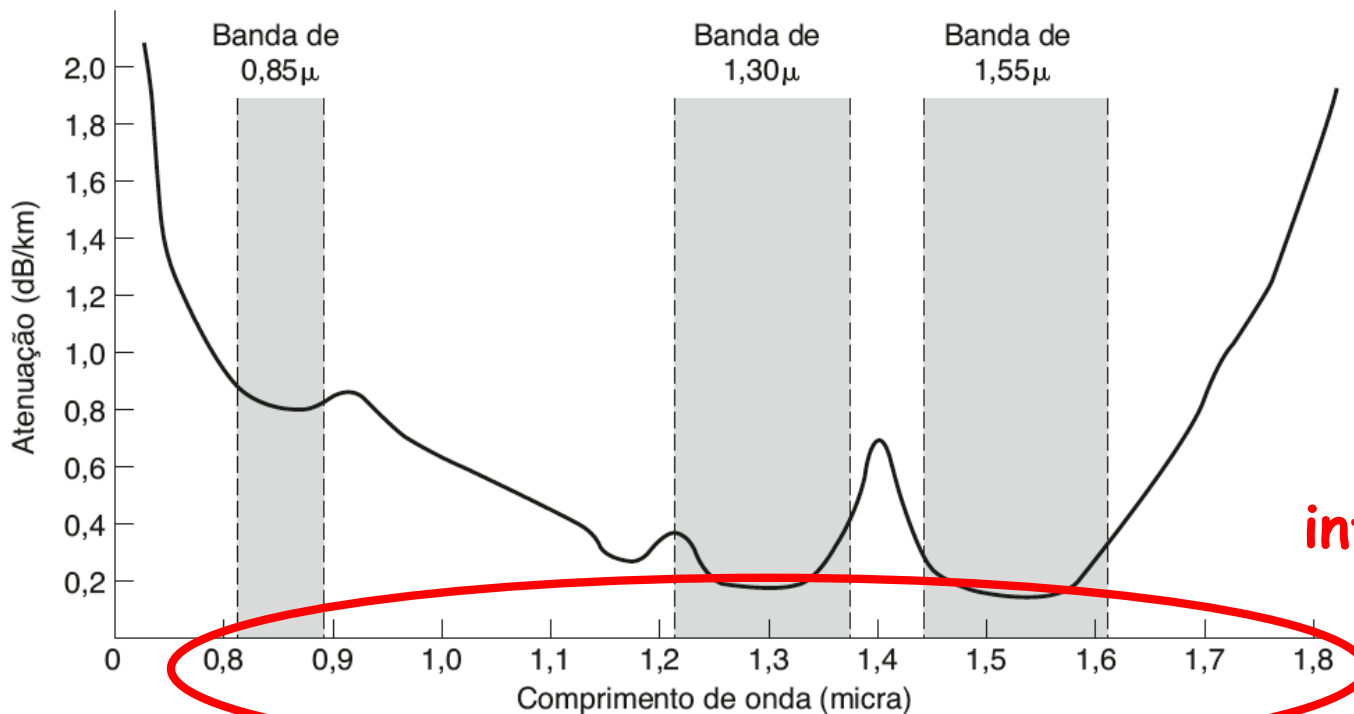
Sistema de Transmissão Óptica

- Todos os feixes de luz incidentes acima do ângulo limite serão refletidos totalmente
 - Feixes podem percorrer ângulos diferentes
 - Fibra multimodo
- Caso a fibra seja fina o suficiente para apenas os feixes com ângulo de incidência igual a 90° possam ser transmitidos...
 - Fibra funciona como um guia de onda
 - Fibra monomodo
 - Podem atingir 100 Gb/s por 100 km sem amplificação

Sistema de Transmissão Óptica

- Atenuação

- Depende do comprimento de onda da luz e de algumas propriedades físicas do vidro

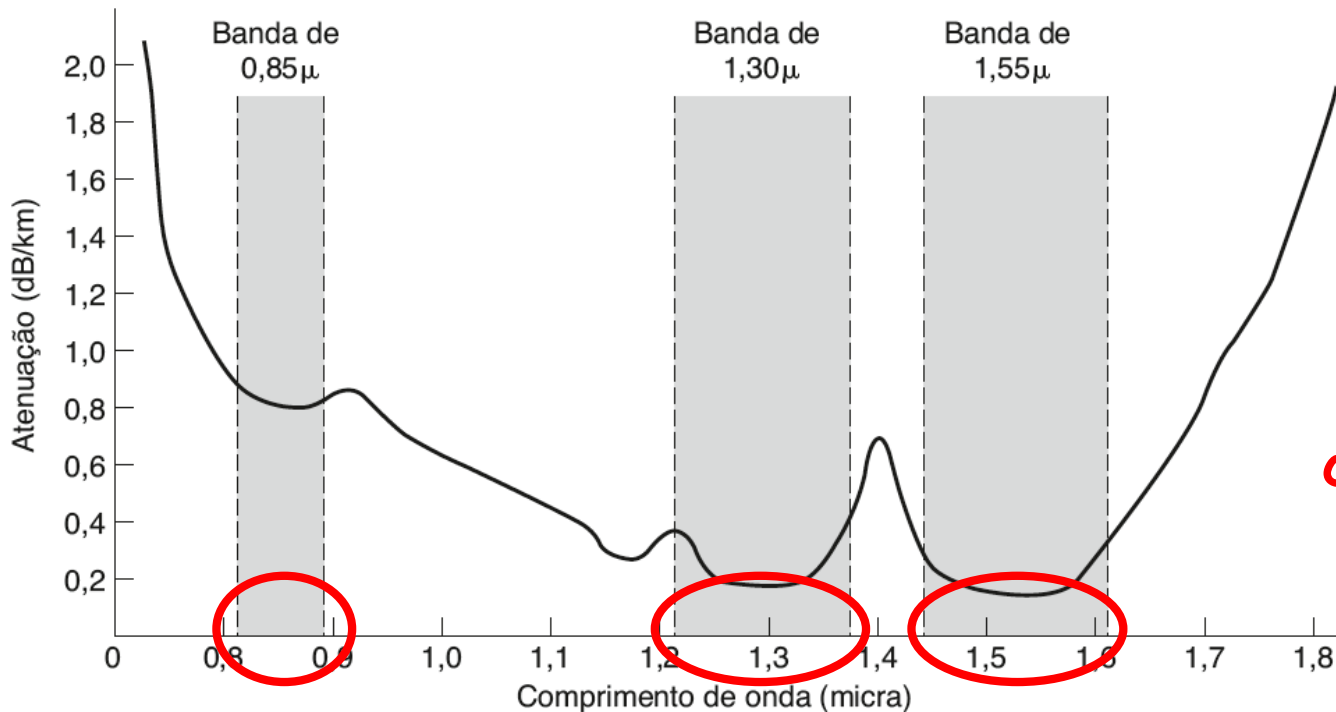


Região do infravermelho

Sistema de Transmissão Óptica

- Atenuação

- Depende do comprimento de onda da luz e de algumas propriedades físicas do vidro



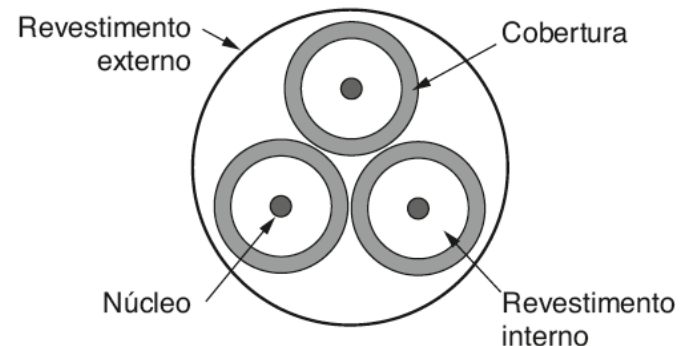
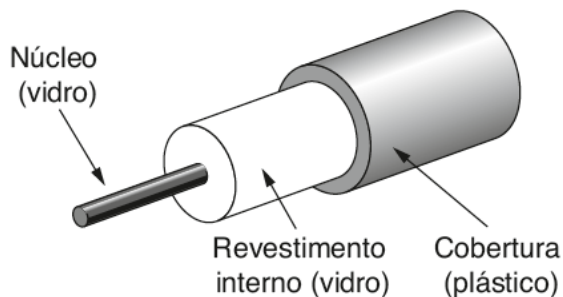
Bandas de comunicações ópticas

Sistema de Transmissão Óptica

- Atenuação
 - Os pulsos de luz se expandem à medida que se propagam
 - Dispersão cromática
 - Luz pode ser composta por feixes com diferentes comprimentos de onda
 - » Cada um terá um índice de refração diferente...
 - » E cada um irá se propagar com uma velocidade diferente
 - Com a distância, múltiplos pulsos podem se sobrepor...
 - Solução: Aumentar a separação dos pulsos
 - Geração dos pulsos pode dispensar a separação já que consegue reduzir a atenuação cromática
 - Sólitons (?!?)

Cabos de Fibra

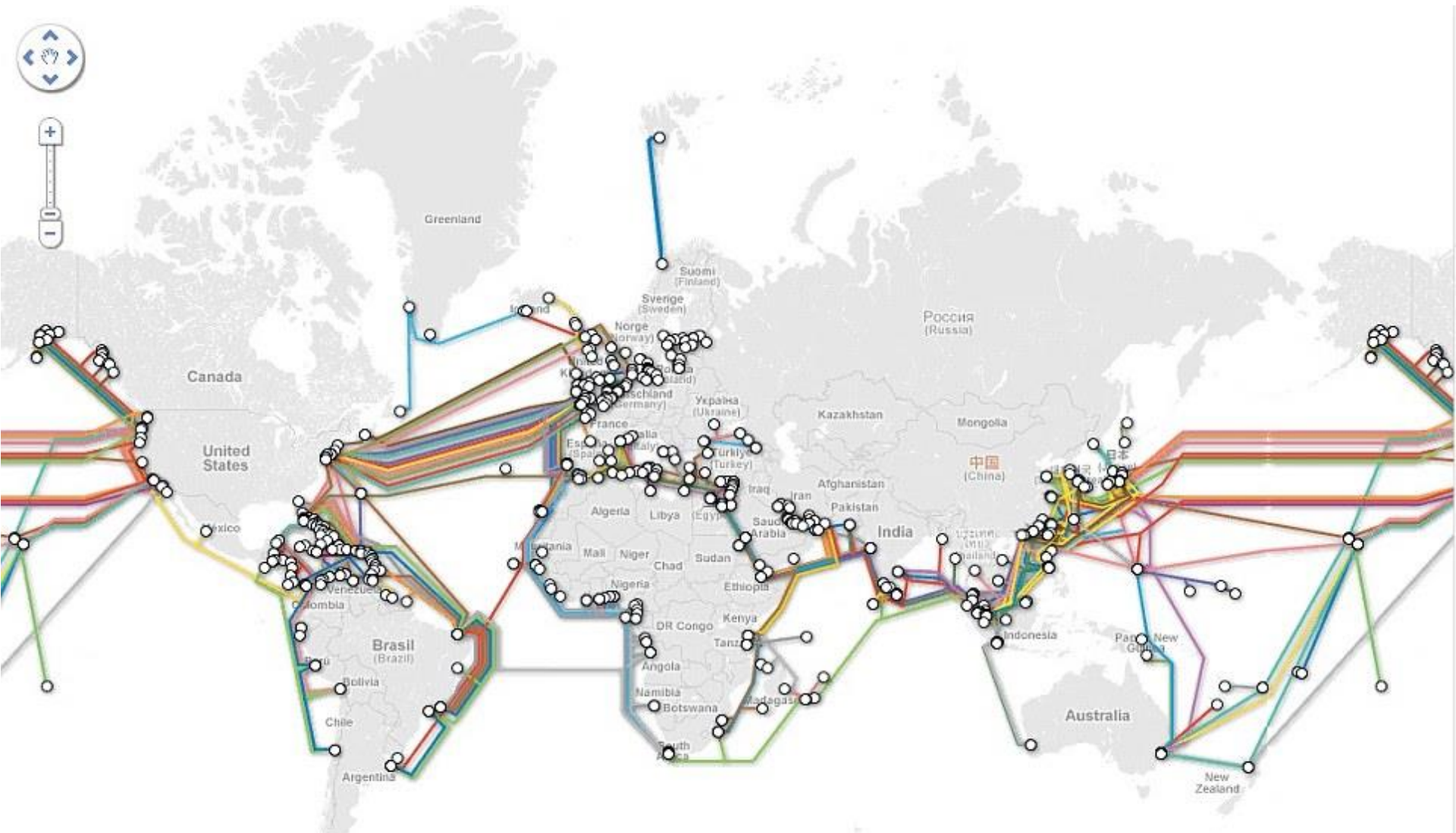
- Semelhantes aos cabos coaxiais
 - Apesar de não terem malha metálica
- Núcleo é revestido com vidro com índice de refração inferior
 - Diâmetro do núcleo da fibra:
 - Multimodo (50 micra) e monomodo (entre 8 e 10 micra)



Cabos de Fibra

- Instalação
 - No solo
 - Colocadas a um metro da superfície
 - No mar
 - Depositadas no fundo do mar
- Conexões
 - Conectores em suas extremidades
 - Luvas mecânicas que mantêm as extremidades ligadas
 - Fusão que une as extremidades

Cabos de Fibra



Fontes de Luz

- Comparação entre diodo semicondutor e LEDs emissores de luz

Item	LED	Laser semicondutor
Taxa de dados	Baixa	Alta
Tipo de fibra	Multimodo	Multimodo ou modo único
Distância	Curta	Longa
Vida útil	Longa	Curta
Sensibilidade à temperatura	Insignificante	Substancial
Custo	Baixo	Dispendioso

Recepção Óptica

- Fotodiodo
 - Emite um pulso elétrico ao ser atingido pela luz
- Existem redes ópticas apenas com componentes ópticos, necessitando de conversão elétrica apenas na borda

Fibra Ópticas X Fios de Cobre

- Fibra
 - Maior largura de banda
 - Menor atenuação
 - Requer um número menor de repetidores
 - Não é afetada por picos de tensão ou interferências eletromagnéticas
 - Não sofre corrosão
 - É mais fina e leve
 - Melhor para instalação em dutos já lotados
 - Melhor para transporte e suporte mecânico
 - Mais difícil de ser interceptada por sniffers

Fibra Ópticas X Fios de Cobre

- Cobre
 - Material mais valioso
 - Mais resistente ao manuseio
 - Fibra não pode ser dobrada
 - Único par pode ser usado para transmissões bidirecionais
 - Cada fibra é usada em uma direção
 - Interfaces mais baratas de conexão
 - Manutenção ainda é mais conhecida

Meios Não-Guiados

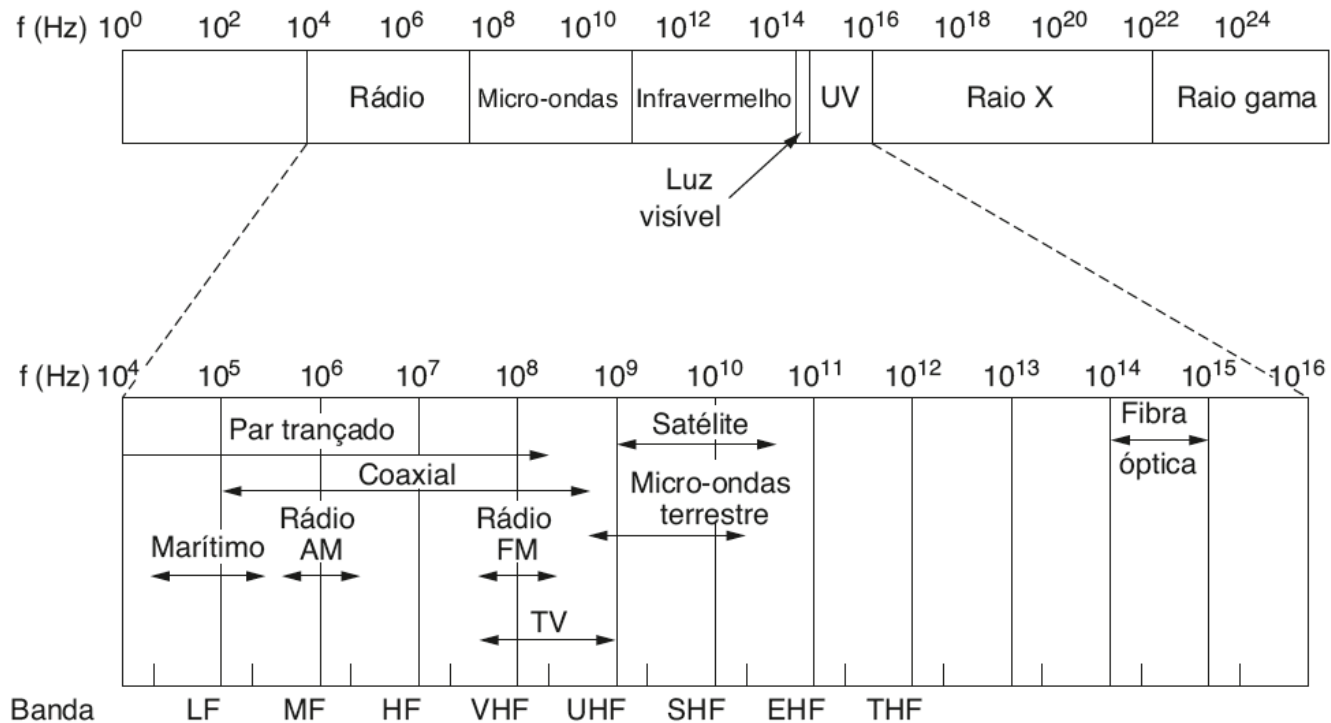
Meios Não-Guiados

- Transmissão sem-fio
 - Cumpre demanda de ubiquidade de acesso
 - *Usuários querem acesso "em qualquer lugar e a qualquer momento"*
 - *Par trançado, fibra, cabo coaxial não podem atender essa demanda*
 - Ainda em comparação às redes cabeadas...
 - *Maior facilidade de instalação*

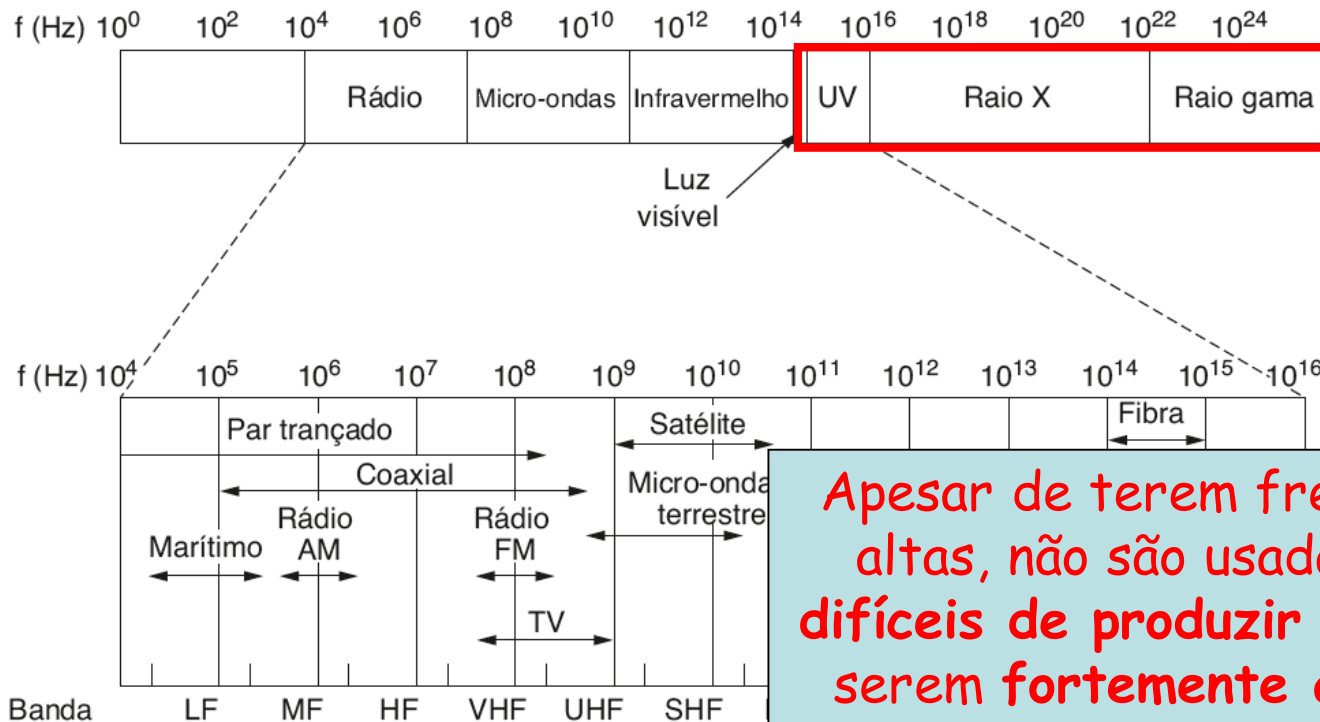
Princípios Básicos

- Corrente elétrica gera onda eletromagnética
 - Antena instalada em um circuito elétrico pode transmitir e receber ondas eletromagnéticas
- Velocidade de transmissão depende do meio e do comprimento de onda
 - Exceto no vácuo, onde as ondas eletromagnéticas viajam na velocidade da luz, independente do comprimento de onda
 - Na fibra...
 - Velocidade da luz é aproximadamente $2/3$ da velocidade da luz no vácuo

Espectro Eletromagnético

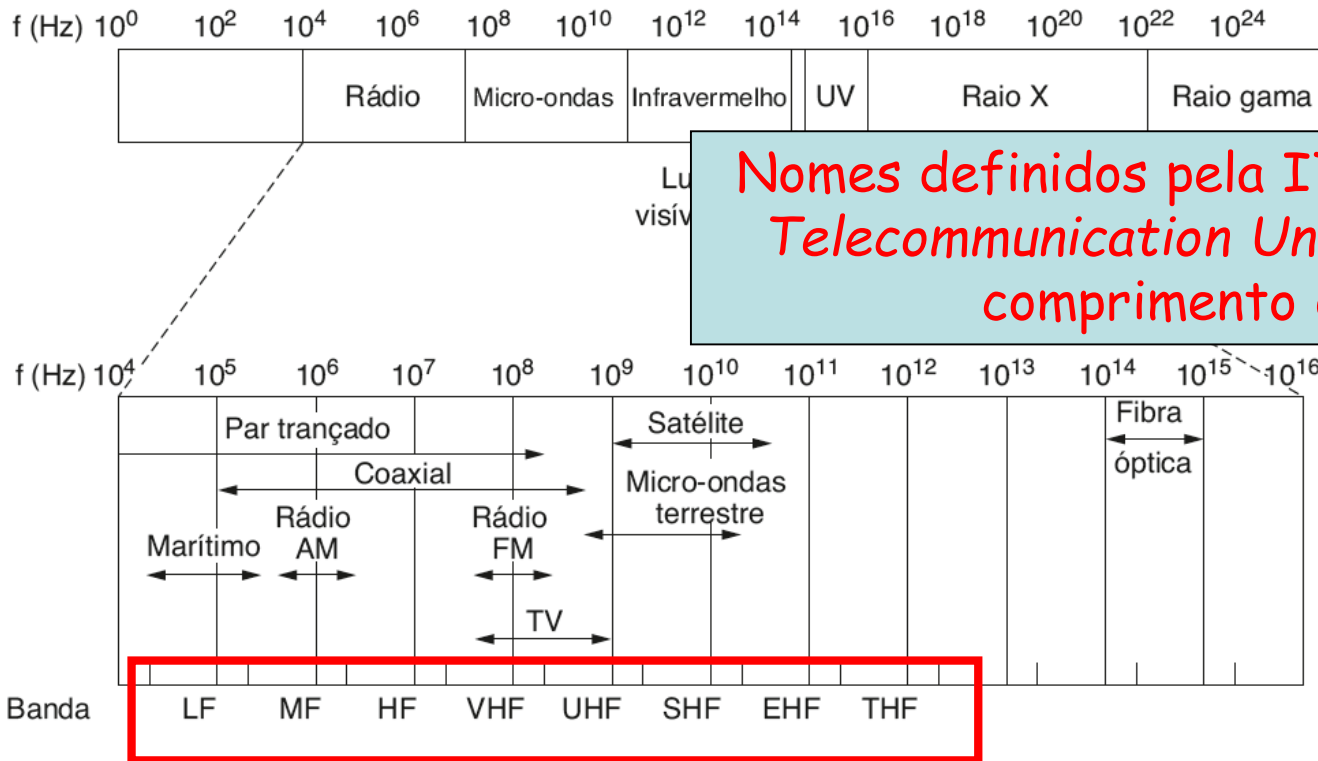


Espectro Eletromagnético



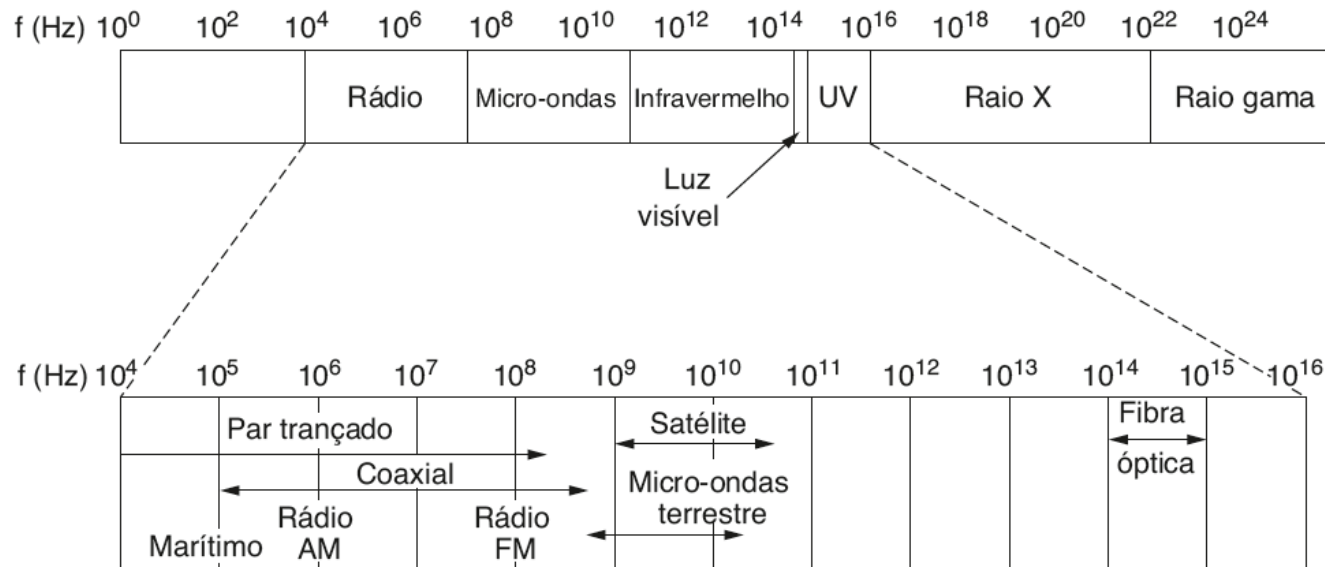
Apesar de terem frequências mais altas, não são usadas por serem difíceis de produzir e modular, por serem fortemente atenuadas em presença de obstáculos físicos e ainda prejudicarem a saúde humana

Espectro Eletromagnético



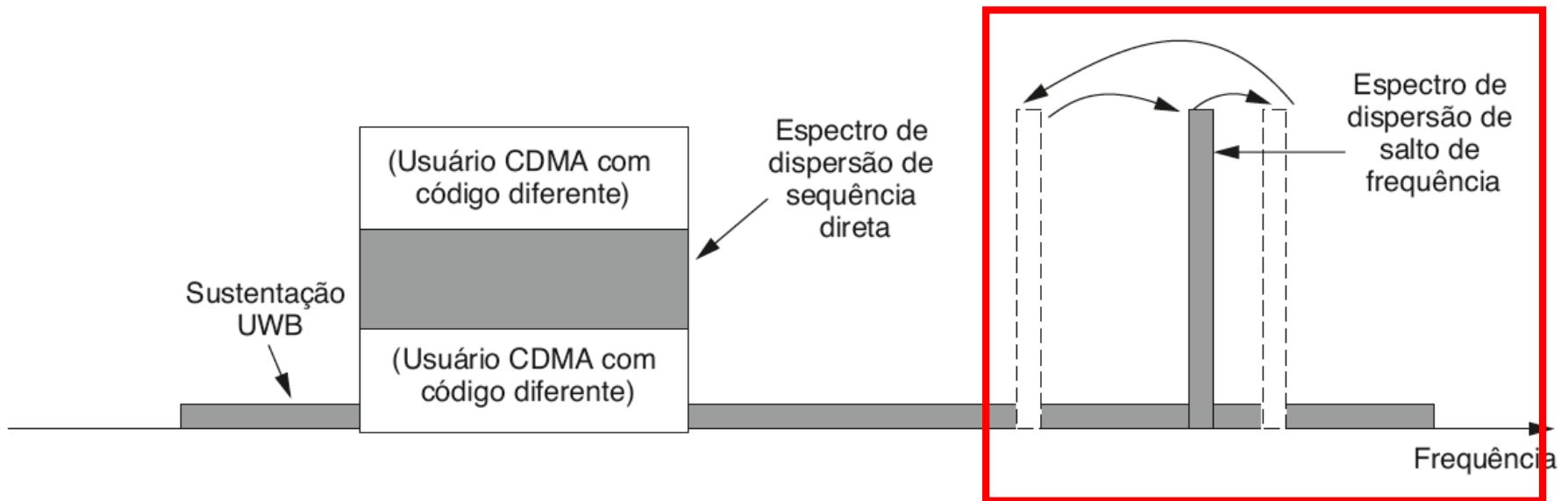
Nomes definidos pela ITU (*International Telecommunication Union*) baseados no comprimento de onda

Dispersão Eletromagnética



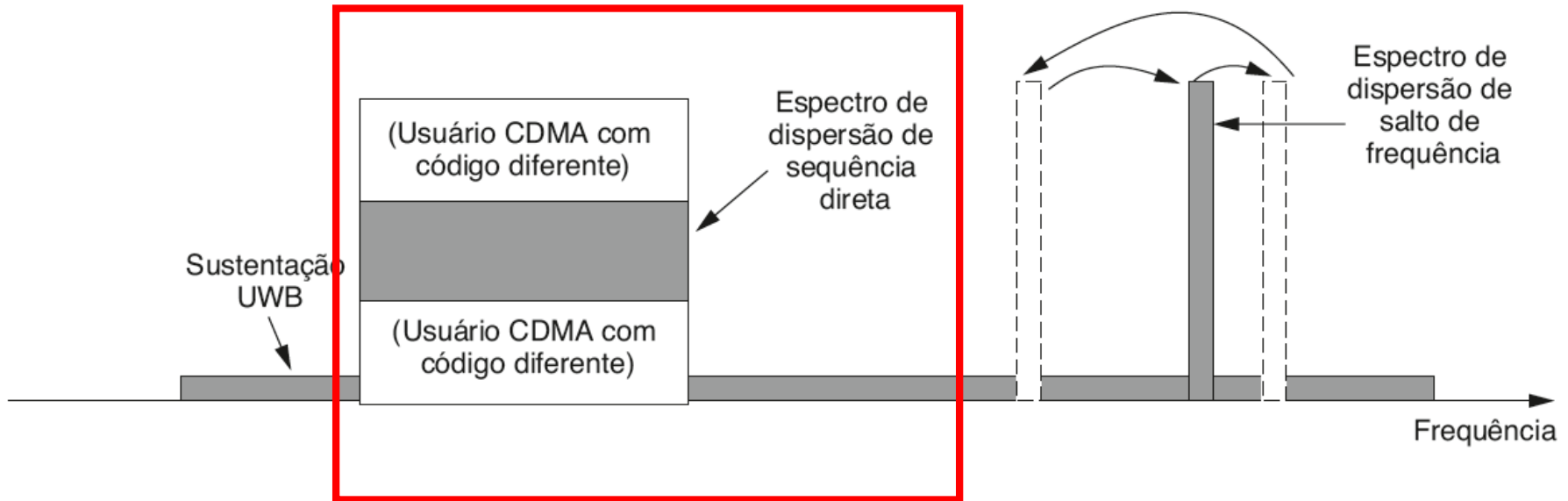
Normalmente, as transmissões utilizam uma faixa estreita de frequências ($\Delta f/f \ll 1$) para que se possa usar o espectro com maior eficiência. Será que esse método oferece robustez ao ruído, por exemplo?

Dispersão Eletromagnética



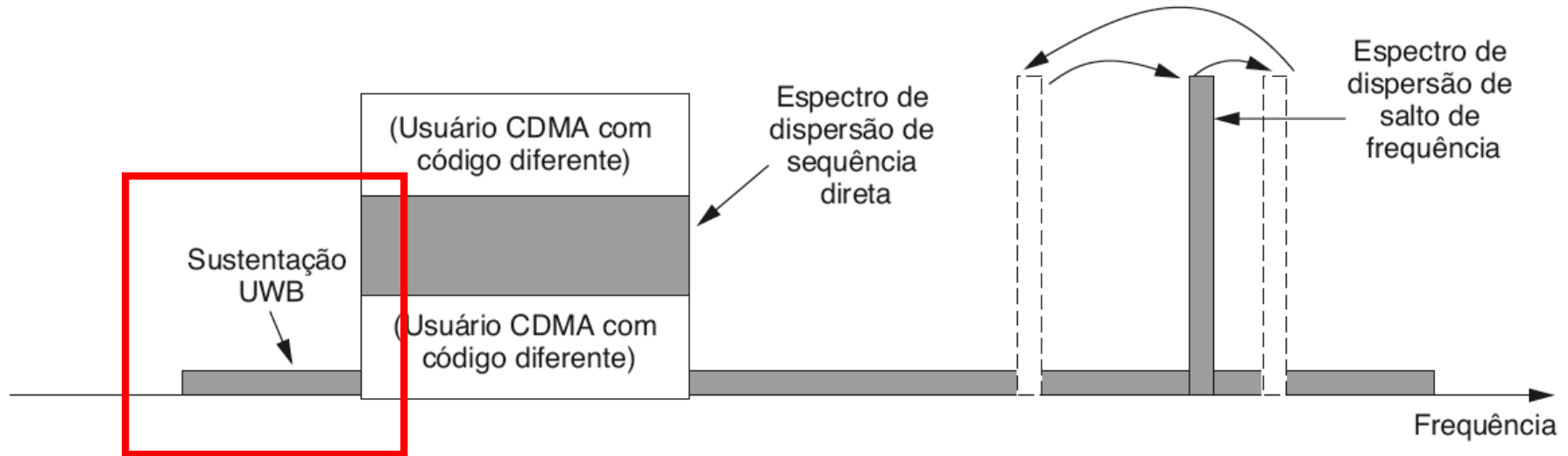
Dispersão por salto de frequência (FHSS - *Frequency-hopping Spread Spectrum*), na qual o transmissor salta de frequência centenas de vezes por segundo para dificultar a interceptação e oferecer maior robustez à atenuação por múltiplos saltos ou a ruídos de faixa estreita

Dispersão Eletromagnética



Dispersão de sequência direta (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum), na qual uma sequência de código é usada para dispersar o sinal de dados por uma banda de frequência mais ampla. Serve ainda para compartilhamento do espectro de frequências (CDMA). Pode ainda oferecer maior robustez à atenuação por múltiplos saltos ou a ruídos de faixa estreita

Dispersão Eletromagnética



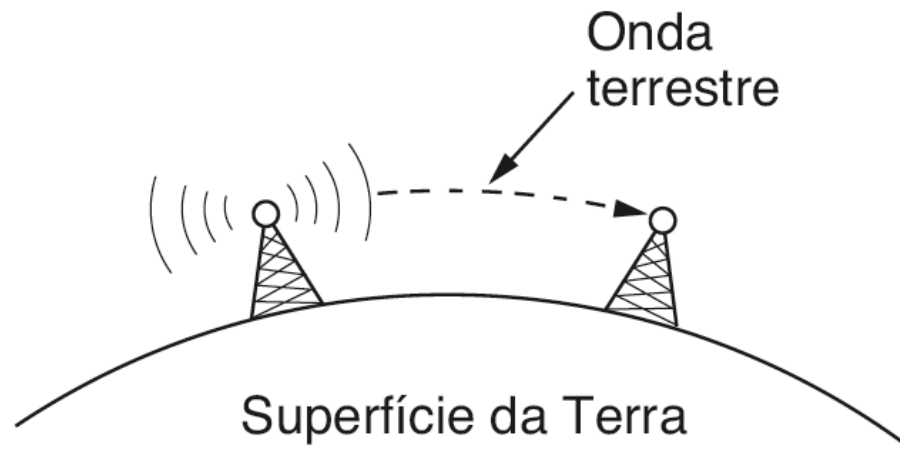
UWB (Ultra Wide-Band) que envia uma série de pulsos rápidos em diferentes posições para troca de informações. Essas rápidas variações levam o sinal a se espalhar por uma faixa larga de frequências. Seu espalhamento pode ainda oferecer maior robustez à atenuação por múltiplos saltos ou a ruídos de faixa estreita.

Transmissão de Rádio

- Pode percorrer longas distâncias
- Pode penetrar em prédios
- Pode ser utilizada tanto em ambientes abertos quanto em fechados
 - Entretanto...
- A potência cai com o quadrado da distância
- Está sujeita a interferências
- Em altas frequências, ainda sofrem
 - Reflexões, absorções (chuva), refração, difrações etc.

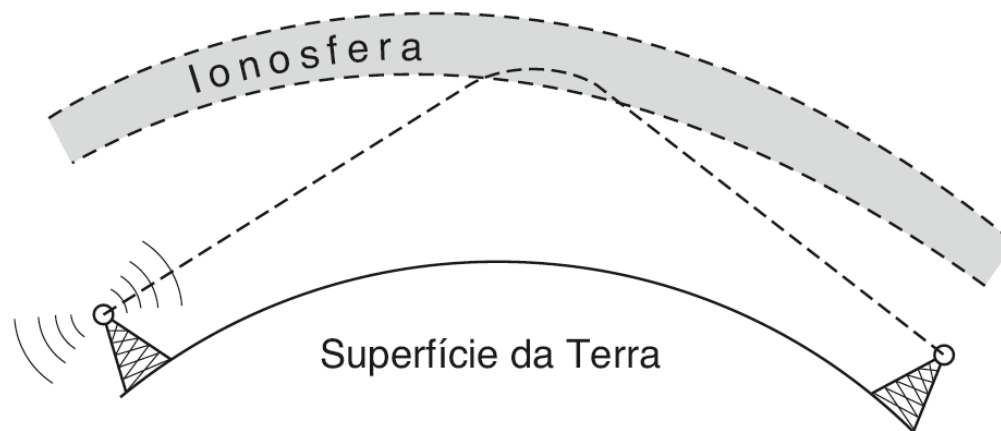
Transmissão de Rádio

- Faixas VLF, LF e MF
 - As ondas de rádio seguem a curvatura da Terra
 - Baixas frequências percorrem maiores distâncias e sofrem menor atenuação por obstáculos (prédios)
 - Radiodifusão em AM usa faixa MF



Transmissão de Rádio

- Faixa HF (ondas curtas)
 - As ondas terrestres seriam absorvidas pela terra
 - As transmissões são feitas pela ionosfera a uma altura de 100 a 500 km
 - As ondas sofrem múltiplas refrações até que refletem na ionosfera
 - Utilizadas por radioamador e antigas rádios internacionais



Transmissão de Micro-Ondas

- Acima de 100 MHz
 - Ondas trafegam praticamente em linha reta
 - Portanto, podem ser concentradas em um feixe estreito
 - Uso de antenas parabólicas para transmissão e recepção
 - Devem estar alinhadas com precisão
 - Podem ser usadas por longas distâncias
 - Necessidade de instalação de repetidores para contornar a curvatura da Terra
 - Quanto mais alto estiverem as antenas, maiores podem ser as distâncias
 - Sofrem com atenuação por obstáculos (prédios)

Transmissão de Micro-Ondas

- Acima de 4 GHz
 - Estimuladas pela necessidade crescente de espectro
 - Entretanto, as ondas podem ser absorvidas até mesmo pela chuva
 - Uso de redundância espacial
 - Enlaces de backup são usados, caso algum enlace operacional seja afetado por maior atenuação

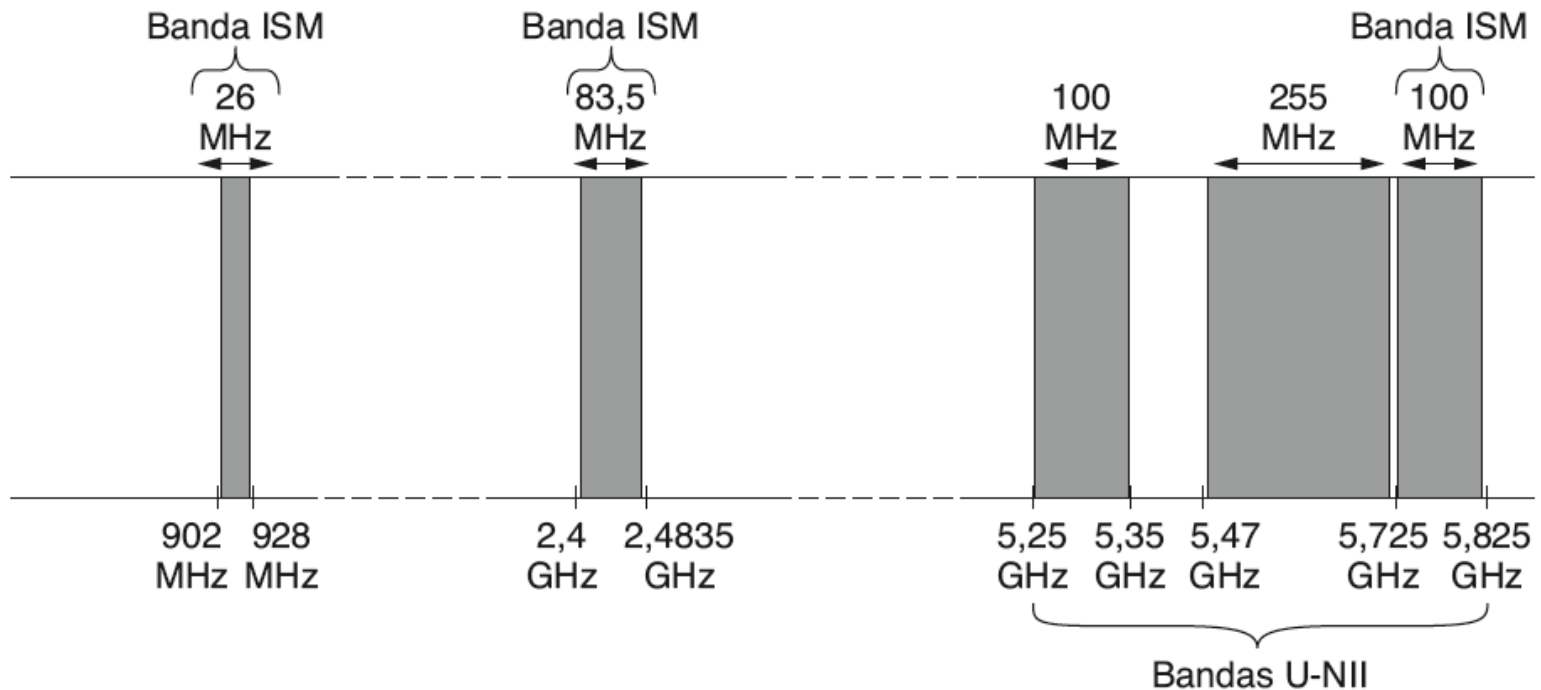
Transmissão de Micro-Ondas

- Em comparação à fibra óptica...
 - Pode ter menos custo e maior simplicidade de instalação
 - As fibras podem sofrer problemas como:
 - Direitos sobre o caminho de instalação
 - Obras em regiões de difícil acesso (áreas urbanas)
 - Arrendamento de rede de fibra de terceiros

Políticas do Espectro Eletromagnético

- Bandas do espectro para rádio, televisão e telefonia celulares
 - Uso regulamentado por órgãos nacionais e internacionais
 - ITU-R: Órgão internacional
 - Regulamentação a partir de:
 - Avaliação de proposta: Possibilidade de corrupção
 - Sorteio: Possibilidade de revenda
 - Leilão
 - Liberação de faixas para uso sem licença
 - As bandas ISM (U-NII nos EUA e HiperLAN na Europa)
 - Controle de potência (Máximo de 1W, por exemplo)

Políticas do Espectro Eletromagnético



Banda ISM varia de país para país...

Políticas do Espectro Eletromagnético

- Sucesso das redes sem-fio...
 - Estimula o aumento da capacidade de transmissão pelo aumento do espectro utilizável de frequências
 - **Faixa de 700 MHz:** Alocada para a TV, que foi liberada em alguns países com a migração da TV analógica para a digital
 - IEEE 802.11af (WLAN) e IEEE 802.22 (WRAN)
 - **Problema:** Dispositivos não licenciados devem ser capazes de detectar um emissor licenciado para lhe dar prioridade

Políticas do Espectro Eletromagnético

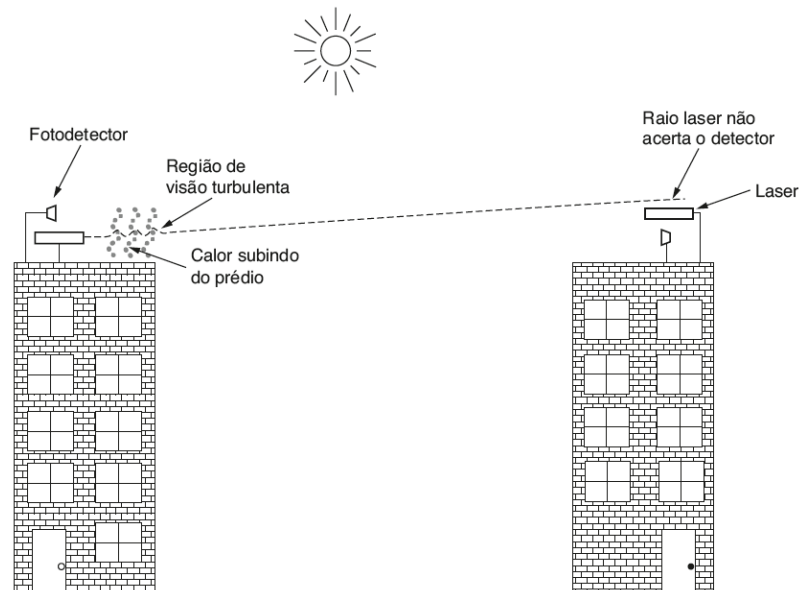
- Sucesso das redes sem-fio...
 - Estimula o aumento da capacidade de transmissão pelo aumento do espectro utilizável de frequências
 - **Faixa de 60 GHz:** Banda ISM com alta capacidade de transmissão
 - IEEE 802.11ad (WiGig)
 - **Problema:** As ondas de rádio são absorvidas até mesmo pelo oxigênio e, portanto, têm curto alcance

Transmissão em Infravermelho

- Utilizadas em comunicações de curto alcance
 - Ex. Dispositivos de controle remoto
 - Padrão IrDA (*Infrared Data Association*)
 - Taxas de até 4 Mb/s
- Vantagens:
 - Direcionais, econômicos e fáceis de montar
- Desvantagem:
 - Não atravessa objetos sólidos
 - Essa desvantagem também pode ser vista como uma vantagem já que evita interferência entre sistemas vizinhos!

Transmissão via Luz

- Transmissão óptica não-guiada (raio laser)
 - Comunicações são unidirecionais
 - Assim como nas fibras!
 - Problema: Dificuldade de manutenção do foco
 - Ex.: A convecção do ar pode interferir na comunicação a laser
 - Exemplo mais atual
 - LiFi

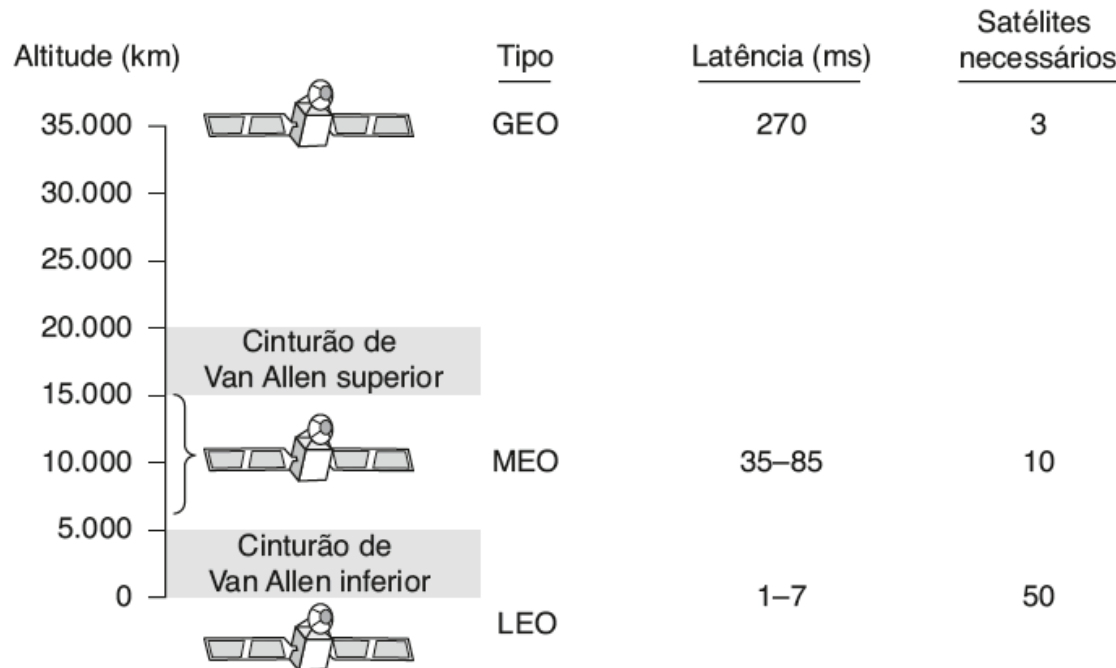


Satélites de Comunicação

- Quatro tipos:
 - Geoestacionários
 - *GEO (Geostationary Earth Orbit)*
 - Órbita média
 - *MEO (Medium Earth Orbit)*
 - Órbita baixa
 - *LEO (Low Earth Orbit)*
- Compostos por antenas e *transponders*
 - Cada transponder recebe o sinal em determinada frequência, converte para outra frequência e envia o sinal na nova frequência

Satélites de Comunicação

- Algumas propriedades:
 - Altitudes, atraso de ida e volta, número de satélites para cobertura global



Satélites Geoestacionários

- Satélites de altas órbitas
 - Em órbita circular equatorial, ficam estacionários em relação à Terra
- Espaçamento entre eles é de no mínimo 2 graus (depende da frequência)
 - Evita interferência entre eles
 - Número máximo limitado de satélites em órbita ao mesmo tempo (180 se espaçamento de 2 graus)
 - Cada transponder usa várias frequências e polarizações ao mesmo tempo para aumentar a largura de banda

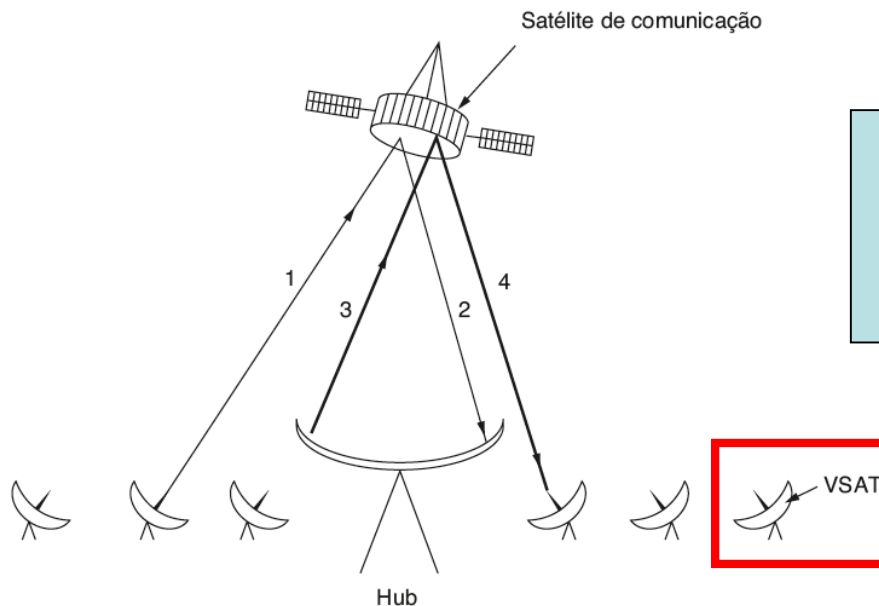
Satélites Geoestacionários

- Bandas de comunicação são definidas pela ITU
 - Algumas frequências podem interferir nas comunicações via micro-ondas terrestres
 - Canais de comunicação são unidirecionais
 - Uplink e downlink

Banda	Downlink	Uplink	Largura de banda	Problemas
L	1,5 GHz	1,6 GHz	15 MHz	Baixa largura de banda; lotada
S	1,9 GHz	2,2 GHz	70 MHz	Baixa largura de banda; lotada
C	4,0 GHz	6,0 GHz	500 MHz	Interferência terrestre
Ku	11 GHz	14 GHz	500 MHz	Chuva
Ka	20 GHz	30 GHz	3.500 MHz	Chuva; custo do equipamento

Satélites Geoestacionários

- VSATs (*Very Small Aperture Terminals*) com hub
 - Alternativa menos custosa para comunicações via satélite
 - Estações não tem energia suficiente para comunicação direta por satélite e por isso usam hubs intermediários

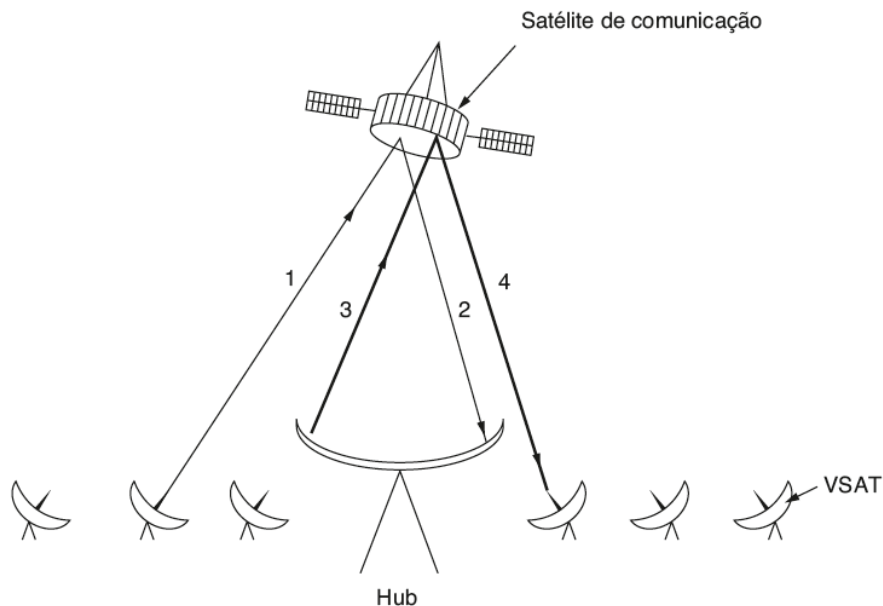


Abertura de 1m é 10x menor que a abertura de uma antena GEO padrão



Satélites Geoestacionários

- VSATs (*Very Small Aperture Terminals*) com hub
 - Problema: Atraso de propagação
 - Se o atraso típico de ida e volta das comunicações via satélite é de 270ms, mas com o hub, chega a 540ms...



Satélites de Órbita Média

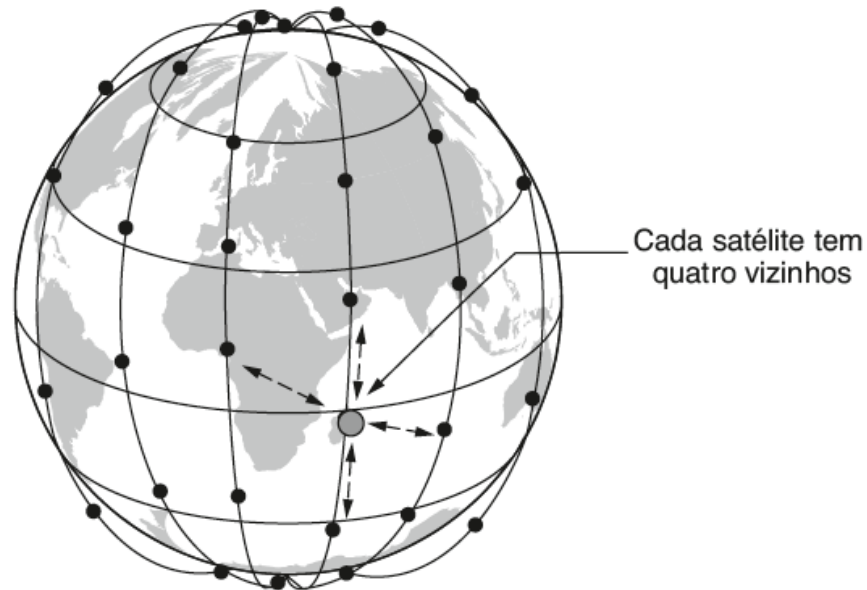
- Vistos da Terra, se deslocam em longitude
 - Demoram 6h para circular a Terra
 - Devem ser acompanhados enquanto se movem
- Tem uma área de cobertura menor que a dos GEOs
 - Exigem transmissores menos potentes para alcançá-los
- Não são usados para telecomunicações
 - Entretanto, são usados no sistema GPS (*Global Positioning System*)

Satélites de Órbita Baixa

- Rápido movimento
 - Exigem mais satélites para cobertura completa
 - Podem desaparecer mais facilmente
- Em compensação...
 - Introduzem um menor atraso de ida e volta
 - Não exigem alta potência de transmissão
 - São mais baratos em termos de lançamento

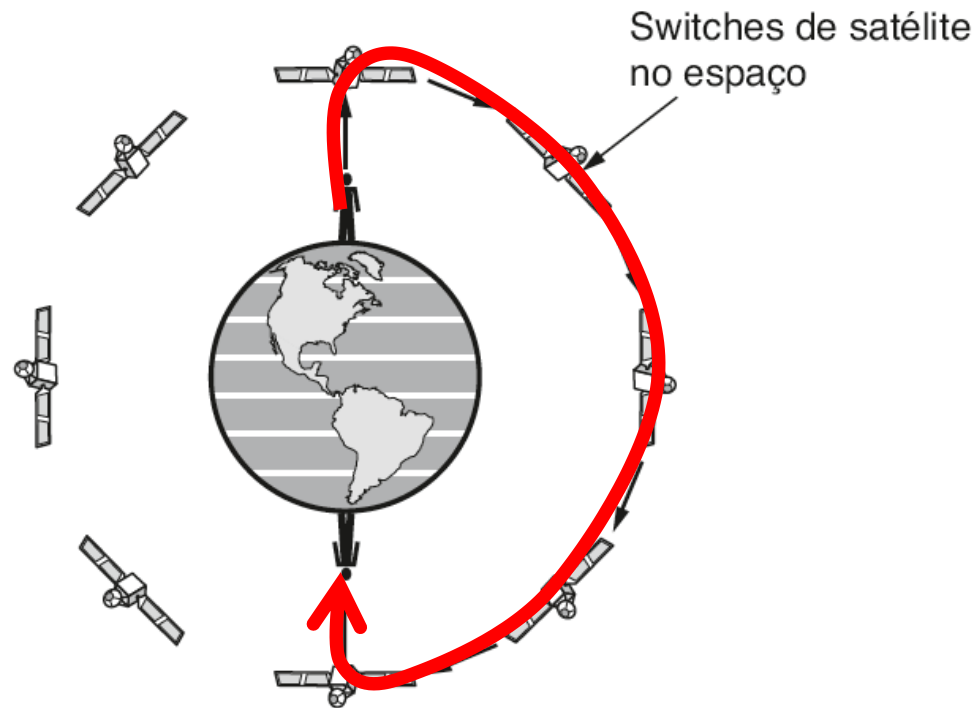
Satélites de Órbita Baixa

- Primeira iniciativa da Motorola
 - Projeto Iridium
 - 77 satélites formando seis cinturões em torno da Terra
 - 750 km de altitude
 - Caso um satélite saísse de vista, outro o substituiria



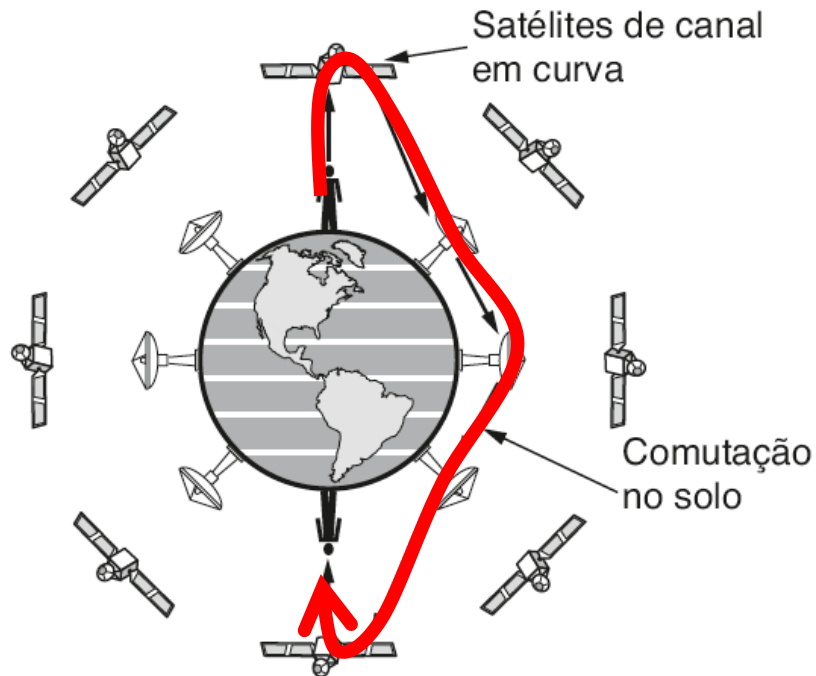
Satélites de Órbita Baixa

- Satélites vizinhos se comunicam
 - Retransmissão no espaço



Satélites de Órbita Baixa

- Retransmissão em terra
 - Alternativa da Globalstar
 - Mantém a tarefa mais complexa de comutação em terra para aumentar a facilidade de manutenção



Satélite X Fibra Óptica

- Satélite
 - Sobrevivência melhor
 - Melhor para regiões com pouca infraestrutura
 - Exs.: Mar ou deserto
 - Melhor para comunicações por difusão
 - Mensagens recebidas por muitas estações
 - Transmissões de um satélite GEO cobrem 1/3 da Terra
- Fibra óptica
 - Infraestrutura menos cara
 - Exceto em regiões atípicas
 - Indonésia e suas muitas ilhas

Modulação Digital e Multiplexação

Modulação Digital e Multiplexação

- Canais com ou sem fio
 - Transportam sinais analógicos
 - *Variação de tensão, intensidade da luz etc.*
- Envio de sinais digitais
 - Conversão entre bits e sinais
 - *Processo chamado de modulação digital*

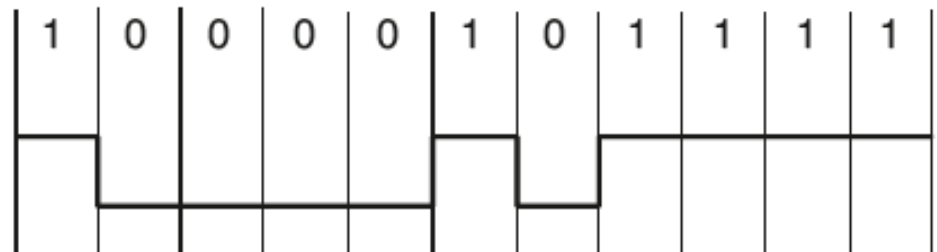
Modulação Digital e Multiplexação

- Modulação digital
 - Conversão direta de bits em sinal
 - Transmissão de banda base
 - Regulagem em amplitude, fase ou frequência de uma portadora que transporta bits
 - Transmissão de banda passante
 - Sinal ocupa uma banda de frequências em torno da frequência do sinal da portadora
- Caso haja compartilhamento do meio físico
 - Uso de multiplexação
 - Múltiplas transmissões no mesmo meio físico

Transmissão em Banda Base

- Non-Return-to-Zero (NRZ)
 - Forma mais simples de modulação digital
 - *Uso de tensões positivas e negativas*
 - Ex.: +V para 1 e -V para 0
 - Receptor converte sinal para bits
 - *Amostragem periódica do sinal*
 - *Atenuação e ruído distorcem o sinal recebido*

(a) Fluxo de bits



(b) NRZ (Non-Return-to-Zero)

Transmissão em Banda Base

- Non-Return-to-Zero (NRZ)
 - Forma mais simples de modulação digital

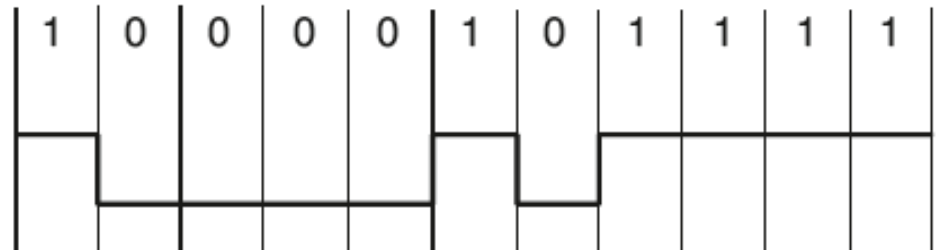
- Uso de tensões positivas e negativas

- Ex.: +V para 1

Esquema de modulação muito simples e raramente usado!
Tais esquemas de conversão de bits em sinais são chamados de códigos de linha

Atenuação e ruído distorcem o sinal recebido

(a) Fluxo de bits



(b) NRZ (Non-Return-to-Zero)

Limitações do NRZ

- Para taxa de bits T ...
 - É necessário uma largura de banda de $T/2$ Hz
 - Nyquist: $T = 2 \cdot \text{Banda} \cdot \log_2 V$
- Logo...
 - **NÃO** há como aumentar a taxa sem aumentar a banda

Se mais níveis fossem usadas, seria possível aumentar a taxa SEM aumentar a banda.

Ex.: Com 4 níveis pode-se representar todas as possíveis combinações de pares binários

Símbolos

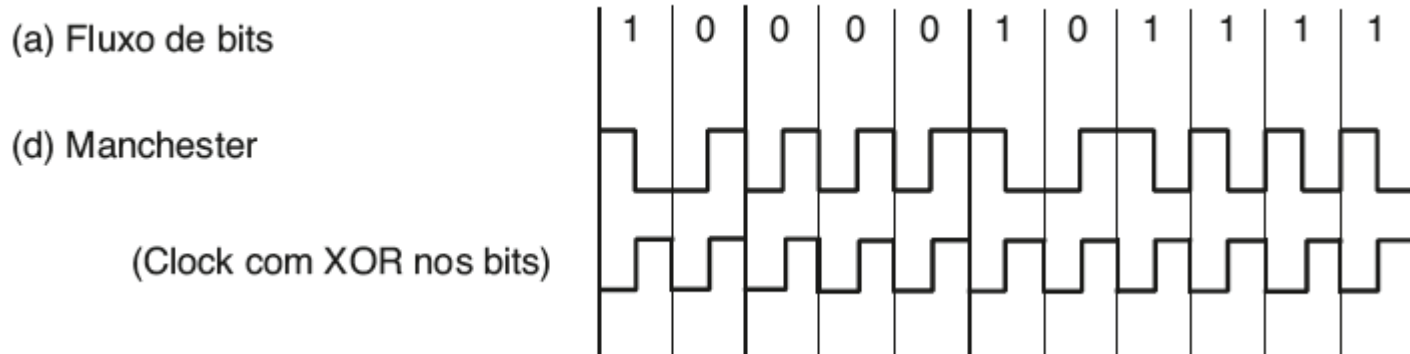
- Representação de sequências binárias através de níveis diferentes de tensão
 - +V representa 1 e -V representa 0
 - 1 bit por símbolo
 - +V representa 11, +0.5V representa 10, -0.5V representa 01 e -V representa 00
 - 2 bits por símbolo
- Taxa de bits = (taxa de símbolos)x(nº de bits/símbolo)
 - Taxa de símbolos era chamada de Taxa Baud

Recuperação de Clock

- Receptor precisa saber quando começa e quando termina um símbolo...
 - No NRZ, como poderíamos diferenciar 15 de 16 zeros seguidos?
 - **Uso do clock**
- Receptor precisa conhecer o clock antes de usá-lo...
 - O clock poderia ser conhecido a priori
 - **Mas precisaria de precisão em relação ao do transmissor**
 - O clock poderia ser recuperado no destinatário
 - **Mas seria enviado como um sinal paralelo aos dados ou**
 - **Poderia ser misturado com o sinal de dados**

Codificação Manchester

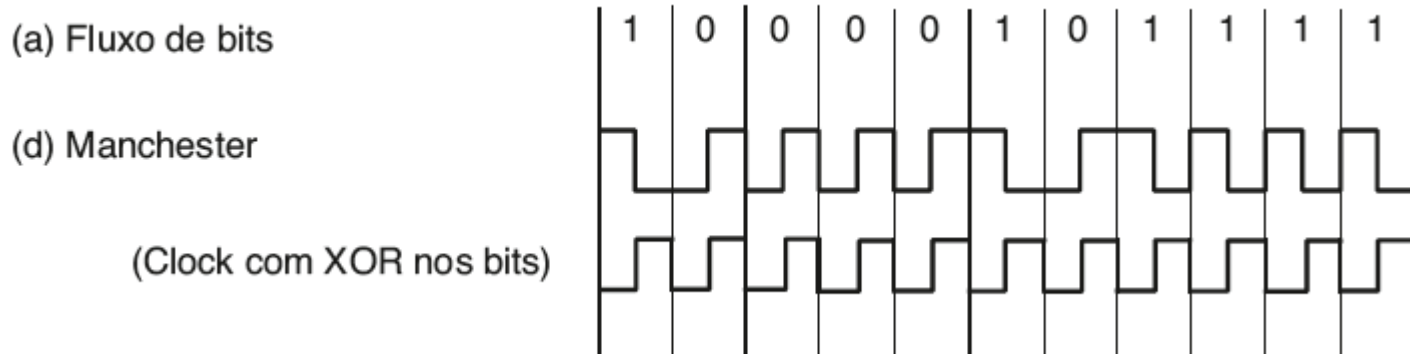
- Recupera o clock a partir da combinação com o sinal
 - Operações de XOR



- Usada pelo padrão Ethernet
- Qual a limitação da codificação Manchester?

Codificação Manchester

- Recupera o clock a partir da combinação com o sinal
 - Operações de XOR



- Usada pelo padrão Ethernet
- Qual a limitação da codificação Manchester?
 - Exige duas vezes mais banda passante que o NRZ
 - Banda passante era o problema inicial...

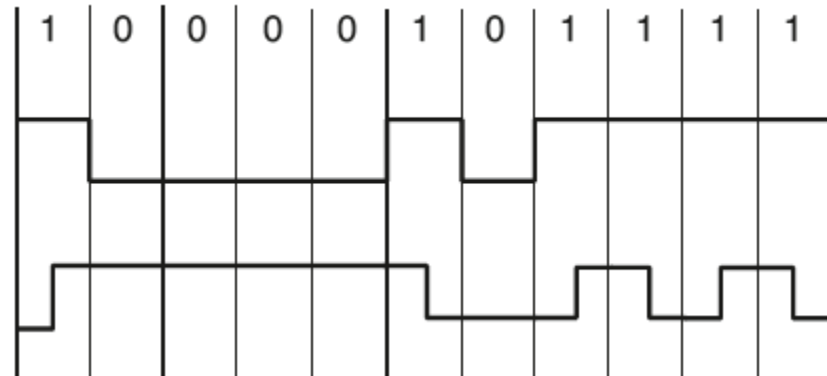
Non-Return-to-Zero Inverted (NRZI)

- Voltando ao NRZ, um problema para a recuperação do clock eram as sequências longas **sem transição**
 - Sequências de 0's ou de 1's...
- Usados pelo padrão USB
- No NRZI, as transições são usadas
 - Presença de transição: Bit 1
 - Ausência de transição: Bit 0

(a) Fluxo de bits

(b) NRZ (Non-Return-to-Zero)

(c) NRZ inverso (NRZI)



Non-Return-to-Zero Inverted (NRZI)

- Voltando ao NRZ, um problema para a recuperação do clock eram as sequências longas sem transição
 - Sequências de 0's ou de 1's...
- Usados pelo padrão USB
- No NRZI as transições são usadas

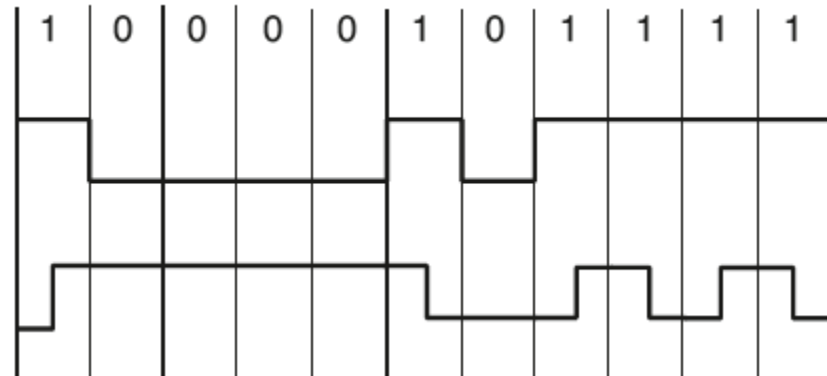
Problema permanece para sequências grandes de zeros...

- Presença de transição: Bit 1
- Ausência de transição: Bit 0

(a) Fluxo de bits

(b) NRZ (Non-Return-to-Zero)

(c) NRZ inverso (NRZI)



Codificação 4B/5B

- Mapeamento de sequências de bits em outras sem sequências repetidas de 0's ou 1's
 - Para isso ser possível, o mapeamento deve ser maior que o sinal de origem
 - Ex.: 0000 -> 00100
- Codificação 4B/5B
 - Mapeia cada 4 bits em um padrão fixo de 5 bits
 - Não há mais que 3 zeros em sequência
 - Possui 20% de overhead
 - Menor que os 100% da codificação Manchester

Codificação 4B/5B

- Algumas combinações não são usadas...
 - $2^4 = 16$ de dados contra $2^5 = 32$ do mapeamento
 - Os símbolos não usados podem ser usados para controle
 - 11111 representa linha ocupada, por exemplo

Dados (4B)	Código (5B)	Dados (4B)	Código (5B)
0000	11110	1000	10010
0001	01001	1001	10011
0010	10100	1010	10110
0011	10101	1011	10111
0100	01010	1100	11010
0101	01011	1101	11011
0110	01110	1110	11100
0111	01111	1111	11101

Sinais Balanceados

- Possuem tanto tensões positivas quanto negativas
 - Mesmo em curto intervalos de tempo
- Vantagens:
 - Mistura de sinais positivos e negativos forçam transições
 - » Ajudam na recuperação do clock
 - Calibragem de receptores é mais simples já que a média de tensão em zero pode ser usada como patamar de decisão
 - » Uma grande sequência de 1's levaria a média para algum valor acima de 1...
 - » Já uma grande sequência de 0's levaria a uma outra média de tensão → a variação do patamar dificulta a decisão

Sinais Balanceados

- Possuem média de tensão zero
 - Não possuem componente elétrico de corrente contínua (CC)
- Vantagens:
 - Linhas podem atenuar essa componente
 - Receptores capacitivos filtram componentes CC, deixando passar apenas as componentes de corrente alternada (CA)

Codificação Bipolar

- Alternativa para sinalização balanceada
 - $+V$ ou $-V$ representam o 1 lógico
 - Transmissão do 1 é alternada entre $+V$ e $-V$ de modo a garantir o balanceamento
 - $0V$ representa o 0 lógico
- Nas redes de telefonia...
 - Alternate Mark Inversion (AMI)

(a) Fluxo de bits

(e) Codificação bipolar
(também Alternate Mark
Inversion, AMI)



Transmissão em Banda Passante

- Faixas de frequência que começam no zero
 - Em redes sem-fio, isso implicaria antenas muito grandes
 - Tamanho da antena é função do comprimento de onda
 - Em meios compartilhados, isso implicaria em baixa eficiência
 - Todos os sinais seriam transmitidos na mesma faixa de frequência

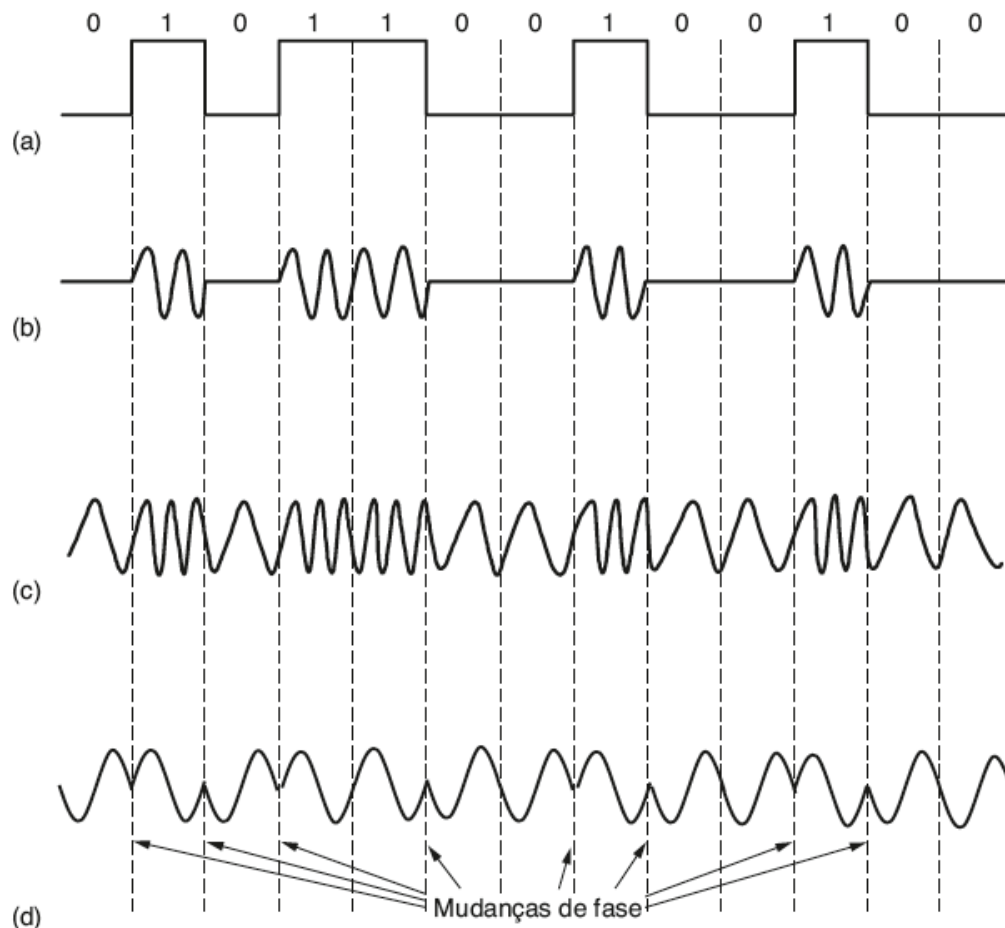
Transmissão em Banda Passante

- Escolha da faixa de frequência
 - Uma faixa de frequências arbitrária é usada para a transmissão do sinal
 - Sinal é deslocado para essa faixa arbitrária
 - Na recepção, o sinal pode ser retornado para banda base por simplicidade de detecção de símbolos

Transmissão em Banda Passante

- Modulação digital
 - Transmissão da banda passante modula um sinal de portadora sobreposto à banda passante
 - Modulação em amplitude
 - ASK (*Amplitude Shift Keying*)
 - Modulação em frequência
 - FSK (*Frequency Shift Keying*)
 - Modulação em fase
 - PSK (*Phase Shift Keying*)

Transmissão em Banda Passante

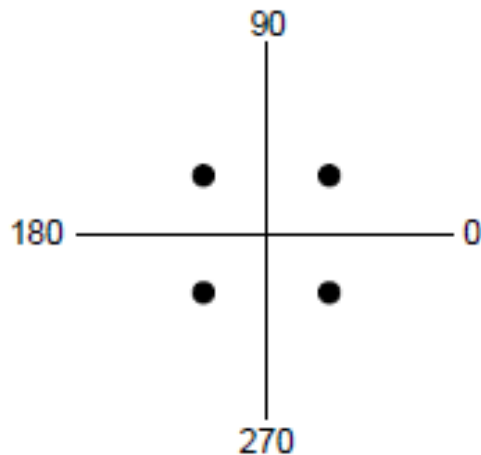


Modulação em Quadratura

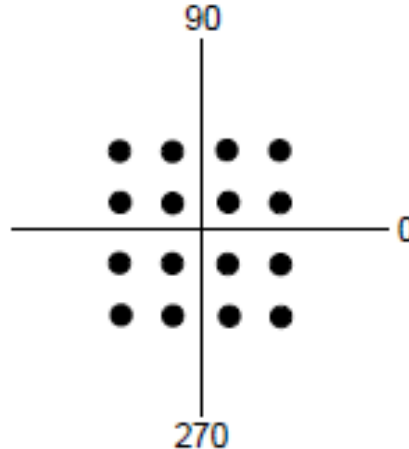
- Uso mais eficiente da largura de banda
 - *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*
 - 4 deslocamentos de fase: 45, 135, 225 e 315 graus
 - 2 bits por símbolo
- Esquemas de modulação podem ser combinados
 - Aumento do número de bits por símbolo
 - Em geral, amplitude e fase são moduladas em combinação

Modulação em Quadratura

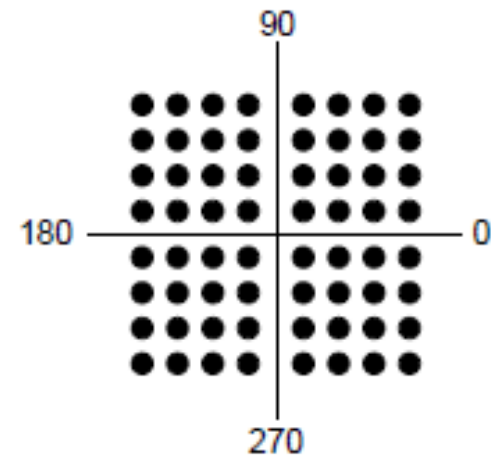
- Diagrama de constelação
 - Distância do ponto até a origem dá a amplitude
 - Ângulo entre o eixo x positivo e a linha ligando o ponto com a origem dá a fase



QPSK



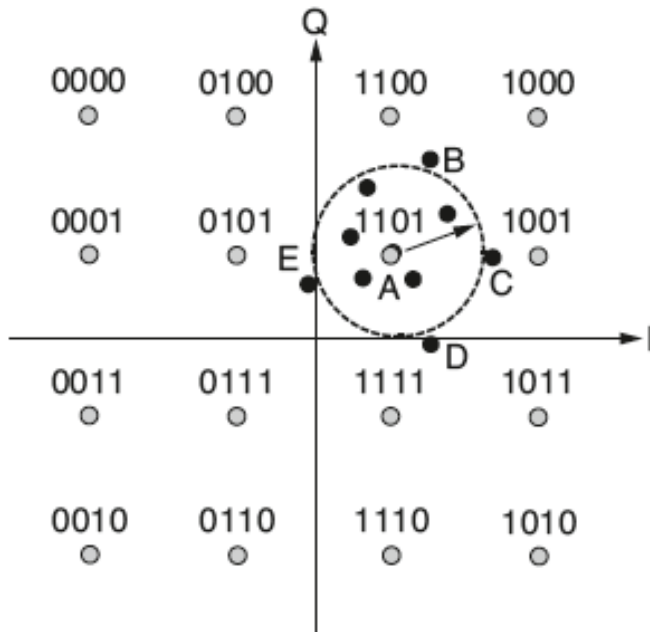
QAM-16



QAM-64

Modulação em Quadratura

- Código de Gray QAM-16
 - Mapeamento que evita que símbolos adjacentes tenham mais de um bit diferente
 - Isso reduz o erro ocasionado pelo ruído



Quando 1101 é enviado:

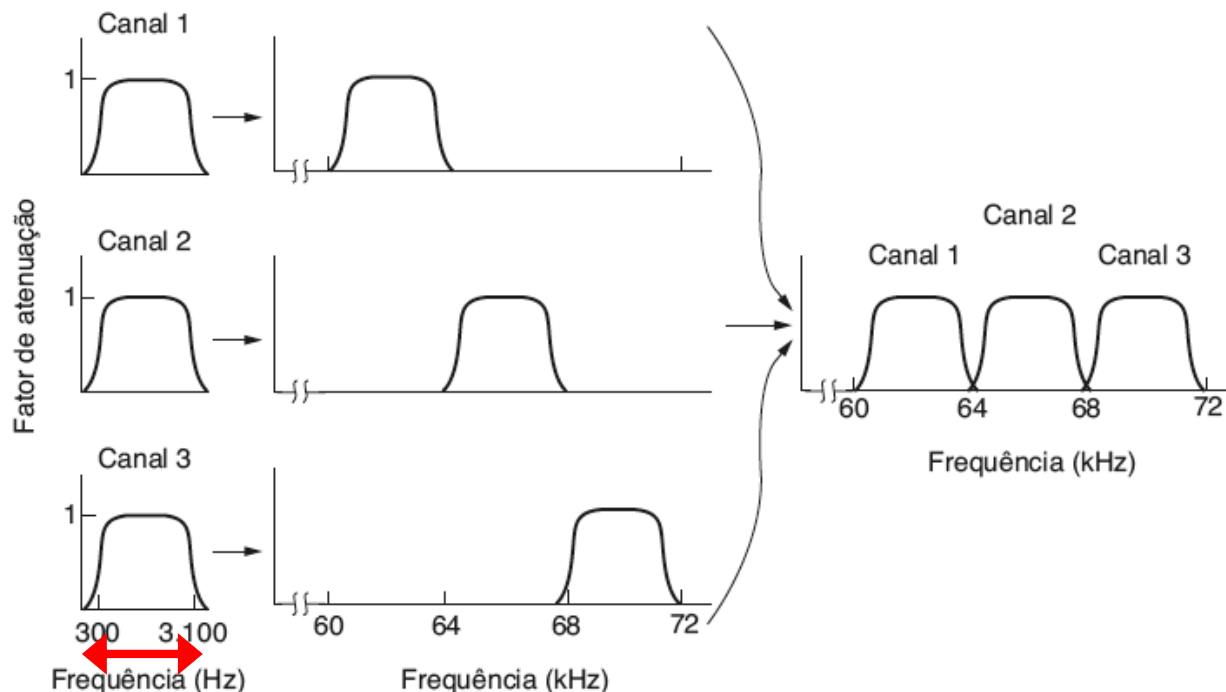
Ponto	Decodifica como	Erros de bit
A	1101	0
B	110 <u>0</u>	1
C	<u>1</u> 001	1
D	11 <u>1</u> 1	1
E	<u>0</u> 101	1

Multiplexação

- Esquemas de modulação
 - Permitem o uso de sinais para transmissão de bits
 - Enlaces com ou sem fios
- Entretanto...
 - Os custos de instalação de uma linha de transmissão entre um par de nós é semelhante, independente da largura de banda
 - Então, por que não instalar uma linha de transmissão com largura de banda grande e compartilhar os recursos?
 - MULTIPLEXAÇÃO

Multiplexação por Divisão de Frequência - FDM

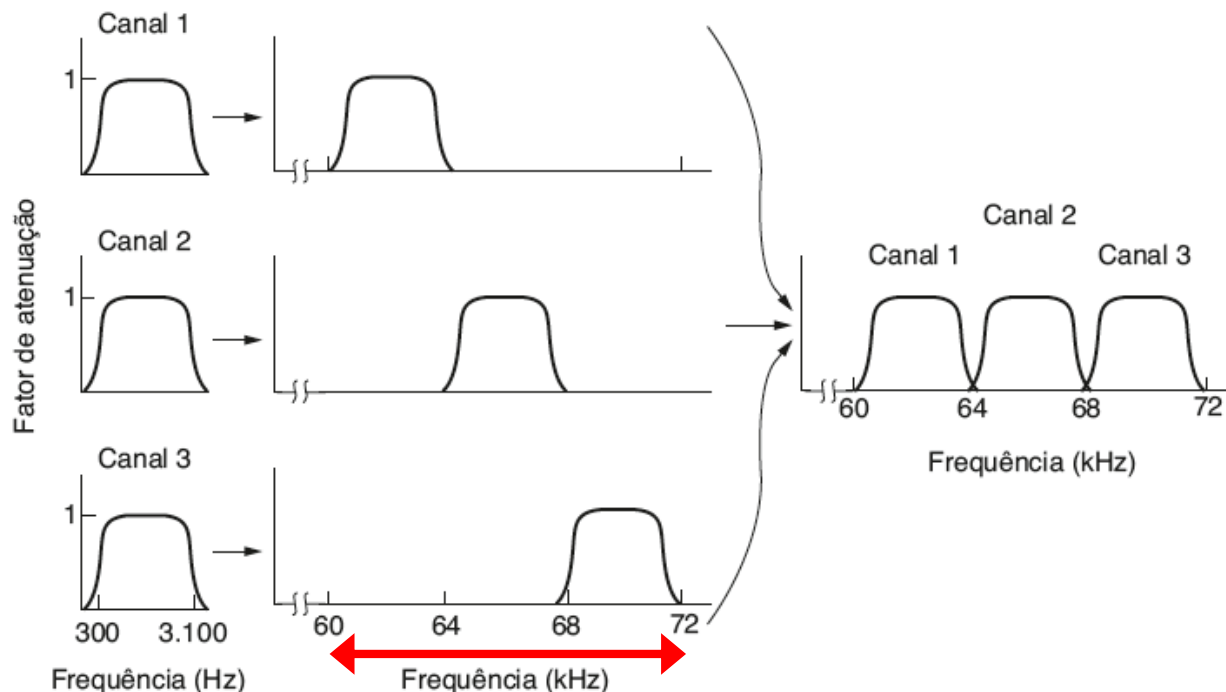
- Divide os espectro de frequências em bandas
 - Cada banda é dada a um usuário
 - Rádio AM usa multiplexação FDM



Largura de banda original

Multiplexação por Divisão de Frequência - FDM

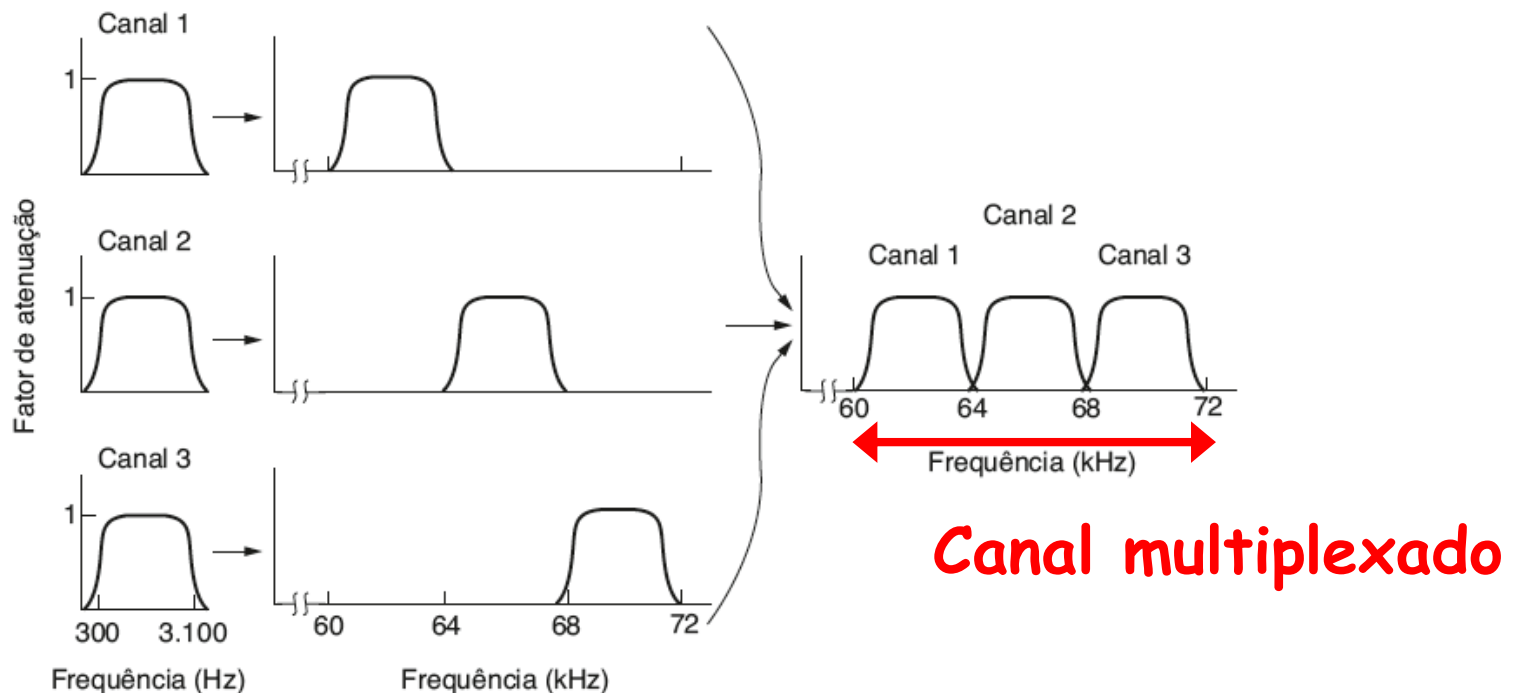
- Divide os espectro de frequências em bandas
 - Cada banda é dada a um usuário
 - Rádio AM usa multiplexação FDM



Aumento da largura de banda

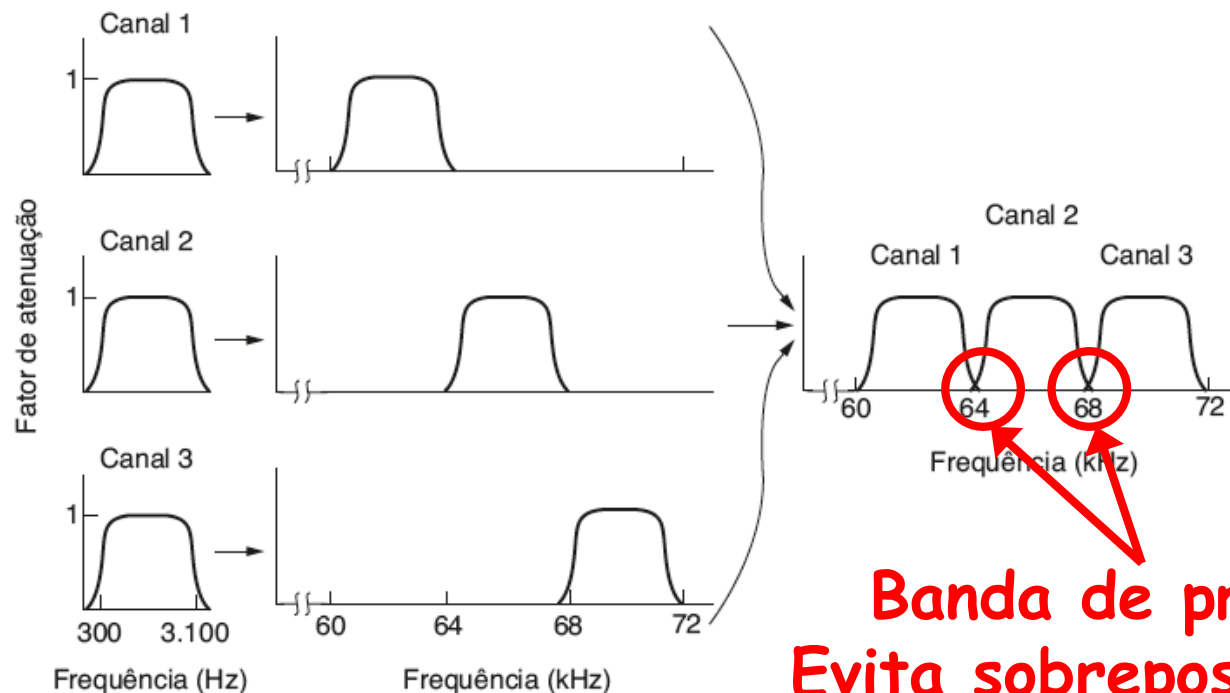
Multiplexação por Divisão de Frequência - FDM

- Divide os espectro de frequências em bandas
 - Cada banda é dada a um usuário
 - Rádio AM usa multiplexação FDM



Multiplexação por Divisão de Frequência - FDM

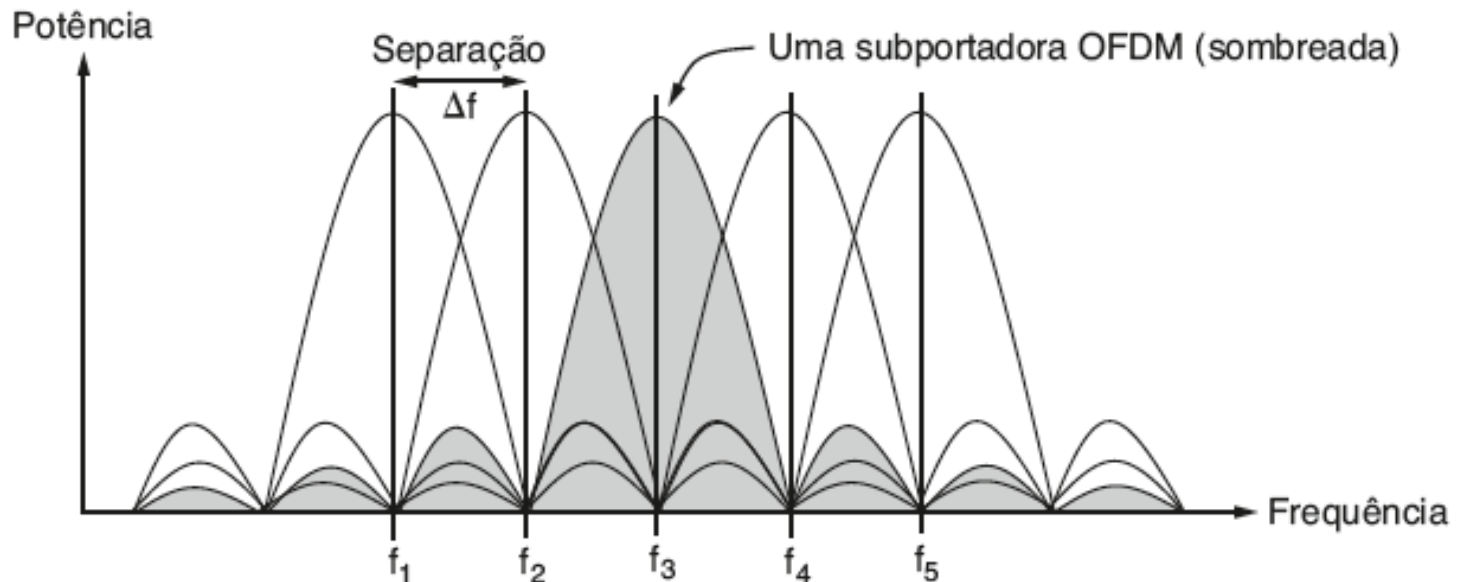
- Divide os espectro de frequências em bandas
 - Cada banda é dada a um usuário
 - Rádio AM usa multiplexação FDM



**Banda de proteção.
Evita sobreposição entre
canais adjacentes**

Multiplexação por Divisão de Frequência - FDM

- Multiplexação ortogonal com divisão de frequência (OFDM)
 - Não há banda de proteção
 - Em compensação, a interferência de um canal adjacente sobre a frequência central da portadora deve ser zero



Multiplexação por Divisão de Frequência - FDM

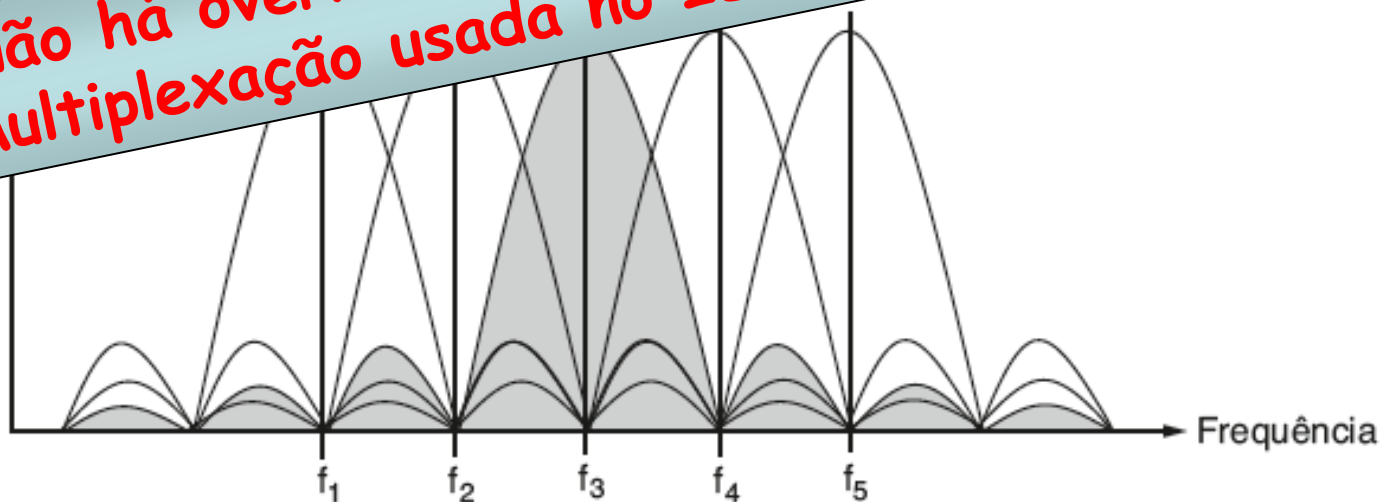
- Multiplexação ortogonal com divisão de frequência (OFDM)
 - Não há banda de proteção

- Em compensação, a interferência de ... sobre a frequência central ...

Potência

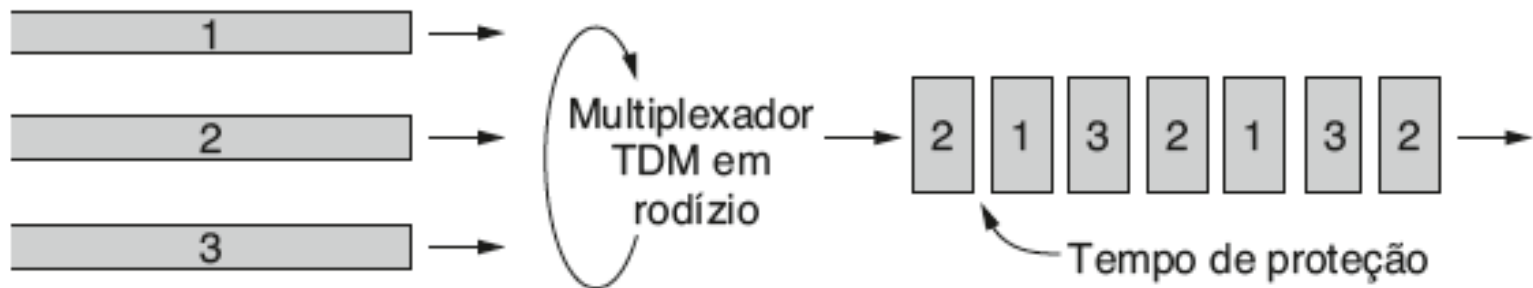
**Não há overhead com bandas de proteção.
Multiplexação usada no IEEE 802.11 (WiFi)**

OFDM (sombreada)



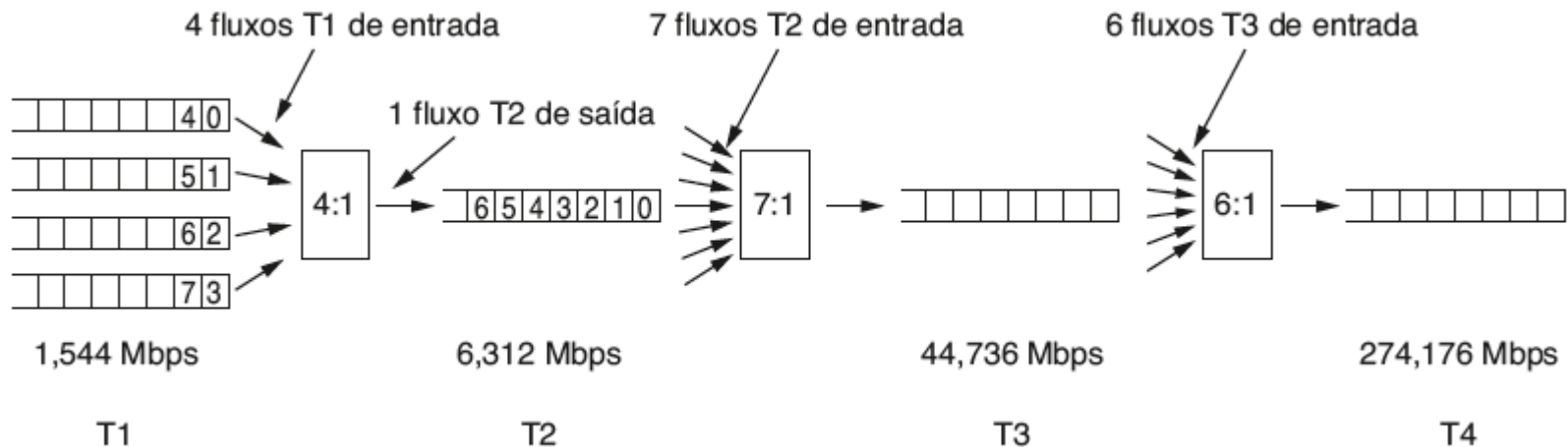
Multiplexação por Divisão de Tempo - TDM

- Divide o espectro em slots de tempo
 - Usuários se alternam periodicamente usando a largura de banda inteira por um pequeno período de tempo
 - Os bits de cada fluxo de entrada são apanhados em um slot de tempo fixo e enviados para o fluxo agregado
 - O fluxo agregado deve ter uma velocidade igual a soma de todos os fluxos de entrada



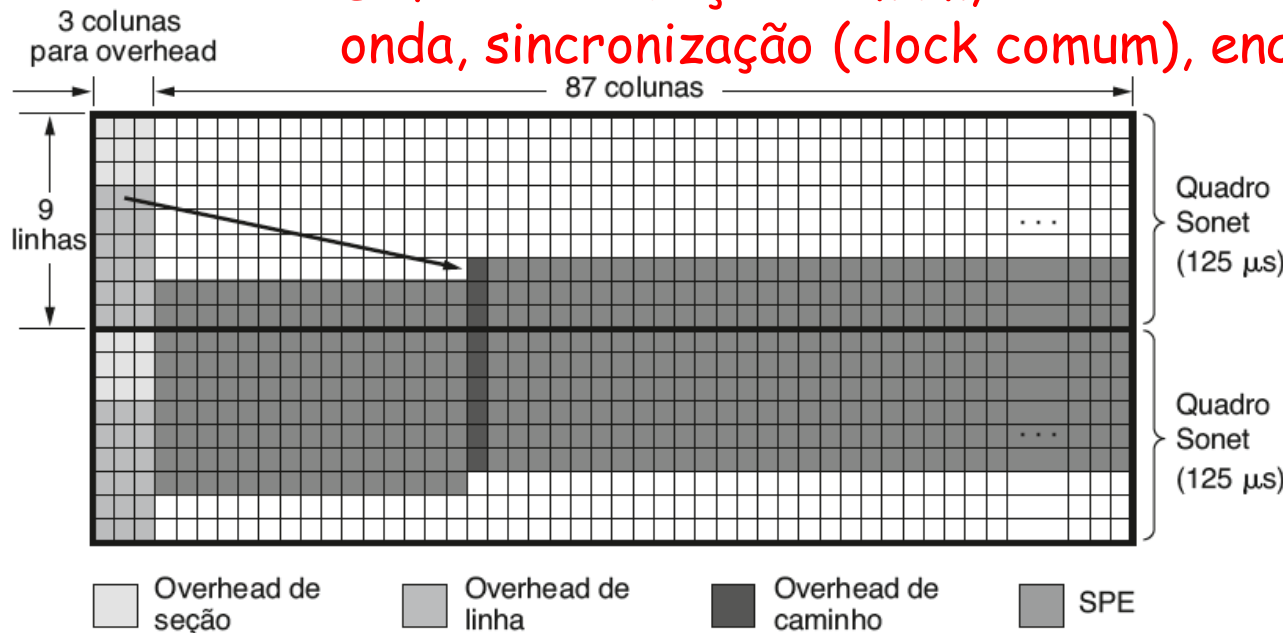
Multiplexação por Divisão de Tempo - TDM

- Ex. Multiplexação de streams T1 em portadoras mais altas



Multiplexação por Divisão de Tempo - TDM

- SONET/SDH (*Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy*)
 - Padrões para conectar diferentes padrões TDM usados por concessionários de comunicação em longa distância
 - Define sinalização comum, relacionado a comprimento de onda, sincronização (clock comum), enquadramento etc.



**Ex.: 2 quadros
back-to-back
SONET**

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

- Forma de comunicação que usa dispersão espectral
 - Sinal de banda estreita espalhado por banda mais larga
 - Mais tolerante a interferências
 - Vários usuários usam a mesma banda ao mesmo tempo
 - Cada bit é subdividido em m intervalos curtos
 - Chamados de chips
 - Cada usuário tem uma **sequência de chips exclusiva**
 - Sequência de chips: Bit 1
 - Negação da sequência de chips: Bit 0
 - Só é possível se a banda disponível for m vezes maior que a largura de banda necessária para a comunicação

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

- Sequência de chips de pares distintos são ortogonais
 - Produto interno normalizado é nulo
 - Assumindo sequências $\mathbf{S} = \langle S_1, \dots, S_m \rangle$ e $\mathbf{T} = \langle T_1, \dots, T_m \rangle$

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0$$

- Produto interno de S com S é 1, já de S com S' é -1

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i S_i = 1$$

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

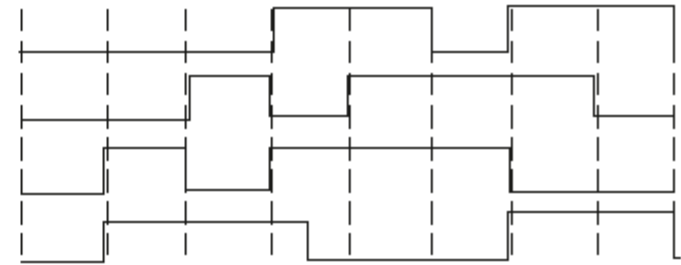
$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

$$B = (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$$

$$C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$D = (-1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1)$$

Sequência de chips que representa o bit 1 para quatro casos



Sinais representativos das sequências

Como ficariam as somas das sequências de chips caso estações diferentes fizessem transmissões simultâneas de um bit?

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

$$B = (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$$

$$C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$D = (-1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1)$$

$$S_1 = C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

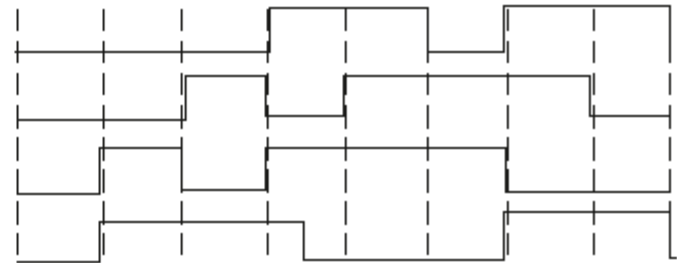
$$S_2 = B+C = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 \ +2 \ +2 \ 0 \ -2)$$

$$S_3 = A+\bar{B} = (0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$

$$S_4 = A+\bar{B}+C = (-1 \ +1 \ -3 \ +3 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1)$$

$$S_5 = A+B+\bar{C}+D = (-4 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2 \ 0 \ +2 \ -2)$$

$$S_6 = A+B+\bar{C}+D = (-2 \ -2 \ 0 \ -2 \ 0 \ -2 \ +4 \ 0)$$



Para recuperar o fluxo de bits de uma estação em particular, o receptor precisa conhecer a sequência de chips do transmissor

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

$$B = (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$$

$$C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$D = (-1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1)$$

Recuperação a partir do produto interno normalizado da sequência recebida e da sequência de chips do transmissor

$$S_1 = C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$S_2 = B+C = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 \ +2 \ +2 \ 0 \ -2)$$

$$S_3 = A+\bar{B} = (0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$

$$S_4 = A+\bar{B}+C = (-1 \ +1 \ -3 \ +3 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1)$$

$$S_5 = A+B+\bar{C}+D = (-4 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2 \ 0 \ +2 \ -2)$$

$$S_6 = A+B+\bar{C}+D = (-2 \ -2 \ 0 \ -2 \ 0 \ -2 \ +4 \ 0)$$

$$S_1 \bullet C = [1+1+1+1+1+1+1+1]/8 = 1$$

$$S_2 \bullet C = [2+0+0+0+2+2+0+2]/8 = 1$$

$$S_3 \bullet C = [0+0+2+2+0-2+0-2]/8 = 0$$

$$S_4 \bullet C = [1+1+3+3+1-1+1-1]/8 = 1$$

$$S_5 \bullet C = [4+0+2+0+2+0-2+2]/8 = 1$$

$$S_6 \bullet C = [2-2+0-2+0-2-4+0]/8 = -1$$

$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i$$

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

$$A = (-1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1)$$

$$B = (-1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1)$$

$$C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$D = (-1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1)$$

No caso $S_4 \dots$
 $(A+B'+C) \cdot C =$
 $A \cdot C + B' \cdot C + C \cdot C =$
 $0 + 0 + 1 = 1$

$$S_1 = C = (-1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1)$$

$$S_2 = B+C = (-2 \ 0 \ 0 \ 0 \ +2 \ +2 \ 0 \ -2)$$

$$S_3 = A+\overline{B} = (0 \ 0 \ -2 \ +2 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2)$$

$$S_4 = A+\overline{B}+C = (-1 \ +1 \ -3 \ +3 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1)$$

$$S_5 = A+B+C+D = (-4 \ 0 \ -2 \ 0 \ +2 \ 0 \ +2 \ -2)$$

$$S_6 = A+B+\overline{C}+D = (-2 \ -2 \ 0 \ -2 \ 0 \ -2 \ +4 \ 0)$$

$$S_1 \bullet C = [1+1+1+1+1+1+1+1]/8 = 1$$

$$S_2 \bullet C = [2+0+0+0+2+2+0+2]/8 = 1$$

$$S_3 \bullet C = [0+0+2+2+0-2+0-2]/8 = 0$$

$$S_4 \bullet C = [1+1+3+3+1-1+1-1]/8 = 1$$

$$S_5 \bullet C = [4+0+2+0+2+0-2+2]/8 = 1$$

$$S_6 \bullet C = [2-2+0-2+0-2-4+0]/8 = -1$$

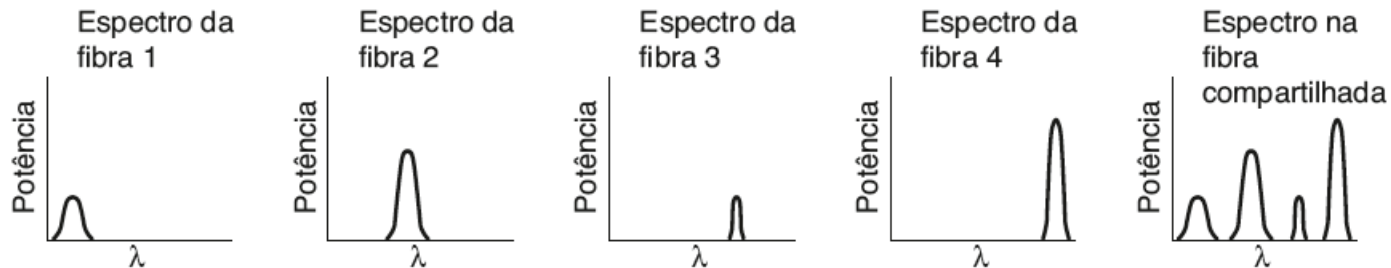
$$\mathbf{S} \bullet \mathbf{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i$$

Multiplexação por Divisão de Código - CDM

- Número de canais simultâneos é função do número máximo de sequências de chips ortogonais possíveis
 - Depende do método gerador
 - Códigos de Walsh
- Limitações:
 - Chips precisam estar sincronizados no tempo no receptor
 - Ruído pode alterar as sequências de chips

Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

- Transmissão
 - Cada fibra possui energia em um comprimento de onda
- Recepção
 - Filtro sintonizado em um comprimento de onda



Material Utilizado

- Capítulo 2 do Livro "*Computer Networks*", Andrew S. Tanenbaum e David J, Wetherall, 5a. Edição, Editora Pearson, 2011

Leitura Recomendada

- Capítulo 2 do Livro "*Computer Networks*", Andrew S. Tanenbaum e David J, Wetherall, 5a. Edição, Editora Pearson, 2011