
Transmissão de Dados

*FEUP/DEEC
Redes de Computadores
MIEIC – 2009/10
José Ruela*

Terminologia e conceitos

- Meios de transmissão

A transmissão de sinais, sob a forma de ondas electromagnéticas, é suportada em meios de transmissão guiados ou não guiados

- » Meios guiados: par de cobre entrançado, cabo coaxial, fibra óptica
- » Meios não guiados: espaço livre

- Conectividade

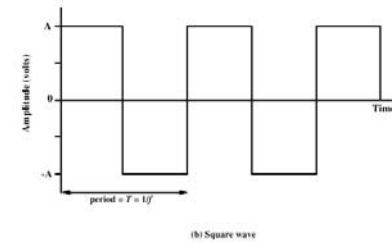
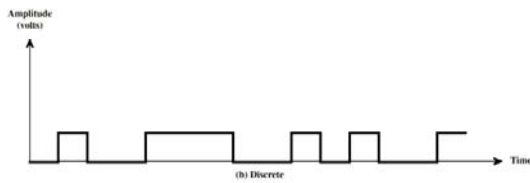
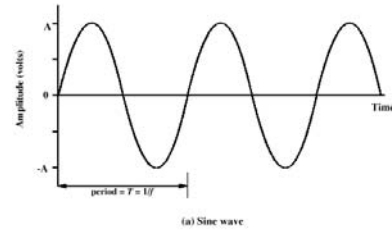
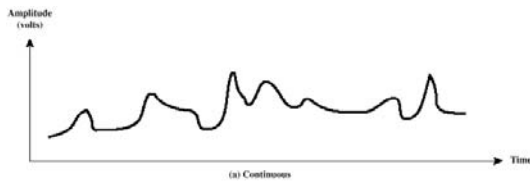
- » Ponto-a-ponto – ligação entre dois dispositivos
- » Multiponto – meio partilhado por mais de dois dispositivos
 - Um emissor e múltiplos receptores, múltiplos emissores e um receptor ou múltiplos emissores e receptores

- Modo de comunicação (direccionalidade)

- » *Simplex* – comunicação unidireccional (televisão)
- » *Half-duplex* – comunicação bidireccional alternada (rádio polícia)
- » *Full-Duplex* – comunicação bidireccional simultânea (telefone)

Classificação de sinais

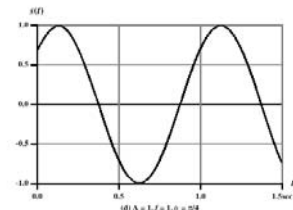
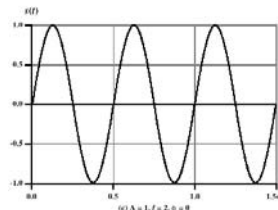
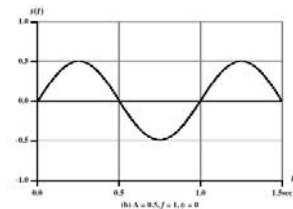
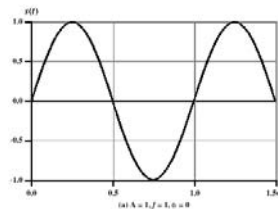
- » Analógicos: variação contínua em amplitude e no tempo
- » Digitais: sequência temporal discreta de valores quantificados (níveis discretos)
 - A designação sinal digital é normalmente usada para referir a sequência de impulsos que representa uma sequência discreta de valores quantificados
- » Periódicos e não periódicos



Sinal sinusoidal no tempo

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \theta)$$

A → amplitude
 f → Frequency = 1 / period (T)
 θ → phase



Comprimento de onda – λ

» Distância correspondente a um ciclo de um sinal que se propaga num meio

» Sendo T o período, $f = 1 / T$ a frequência e v a velocidade de propagação

$$\lambda = vT \quad \lambda f = v$$

» Velocidade de propagação da luz no espaço livre: $c = 3 * 10^8 \text{ ms}^{-1}$

» Atrasos de propagação típicos ($\mu\text{s}/\text{km}$)

- Espaço livre ($1/c$): $3.3 \mu\text{s}/\text{km}$
- Par de cobre: $5 \mu\text{s}/\text{km}$
- Cabo coaxial: $4 \mu\text{s}/\text{km}$
- Fibra óptica: $5 \mu\text{s}/\text{km}$

Sinal nas frequências

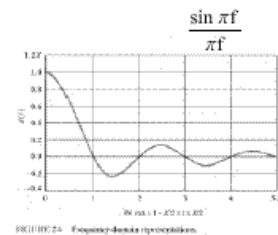
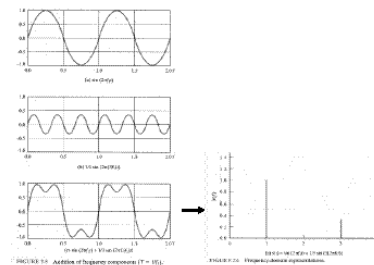
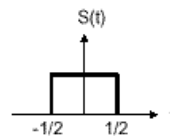
» Sinal periódico \rightarrow expansível em Série de Fourier

– Frequência fundamental + harmónicos

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi n f_0 t + \theta_n), \quad f_0 = \frac{1}{T}$$

» Sinal não periódico \rightarrow transformada de Fourier

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt$$



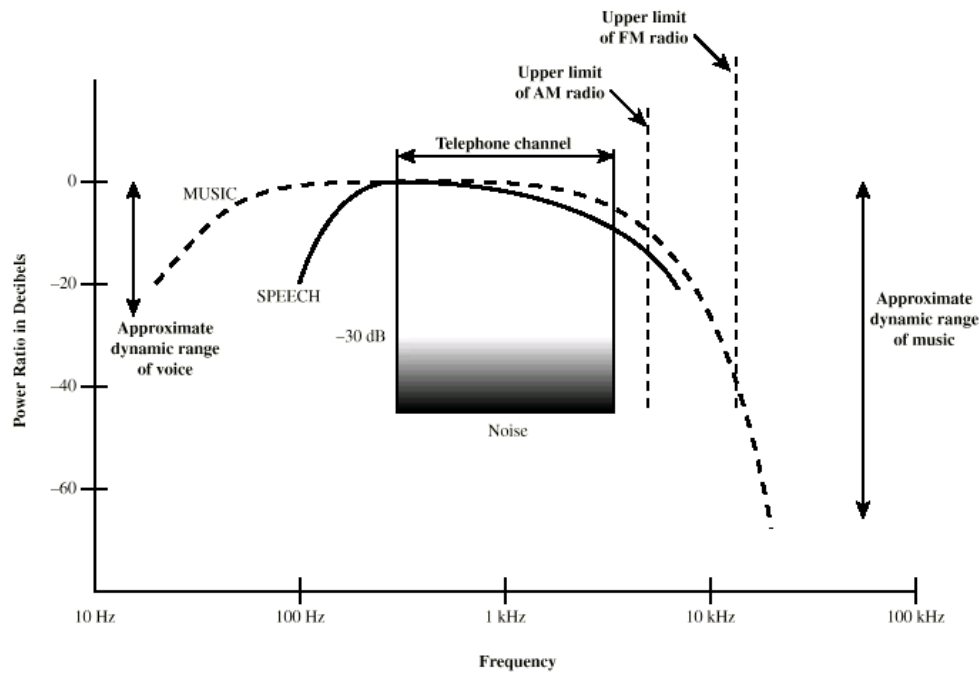
» Espectro de um sinal – gama de frequências dominantes do sinal

» Largura de banda (W) – largura do espectro ($W = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$)

» Largura de banda efectiva

– Contém a maior parte da energia do sinal (largura de banda de meia potência ou 3 dB)

Espectros acústicos



Transmissão digital

» Características

- Transmissão de sinais que transportam informação digital
- O sinal é atenuado e a sua integridade é afectada por ruído, distorção, etc.
- Uso de repetidores
 - Recebem o sinal, regeneram a informação digital e retransmitem o sinal
 - Reduzem os efeitos adversos da atenuação e da distorção; o ruído não é amplificado

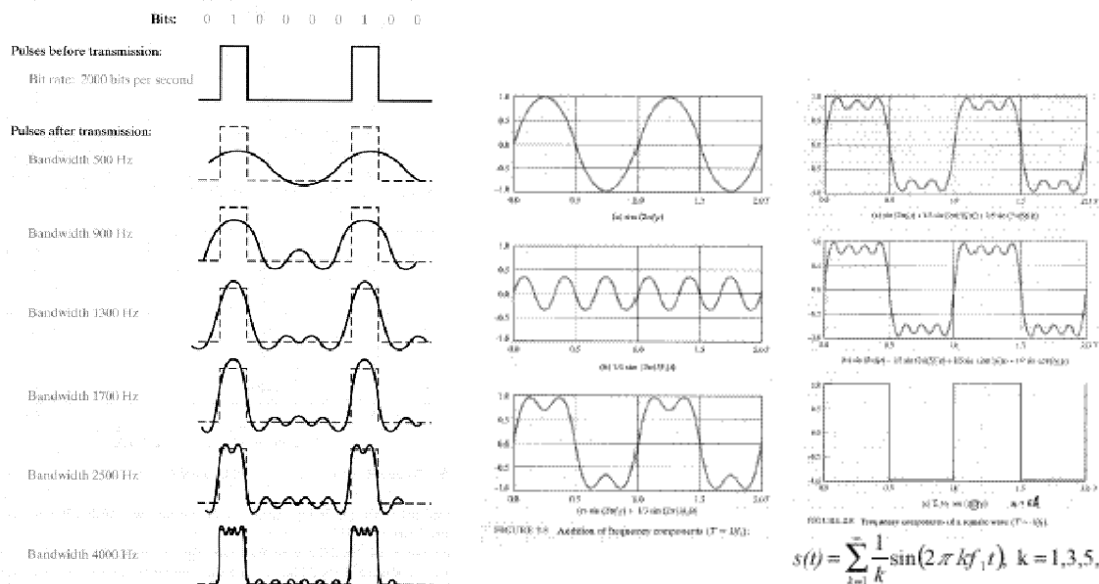
» Vantagens (sobre transmissão analógica)

- Benefícios da tecnologia digital (integração em larga escala, baixo custo, consumo reduzido)
- Maior imunidade ao ruído e à distorção
 - O uso de repetidores permite garantir integridade dos dados em transmissão a grandes distâncias
- Exploração de técnicas de multiplexagem no tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*)
 - Permite a integração das operações de multiplexagem e comutação digital no mesmo equipamento
 - Permite utilização eficiente de largura de banda
- Utilização de técnicas de Processamento Digital de Sinais
 - Compressão, filtragem, igualização, cancelamento de eco, etc.
 - A representação digital de qualquer tipo de informação, independente do conteúdo, favorece a convergência de serviços
- Possibilidade de Integração de Serviços na mesma rede
- Segurança e privacidade (criptografia)

Débito de transmissão e largura de banda

- » Dados binários podem ser representados por um sinal digital (sequência de impulsos) para transmissão através de um meio (canal)
- » Um sinal digital exigiria uma largura de banda infinita, se o objectivo fosse preservar a forma dos impulsos (tal não é necessário, visto que o objectivo é apenas preservar a informação contida no sinal, isto é, a sequência de valores binários que representa)
- » Um canal físico tem largura de banda finita e limitada (por razões económicas); filtra algumas frequências do sinal digital, distorcendo-o, o que dificulta a interpretação do sinal no receptor
- » Uma reduzida largura de banda do canal provoca elevada distorção do sinal digital e portanto uma elevada probabilidade de interpretação errada de bits; é necessário reduzir a largura de banda efectiva do sinal, preservando a informação nele contida
- » Relação entre débito binário e largura de banda
 - Quanto maior for o débito binário, maior é a largura de banda efectiva do sinal
 - Quanto maior for a largura de banda do canal, maior é o débito binário possível no canal

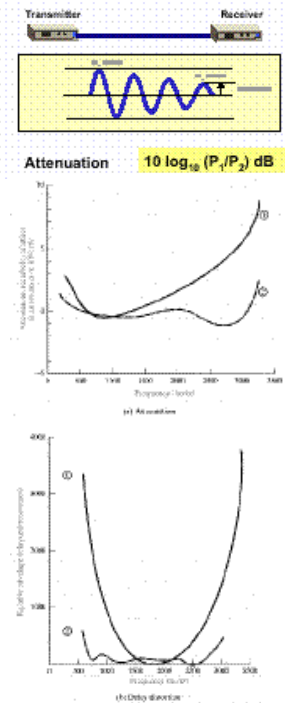
Débito de transmissão e largura de banda



Distorção

» Distorção de amplitude

- A potência do sinal diminui com a distância (atenuação)
 - Em meios guiados, a atenuação varia exponencialmente com a distância (medida em escala logarítmica; unidade: dB / km)
 - A transmissão analógica requer amplificadores
 - A atenuação depende das características do meio
- A atenuação aumenta com a frequência (distorção de amplitude)
- Potência do sinal recebido (detecção)
 - Deve ser suficiente para ser detectado (sensibilidade do receptor)
 - Deve ser superior ao ruído para ser detectado sem erros
- O sinal digital é regenerado com recurso a repetidores



» Distorção de fase (atraso de fase)

- Causa: variação da velocidade de propagação com a frequência
 - Se o desvio de fase introduzido pelo canal variar linearmente com a frequência, o sinal não é distorcido mas simplesmente atrasado
- Característica de meios guiados (cabos, fibras)

Ruído

- » Térmico (branco)

$$N_0 = kT \quad (W / Hz)$$

$$N = kT * B \quad (W, dBW)$$

» Intermodulação

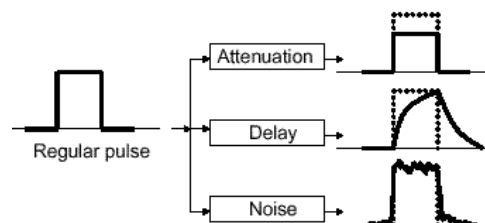
- A mistura de sinais de frequências f_1, f_2 pode gerar componentes $nf_1 \pm mf_2$
- Alguns desses componentes podem interferir com sinais nessas frequências
- Causa: não linearidade do sistema de transmissão (e.g., amplificação)

» Diafonia (*crosstalk*)

- Acoplamento indesejado entre canais

» Impulsivo

- Impulsos irregulares (*bursts*), com grande amplitude e pequena duração
- Causas: interferência electromagnética, descargas atmosféricas, órgãos de comutação, etc.



Meios de transmissão

- » Asseguram a ligação física entre emissor(es) e receptor(es)
- » Meios guiados
 - Suporte físico: par de cobre entrançado, cabo coaxial, fibra óptica
 - As características do meio têm um impacto significativo na qualidade de transmissão
- » Não guiados
 - Suporte físico: espaço livre (atmosfera, espaço exterior)
 - Transmissão sobre portadora de rádio frequências
 - Afectados por problemas de propagação
 - Espectro electromagnético limitado
 - Necessário planear frequências para reduzir interferências

Par de cobre entrançado (*twisted pair*)

» Aplicações

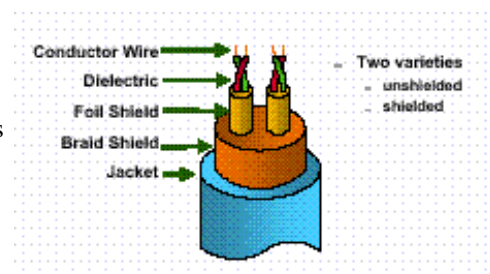
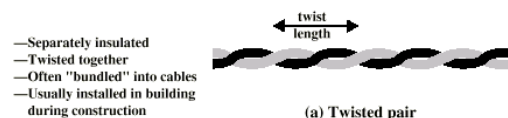
- Pequenas distâncias (< 10 km)
- Lacete de assinante (*local loop*)
 - Canal voz / dados (modem), RDIS, DSL
- Rede telefónica em edifícios
- LANs

» Características

- Usado para sinais analógicos ou digitais
- Atenuação elevada, sobretudo a altas frequências
- Susceptível a interferências e ruído
- Débito máximo decresce com a distância
- Possíveis débitos elevados em distâncias curtas

» Categorias

- *Shielded Twisted Pair* (STP)
 - Uma malha de protecção externa reduz a interferência electromagnética
 - Mais caro e mais difícil de instalar (mais grosso, mais pesado)
- *Unshielded Twisted Pair* (UTP)
 - Aplicações desde par telefónico normal até par de dados
 - Barato e fácil de instalar



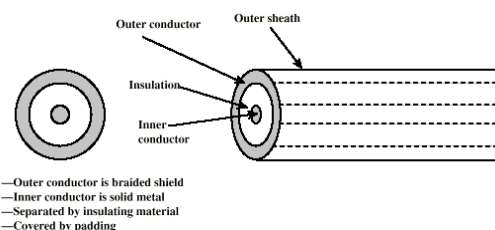
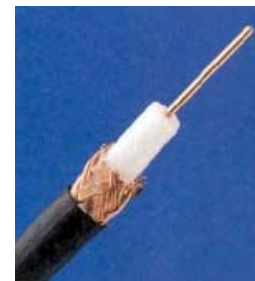
Categorias UTP

- » Categoria 3 (UTP3)
 - Até 16 MHz de largura de banda
 - Comprimento do entrançamento → 7.5 a 10 cm
 - LANs Ethernet a 10 Mbit/s (10BASE-T) / sistemas telefónicos
 - Ainda muito comum mas desactualizado
- » Categoria 5 (UTP5)
 - Até 100 MHz de largura de banda
 - Comprimento do entrançamento → 0.6 a 0.85 cm
 - LANs Ethernet a 100 Mbit/s (100BASE-T)
 - Instalado nos edifícios mais recentes (inclusive para sistemas telefónicos)
- » Categoria 5e (UTP5e)
 - Características superiores a UTP5 – tende a substituir este tipo
 - Recomendado para LANs Ethernet a 1Gbit/s (1000BASE-T)
- » Categoria 6 (UTP6)
 - Até 250 MHz de largura de banda



Cabo coaxial

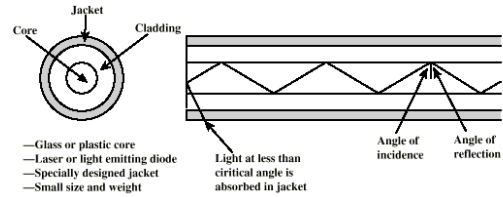
- » Aplicações
 - LANs das primeiras gerações
 - Sistemas de transmissão de longa distância (ultrapassados)
 - Sistemas de TV
- » Características
 - Boa imunidade a interferências
 - Largura de banda elevada (centenas de MHz / Mbit/s)
- » Tipos
 - RG-6: *drop cable for CATV*, 75 Ω
 - RG-8: *thick Ethernet LAN (10Base5)*, 50 Ω
 - RG-11: *main CATV trunk*, 75 Ω
 - RG-58: *thin Ethernet LAN (10Base2)*, 50 Ω
 - RG-59: *ARCnet*, 75 Ω



Fibra óptica

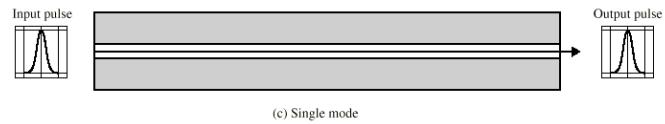
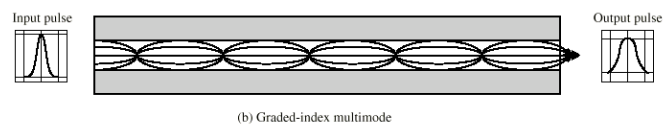
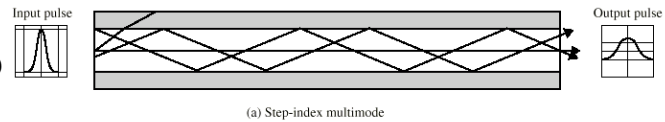
» Vantagens

- Débitos de transmissão até centenas de Gbit/s
- Leves, flexíveis e pouco volumosas
- Baixa atenuação
- Imunidade a interferência electromagnética



» Desvantagens

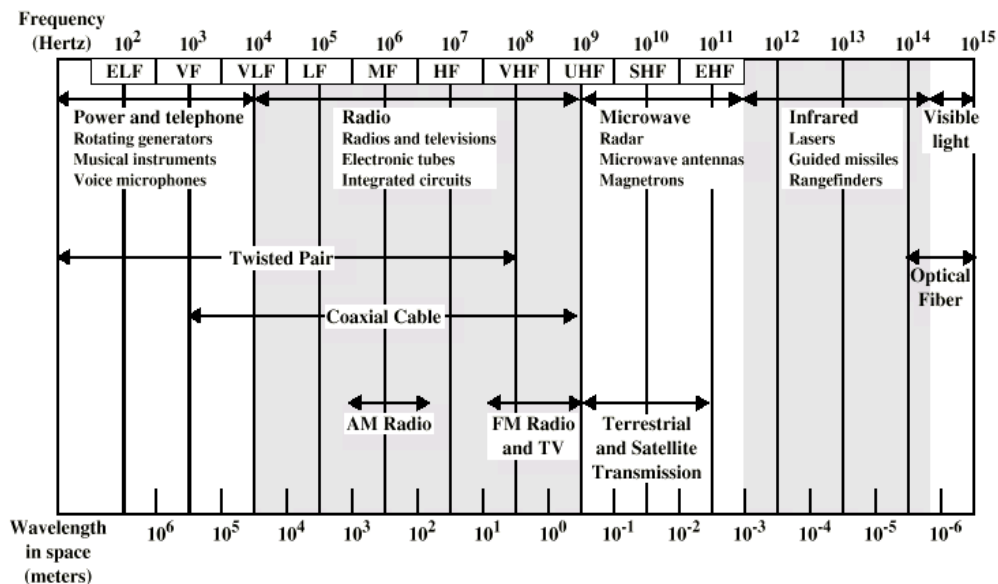
- Interfaces óptico-eléctricas (custo)
- Terminação difícil (perdas)
- Multiponto difícil (perdas)



» Aplicações

- Transmissão a grande distância
- Lacete de assinante
- LANs

Espectro electromagnético



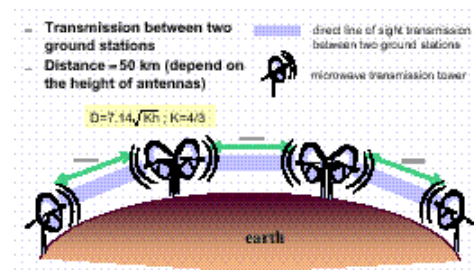
ELF = Extremely low frequency MF = Medium frequency UHF = Ultrahigh frequency
 VF = Voice frequency HF = High frequency SHF = Superhigh frequency
 VLF = Very low frequency VHF = Very high frequency EHF = Extremely high frequency
 LF = Low frequency

Rádio frequências – microondas terrestres

- » Utilizadas quando o uso de meios guiados é impraticável
- » Bandas: 2 – 40 GHz
- » Transmissão direccional, em linha de vista
- » Antenas parabólicas
 - Diâmetro depende do comprimento de onda
- » Curvatura da terra e efeitos de propagação exigem repetidores intermédios em ligações mais longas
- » Débitos de transmissão elevados (centenas de Mbit/s)
- » Atenuação em espaço livre

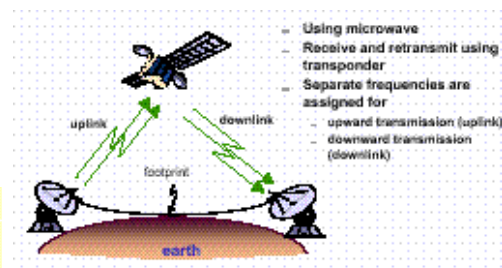
$$10 \log_{10} (4 \pi d / \lambda)^2 \text{ dB}$$

- » Repetidores (distâncias: 10 – 100 km)
- » Aplicações
 - Rede de transporte de longa distância
 - Rede de acesso (*Fixed Wireless Access*)



Rádio frequências – microondas por satélite

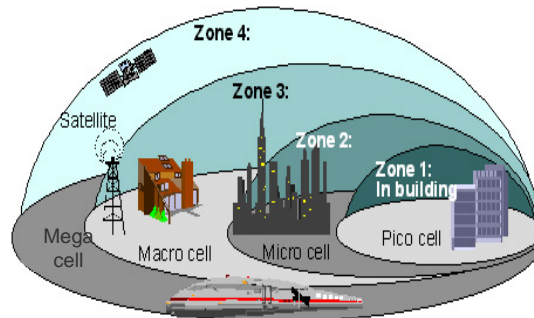
- » Permitem coberturas de grandes áreas da Terra
- » Satélites geoestacionários (órbita a 36 000 km da superfície da Terra)
- » Satélite recebe numa frequência e retransmite noutra
- » Largura de banda – centenas de MHz
- » Atrasos de propagação elevados (cerca de 270 ms entre duas estações terrestres)
- » Aplicações
 - Rede de transporte de longa distância
 - Distribuição de TV
 - Redes privadas



Freq.	Band	uplink	downlink	use
4/6	C	5.925-6.425	3.7-4.2	commercial
7/8	X	7.9-8.4	7.9-8.4	military
11/14	Ku	14.0-14.5	11.7-12.2	commercial
20/30	Ka	27.5-30.5	17.7-21.2	military
20/44	Q	43.5-45.5	20.2-21.32	military

Rádio frequências – comunicações móveis

- » Mobilidade exige ligações sem fios
- » Bandas: VHF/UHF (30 MHz – 3 GHz), em alguns casos superiores
- » Estrutura baseada em células
- » Aplicações
 - Comunicações móveis terrestres
 - LANs sem fios
 - Telefones portáteis
- » Exemplos de sistemas
 - GSM / 900 – 1800 MHz
 - DECT / 1 900 MHz
 - IEEE 802.11b / 2.5 GHz / 11 Mbit/s
 - IEEE 802.11g / 2.5 GHz / 54 Mbit/s
 - IEEE 802.11a / 5GHz / 54 Mbit/s
 - IEEE 802.16 (WiMax) / > 2 GHz (diversas bandas) / até 100 Mbit/s
 - UMTS / 2 GHz / até 3.6 Mbit/s descendente (actualmente)



Infravermelhos

- » Distâncias curtas
- » Transmissão em linha de vista, directa ou por reflexão em superfícies
 - Radiações infravermelhas não atravessam paredes
 - Boa segurança
 - Ausência dos problemas de interferência presentes em sistemas de microondas
- » Espectro não licenciado
- » Aplicações
 - Controlo remoto de equipamento
 - LANs

Anexo

Teoria da Informação

» Medida de Informação

- Uma fonte digital produz um conjunto de mensagens m_i ($i = 1, 2, \dots, N$) com probabilidades de ocorrência p_i
- A fonte pode ser modelizada por uma variável aleatória $M = (m_1, m_2, \dots, m_N)$, com probabilidades associadas $p(m_i) = p_i$
- Define-se quantidade de Informação $I(m_i)$ da mensagem m_i

$$\begin{array}{ll}
 I(m_i) = -\log_2 p(m_i) & p(m_i) = 1 \Rightarrow I(m_i) = 0 \\
 I \text{ exprime-se em } \textit{bit} & p(m_i) = 0 \Rightarrow I(m_i) = \infty \\
 (\text{unidade de Informação}) & p(m_i + m_j) = p(m_i) * p(m_j) \Rightarrow I(m_i + m_j) = I(m_i) + I(m_j)
 \end{array}$$

- A Informação média produzida pela fonte, designada Entropia, é

$$H(M) = -\sum p(m_i) * \log_2 p(m_i)$$

- O valor máximo da Entropia é $\log_2 N$, que se verifica quando as ocorrências são equiprováveis e independentes

Teoria da Informação

» Codificação binária

- Usando um alfabeto binário (0, 1), o número médio $L(M)$ de símbolos binários necessários para codificar as mensagens é igual ou superior à Entropia da fonte
- Portanto, a eficiência do código $\eta = H(M) / L(M)$ é igual ou inferior a 100%
- No limite um símbolo binário (*bit – binary digit*) pode representar um *bit* de informação

» Débito binário (*data rate*)

- Para além de o processo de codificação de fonte poder não ser 100% eficiente, aos símbolos binários que representam a informação são adicionados antes da transmissão outros símbolos para protecção (códigos detectores ou correctores de erros) ou para execução de funções protocolares (controlo, endereçamento, etc.)
- O número de símbolos binários a transmitir é, deste modo, superior ao número de símbolos binários que seriam necessários para representar a informação
- Em termos práticos (consumo de recursos de transmissão) o que tem significado é o número total de símbolos binários transmitidos por unidade de tempo – débito binário de dados (*data rate*), que é assim superior ao débito de informação (*information rate*), que representa a quantidade média de informação transmitida por unidade de tempo

Capacidade de canal (Nyquist)

» Limite teórico de Nyquist (na ausência de ruído)

- A Capacidade de um canal C (*bit/s*) representa o limite superior do débito binário (de dados) a que o emissor pode transmitir
- O débito binário DR (*Data Rate / Bit Rate*) expressa o número de símbolos binários que o emissor transmite por segundo (unidade: *bit/s*)
- Para transmissão no canal, uma sequência binária pode ser representada por uma sequência de símbolos de um alfabeto de L símbolos ($L = 2, 4, 8, \dots$); os L símbolos são transmitidos sob a forma de sinais digitais elementares (impulsos) com diferentes amplitudes
- Designa-se por ritmo de modulação MR (*Modulation Rate / Baud Rate*) a frequência de transmissão de sinais elementares, ou seja, o inverso da sua duração (unidade: *baud*)

$$DR = MR \log_2 L$$

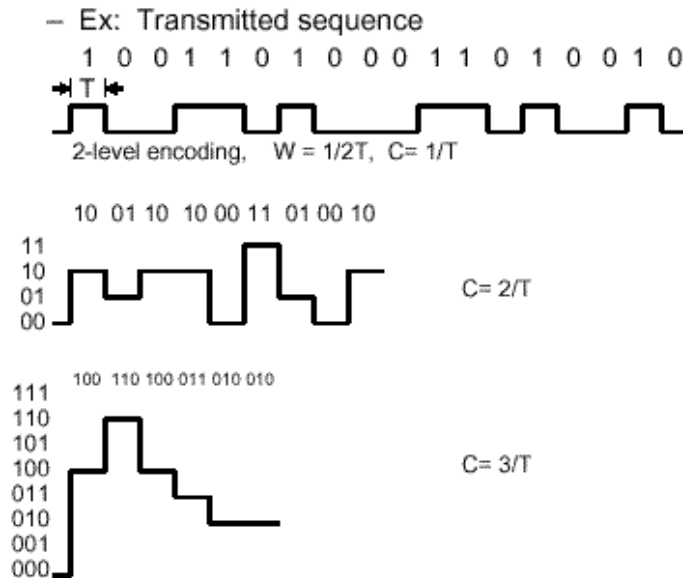
- O sinal digital é distorcido pelo canal, dando origem a Interferência Intersimbólica (ISI)
- De acordo com o 1º Critério de Nyquist, é possível recuperar a informação contida no sinal, reduzindo a ISI nos instantes em que o sinal é amostrado, desde que a Largura de Banda do canal, designada por B (unidade: *Hz*) seja pelo menos igual a

$$B_0 = MR / 2 \text{ (valor mínimo que corresponde a um filtro passa-baixo ideal)}$$

- Filtros de Nyquist obedecem à condição $B = B_0(1 + \rho)$, sendo $0 \leq \rho \leq 1$ o factor de *roll-off*
- O débito binário DR possível é então limitado superiormente por

$$C = 2 B \log_2 L \text{ (que corresponde a } \rho = 0)$$

Relação entre bit rate e baud rate



Capacidade de canal (Shannon)

» Limite teórico de Shannon

- O resultado estabelecido por Shannon aplica-se a canais com ruído branco e Gaussiano
- SNR – Relação sinal ruído

$$SNR = \text{potência de sinal} / \text{potência de ruído}$$

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} SNR$$

- Capacidade do canal (Shannon)

$$C = B \log_2 (1 + SNR)$$

» Exemplo

- Canal de voz: $B = 3 \text{ kHz}$
- Relação sinal ruído no canal (valor típico): $SNR_{dB} = 30 \text{ dB} \rightarrow SNR = 1000$
- $C = 3 \log_2 (1 + 1000) \sim 30 \text{ kbit/s}$
 - Débitos maiores são possíveis com SNR mais elevado
- Por Nyquist: $C = 2 B \log_2 L$, $30 = 2 * 3 \log_2 L \rightarrow L = 32$ (5 bits por símbolo)