

Capítulo 5: Camada de Enlace e Redes Locais

Capítulo 5: A Camada de Enlace de Dados

Nossos objetivos:

- Entender os princípios por trás dos serviços da camada de enlace de dados:
 - detecção e correção de erros
 - compartilhamento de canal de difusão: acesso múltiplo
 - endereçamento da camada de enlace
 - transferência confiável de dados, controle de fluxo:
feito!
- instanciação e implementação de diversas tecnologias de camada de enlace

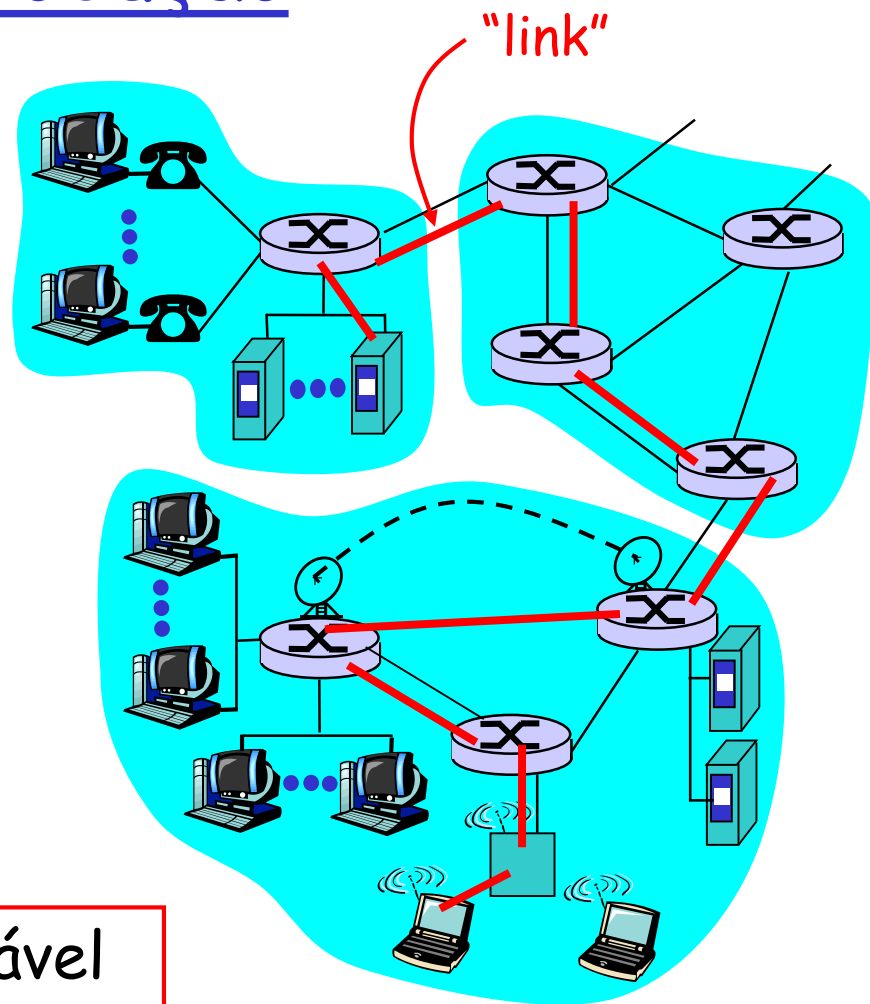
Camada de Enlace

- 5.1 **Introdução e serviços**
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de Acesso Múltiplo
- 5.4 Endereçamento da Camada de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.7 PPP
- 5.6 *Hubs e switches*
- 5.8 Virtualização do enlace: ATM e MPLS

Camada de Enlace: Introdução

Alguma terminologia:

- hosts e roteadores são **nós**
- canais de comunicação que conectam nós adjacentes ao longo de um caminho de comunicação são **enlaces/link**
 - enlaces cabeados
 - enlaces sem fio (não cabeados)
 - LANs
- Pacote da camada 2 é um **quadro/frame**, encapsula datagramas



a camada de enlace é responsável por transferir os datagramas entre nós adjacentes através do enlace

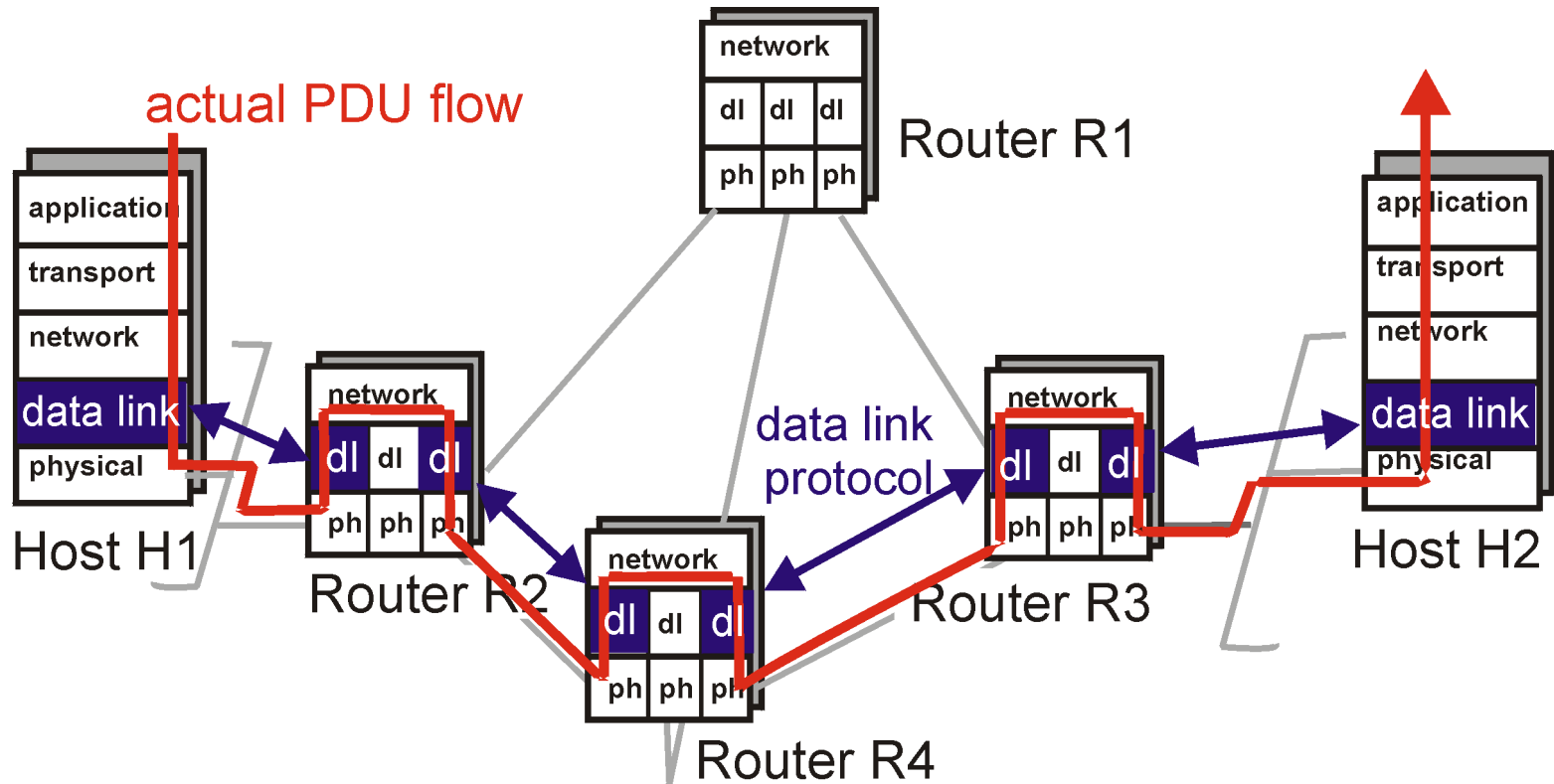
Camada de Enlace: Contexto

- Datagrama é transferido por diferentes protocolos de enlace em diferentes enlaces:
 - Ex.: Ethernet no primeiro enlace, frame relay em enlaces intermediários e 802.11 no último enlace
- Cada protocolo de enlace provê diferentes serviços
 - ex.: pode ou não prover transporte confiável de dados através do enlace

Analogia de transporte

- Viagem de Princeton a Lausanne
 - taxi: Princeton a JFK
 - avião: JFK a Genebra
 - Trem: Genebra a Lausanne
- turista = **datagrama**
- segmento de transporte = **canal de comunicação**
- modalidade de transporte = **protocolo da camada de enlace**
- agente de viagens = **algoritmo de roteamento**

Protocolos da Camada de Enlace



Serviços da Camada de Enlace

- **Enquadramento (Delimitação do quadro) e acesso ao enlace:**
 - encapsula datagrama num quadro adicionando cabeçalho e cauda,
 - implementa acesso ao canal se meio for compartilhado,
 - 'endereços físicos (MAC)' são usados nos cabeçalhos dos quadros para identificar origem e destino de quadros em enlaces multiponto
 - Diferente do endereço IP!
- **Entrega confiável entre nós adjacentes:**
 - Já aprendemos como fazer isto (Capítulo 3)
 - raramente usada em canais com baixas taxas de erro (fibra óptica, alguns tipos de pares trançados)
 - Canais sem fio: altas taxas de erros
 - P: para que confiabilidade na camada de enlace e fim-a-fim?

Serviços da Camada de Enlace (mais)

□ *Controle de Fluxo:*

- compatibilizar taxas de produção e consumo de quadros entre remetentes e receptores

□ *Detecção de Erros:*

- erros são causados por atenuação do sinal e por ruído
- receptor detecta presença de erros
 - receptor sinaliza ao remetente para retransmissão, ou simplesmente descarta o quadro em erro

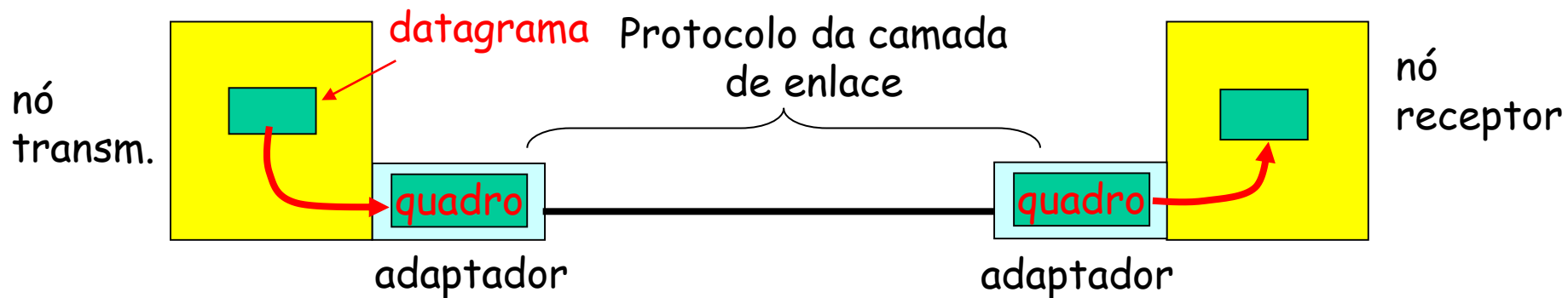
□ *Correção de Erros:*

- mecanismo que permite que o receptor localize *e corrija* o(s) erro(s) sem precisar da retransmissão

□ *Half-duplex e full-duplex*

- com half duplex, os nós de cada lado podem transmitir, mas não simultaneamente

Comunicação entre Adaptadores



- camada de enlace implementada no "adaptador" (NIC)
 - placa Ethernet, cartão PCMCIA, cartão 802.11
- lado transmissor:
 - Encapsula o datagrama em um quadro
 - Adiciona bits de verificação de erro, transferência confiável de dados, controle de fluxo, etc.
- Lado receptor
 - verifica erros, transporte confiável, controle de fluxo, etc.
 - extrai o datagrama, passa-o para o nó receptor
- adaptador é semi-autônomo
- camadas de enlace e física

Camada de Enlace

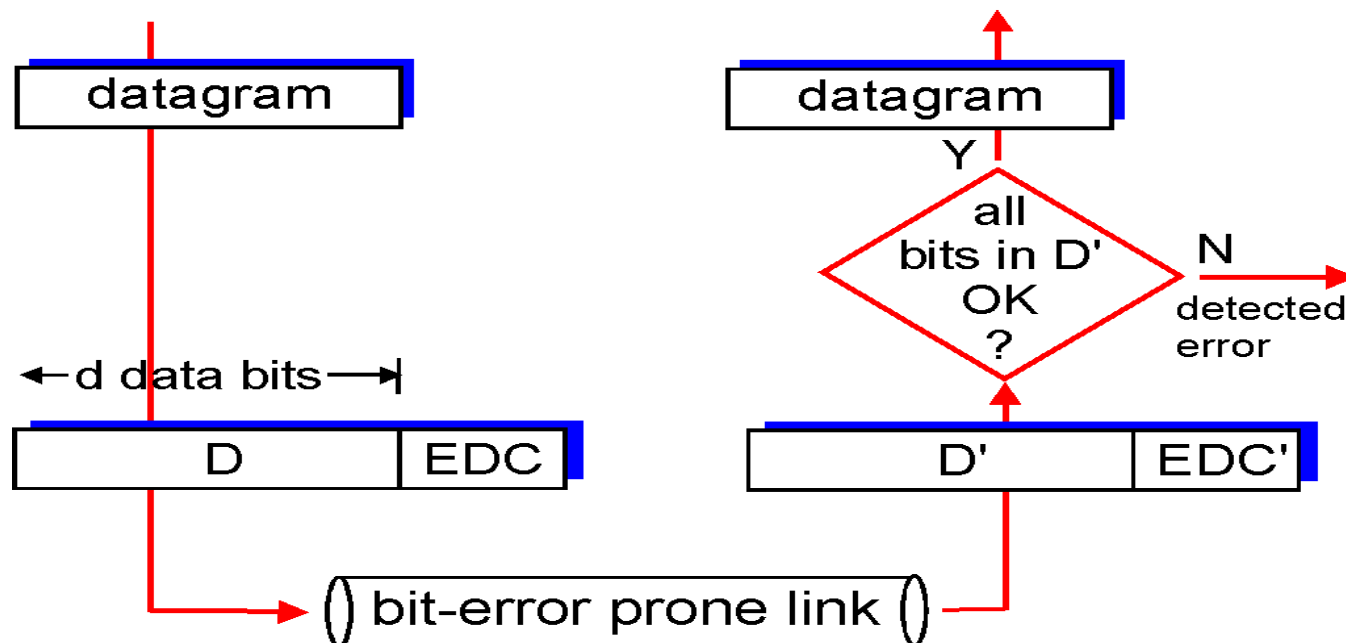
- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de Acesso Múltiplo
- 5.4 Endereçamento da Camada de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.7 PPP
- 5.6 *Hubs e switches*
- 5.8 Virtualização do enlace: ATM e MPLS

Detecção de Erros

EDC= bits de Detecção e Correção de Erros (redundância)

D = Dados protegidos por verificação de erros,
podem incluir alguns campos do cabeçalho

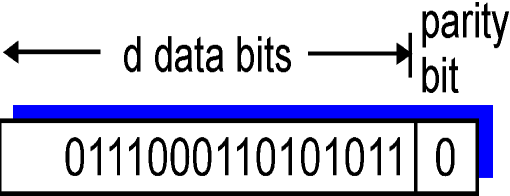
- detecção de erros não é 100% perfeita;
 - protocolo pode não identificar alguns erros, mas é raro
 - maior campo de EDC permite melhorar detecção e correção



Uso de Bits de Paridade

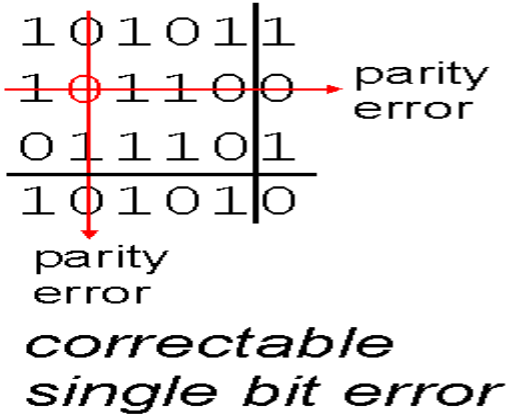
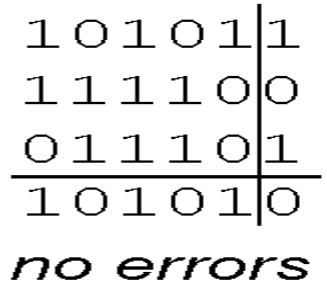
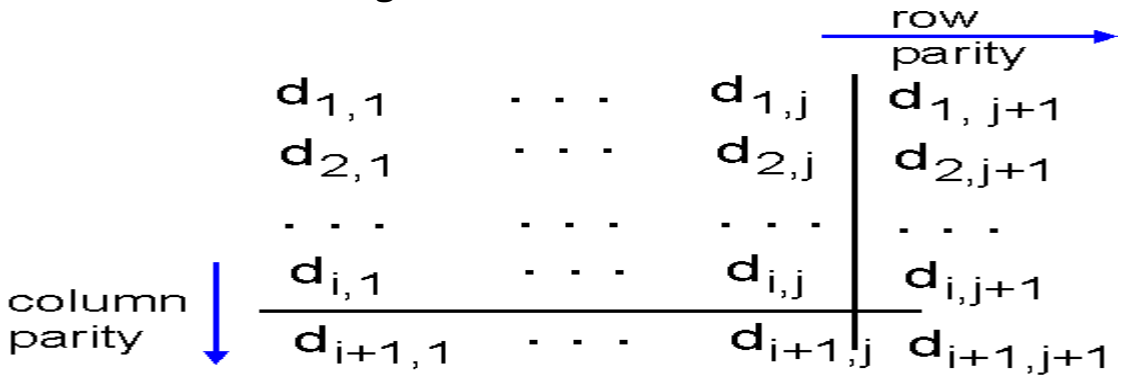
Paridade de 1 Bit:

Detecta erros em um único bit



Paridade de Bit Bidimensional:

Detecta e corrige em um único bit



Checksum Internet

Objetivo: detectar "erros" (ex., bits trocados) no segmento transmitido (nota: usado *apenas* na camada de transporte)

Transmissor:

- trata o conteúdo do segmento como uma seqüência de inteiros de 16 bits
- checksum: adição (complemento de 1 da soma) do conteúdo do segmento
- transmissor coloca o valor do checksum no campo de checksum UDP

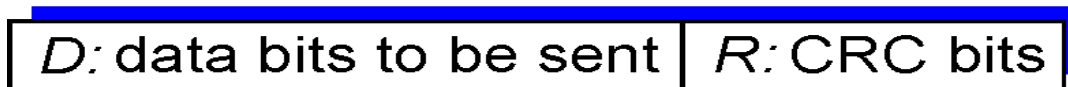
Receptor:

- calcula o checksum do segmento recebido
- verifica se o checksum calculado é igual ao valor do campo de checksum:
 - NÃO - erro detectado
 - SIM - nenhum erro foi detectado. *Mas pode conter erros? Mais sobre isto posteriormente*

Métodos de "Checksum"

- *Códigos de Redundância Cíclica (Cyclic Redundancy Codes):*
 - Dados considerados como a seqüência de coeficientes de um polinômio (**D**)
 - É escolhido um polinômio *Gerador*, (**G**), ($\Rightarrow r+1$ bits)
 - Divide-se (módulo 2) o polinômio $D \cdot 2^r$ por G . Acrescenta-se o resto (**R**) a D . Observa-se que, por construção, a nova seqüência $\langle D, R \rangle$ agora é exatamente divisível por G
 - Receptor conhece G , divide $\langle D, R \rangle$ por G . Caso o resto seja diferente de zero: detectado erro!
 - Pode detectar todos os erros em rajadas menores do que $r+1$ bits
 - Usado amplamente na prática (ATM, HDLC)

← d bits → ← r bits →



*bit
pattern*

$$D * 2^r \quad \text{XOR} \quad R$$

*mathematical
formula*

Exemplo de CRC

Queremos:

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

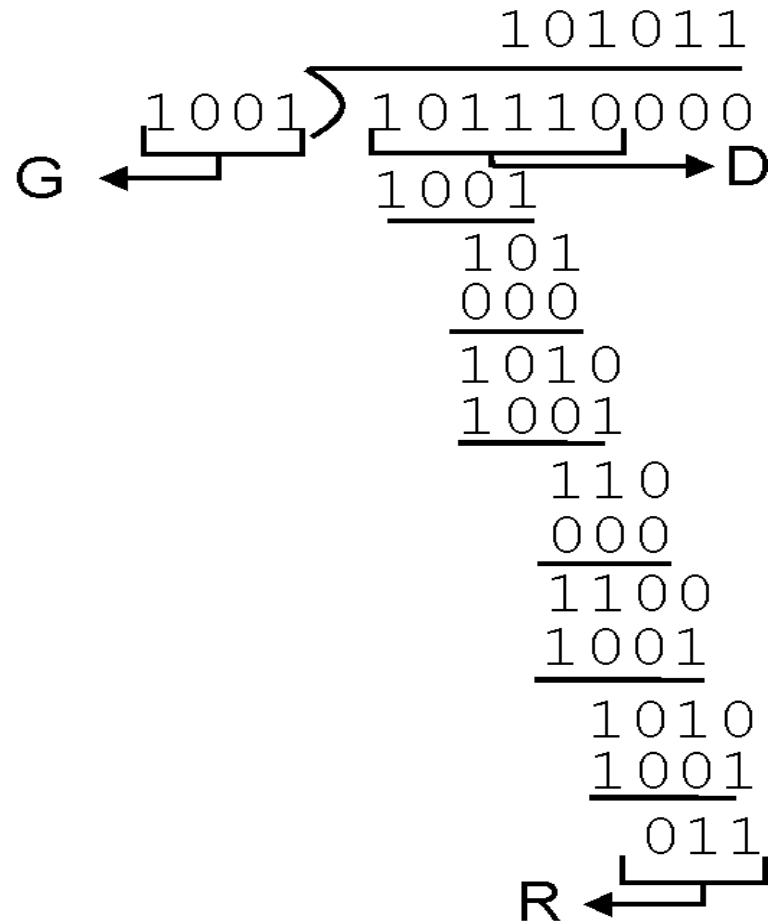
de forma equivalente:

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

de forma equivalente :

se dividirmos $D \cdot 2^r$ por G ,
queremos o resto R

$$R = \text{resto} \left[\frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$



Implementação de CRC (cont)

- Remetente realiza em tempo real por hardware a divisão da seqüência D pelo polinômio G e acrescenta o resto R a D
- O receptor divide $\langle D, R \rangle$ por G ; se o resto for diferente de zero, a transmissão teve erro
- Padrões internacionais de polinômios G de graus 8, 12, 15 e 32 já foram definidos
- A ARPANET utilizava um CRC de 24 bits no protocolo de enlace de bit alternado
- ATM utiliza um CRC de 32 bits em AAL5
- HDLC utiliza um CRC de 16 bits

- $G_{CRC-32} = 100000100110000010001110110110111$

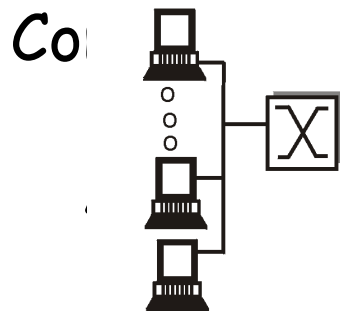
Camada de Enlace

- 5.1 Introdução e serviços
- 5.2 Detecção e correção de erros
- 5.3 Protocolos de Acesso Múltiplo
- 5.4 Endereçamento da Camada de Enlace
- 5.5 Ethernet
- 5.7 PPP
- 5.6 *Hubs e switches*
- 5.8 Virtualização do enlace: ATM e MPLS

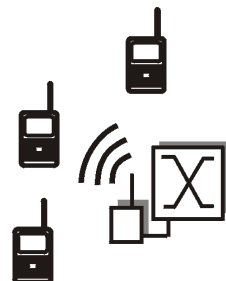
Enlaces e Protocolos de Acesso Múltiplo

Três tipos de enlace:

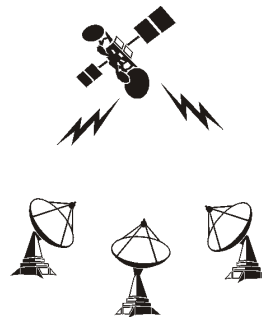
- (a) Ponto-a-ponto (um cabo único)
- (b) Difusão (cabo ou meio compartilhado; p.ex., Ethernet, rádio, etc.)
- (c) Comutado (p.ex., E-net comutada, ATM, etc)



shared wire
(e.g. Ethernet)



shared wireless
(e.g. Wavelan)



satellite



cocktail party

Protocolos de Acesso Múltiplo

- canal de comunicação único de difusão
- interferência: quando dois ou mais nós transmitem simultaneamente
 - **colisão** se um nó receber dois ou mais sinais ao mesmo tempo

Protocolo de acesso múltiplo

- algoritmo distribuído que determina como os nós compartilham o canal, isto é, determina quando um nó pode transmitir
- comunicação sobre o compartilhamento do canal deve usar o próprio canal!
 - não há canal fora da faixa para coordenar a transmissão

Protocolo Ideal de Acesso Múltiplo

Canal de difusão com taxa de R bps

1. Quando apenas um nó quiser transmitir, pode transmitir com taxa R .
2. Quando M nós quiserem transmitir, cada um poderá transmitir em média a uma taxa de R/M
3. Completamente descentralizado
 - nenhum nó especial para coordenar as transmissões
 - nenhuma sincronização de relógios ou slots
4. Simples

Taxonomia dos Protocolos MAC

Três classes gerais:

□ **Particionamento do Canal**

- divide o canal em pequenos "pedaços" (slots de tempo, frequência, código)
- aloca pedaço a um dado nó para uso exclusivo deste

□ **Acesso Aleatório**

- canal não é dividido, podem ocorrer colisões
- "recuperação" das colisões

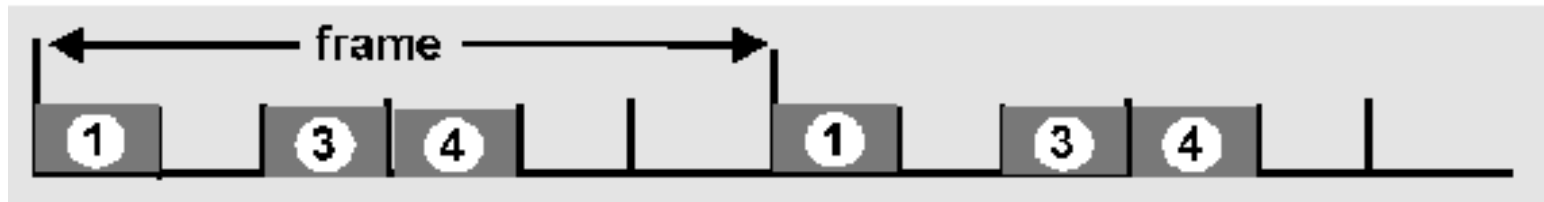
□ **Revezamento**

- Nós se alternam em revezamento, mas nós que possuem mais dados a transmitir podem demorar mais quando chegar a sua vez

Protocolos MAC de particionamento do canal: TDMA

TDMA: múltiplo acesso com divisão de tempo

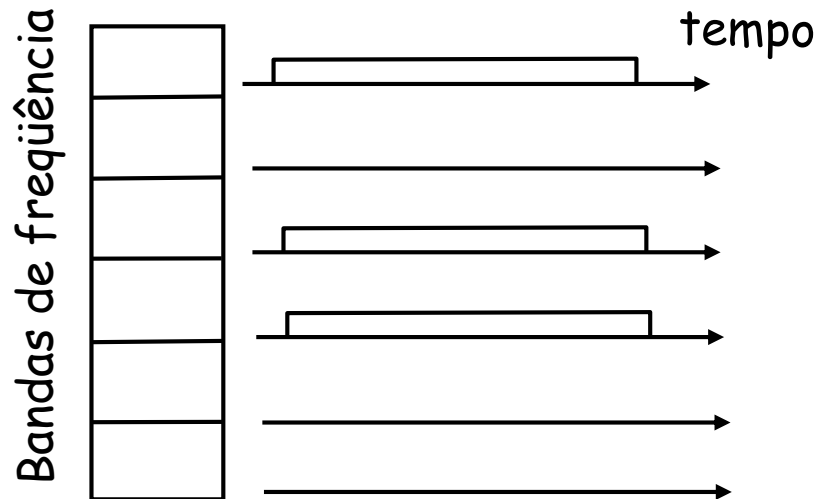
- acesso ao canal em "turnos"
- cada estação recebe um comprimento fixo de slot (comprimento = tempo de tx do pacote) em cada turno
- slots não usados permanecem ociosos
- Exemplo: LAN com 6 estações: slots 1, 3 e 4 com pacotes, slots 2, 5 e 6 ociosos



Protocolos MAC de particionamento do canal: FDMA

FDMA: múltiplo acesso com divisão de frequência

- espectro do canal dividido em bandas de frequência
- a cada estação é atribuída uma banda fixa de frequência
- tempo de transmissão não usado nas bandas permanecem ociosos
- exemplo: LAN com 6 estações, 1,3,4 com pcte, bandas 2,5,6 ociosas

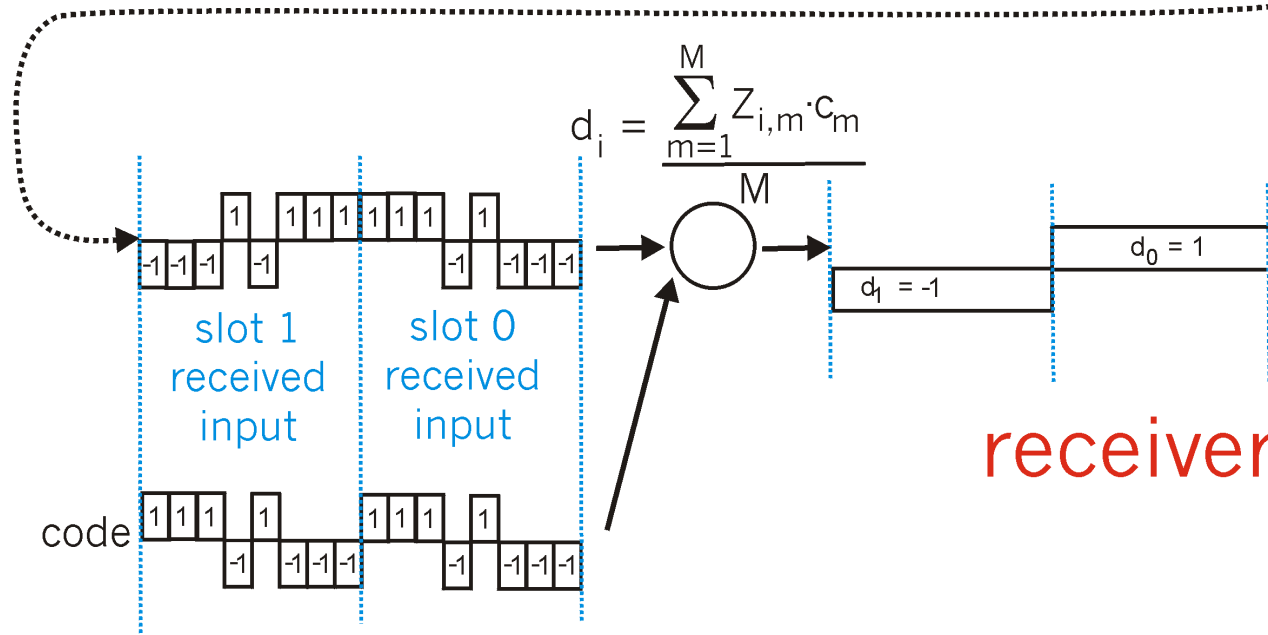
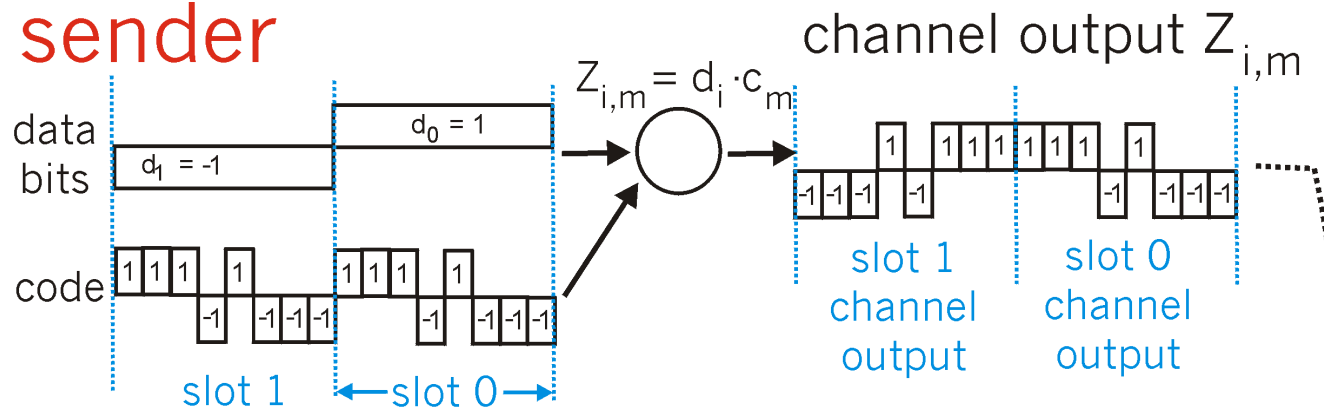


Protocolos MAC de particionamento do canal: CDMA

- **CDMA (Múltiplo Acesso por Divisão por Código):** explora esquema de codificação de **espectro espalhado** - DS (*Direct Sequence*) ou FH (*Frequency Hopping*)
- "código" único associado a cada canal; ié, particionamento do **conjunto de códigos**
- Mais usado em canais de **radiodifusão** (celular, satélite, etc)
- Todos usuários compartilham a **mesma freqüência**, mas cada canal tem sua **própria seqüência de "chipping"** (ié, código)
- Seqüência de chipping funciona como **máscara**: usado para **codificar** o sinal
- **sinal codificado** = (sinal original) X (seqüência de chipping)
- **decodificação**: produto interno do sinal codificado e a seqüência de chipping (observa-se que o produto interno é a soma dos produtos componente-por-componente)
- Para fazer CDMA funcionar, as seqüências de chipping devem ser mutuamente ortogonais entre si (i.é., produto interno = 0)

CDMA: Codificação/Decodificação

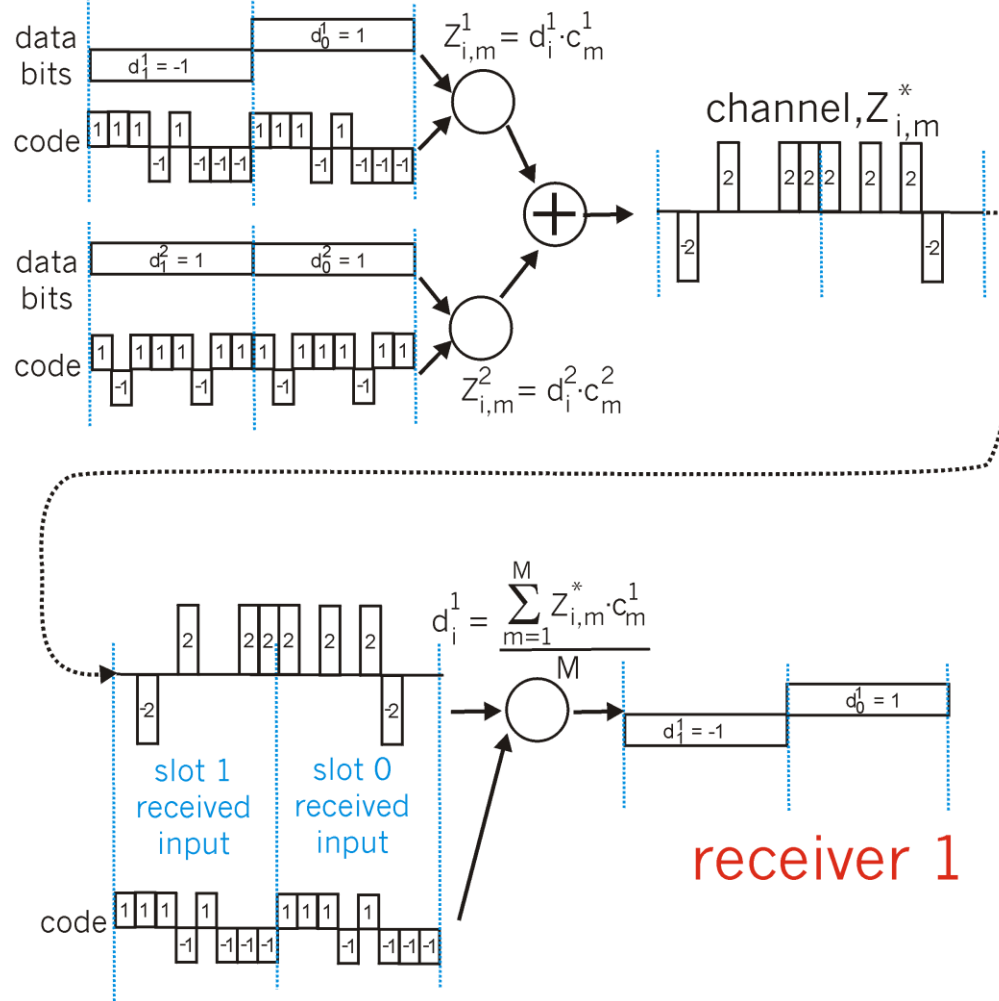
sender



receiver

CDMA: interferência entre dois remetentes

senders



CDMA (cont)

Propriedades do CDMA:

- protege usuários de interferência (inclusive a proposital)
(usado desde a Segunda Guerra Mundial)
- protege usuários do "multipath fading"
(interferência entre 2 trajetórias do mesmo sinal, p.ex. o direto e por reflexão) em rádio
- permite a "coexistência" de múltiplos usuários e suas transmissões simultâneas com um mínimo de interferência (se os códigos deles forem "ortogonais")

Protocolos de Acesso Aleatório

- Quando nó tem um pacote para transmitir
 - transmite na taxa máxima R .
 - nenhuma coordenação *a priori* entre os nós
- dois ou mais nós transmitindo → "colisão",
- O protocolo **MAC de acesso aleatório** especifica:
 - como detectar colisões
 - como se recuperar delas (através de retransmissões retardadas, por exemplo)
- Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - slotted ALOHA
 - ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA

Slotted ALOHA

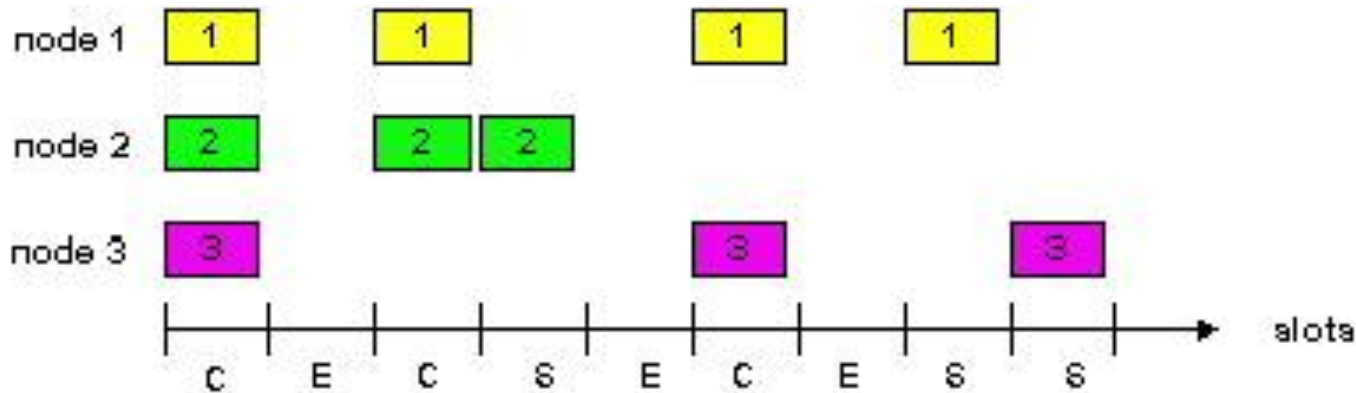
Hipóteses

- todos os quadros têm o mesmo tamanho
- tempo é dividido em slots de tamanho igual, tempo para transmitir 1 quadro
- nós começam a transmitir quadros apenas no início dos slots
- nós são sincronizados
- se 2 ou mais nós transmitirem num slot, todos os nós detectam a colisão

Operação

- quando o nó obtém um novo quadro, ele transmite no próximo slot
- sem colisões, nó pode enviar novo quadro no próximo slot
- caso haja uma colisão, nó retransmite o quadro em cada slot subsequente com probabilidade p até obter sucesso

Slotted ALOHA



Vantagens

- único nó ativo pode transmitir continuamente na taxa máxima do canal
- Altamente descentralizado: apenas slots nos nós precisam estar sincronizados
- simples

Desvantagens

- colisões, slots desperdiçados
- slots ociosos
- nós podem ser capazes de detectar colisões num tempo inferior ao da transmissão do pacote
- sincronização dos relógios

Eficiência do Slotted Aloha

Eficiência é a fração de longo prazo de slots com sucesso quando há muitos nós cada um com muitos quadros para transmitir

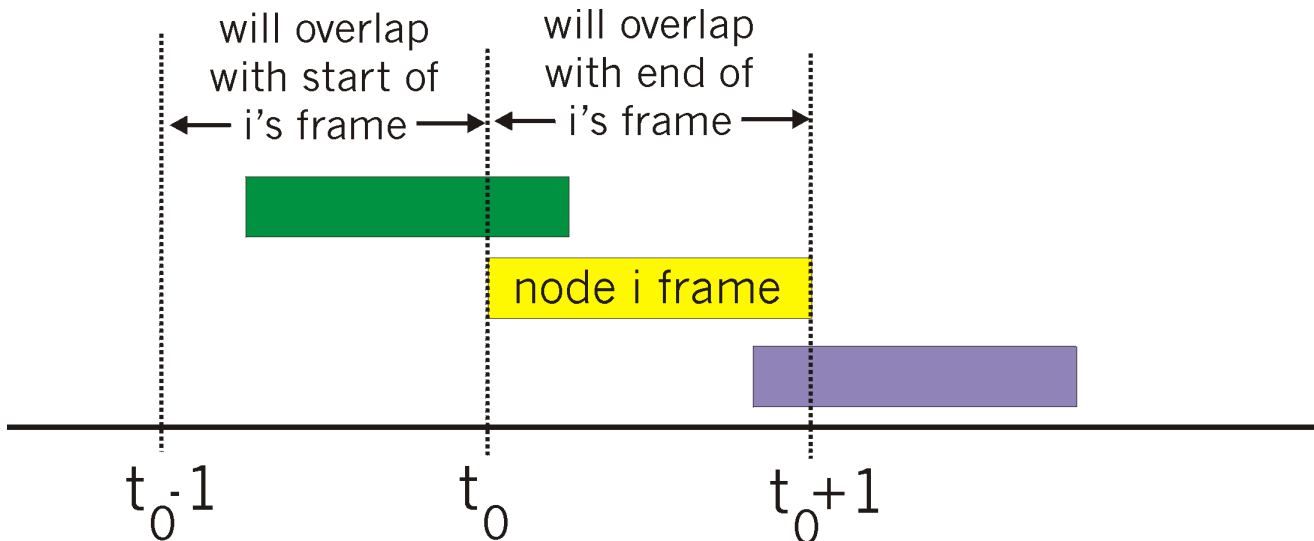
- Assuma N nós com muitos quadros para enviar, cada um transmite num slot com probabilidade p
- prob que nó 1 tenha sucesso em um slot = $p(1-p)^{N-1}$
- prob que qualquer nó tenha sucesso = $Np(1-p)^{N-1}$

- Para eficiência máx com N nós, encontre p^* que maximiza $Np(1-p)^{N-1}$
- Para muitos nós, faça limite para $Np^*(1-p^*)^{N-1}$ quando N tende a infinito, dá $1/e = 0,37$

Melhor caso: canal usado para transmissões úteis em 37% do tempo!

ALOHA Puro (sem slots)

- Aloha puro (sem slots): mais simples, sem sincronização
- Ao chegar um quadro no nó
 - transmite imediatamente
- Probabilidade de colisão aumenta:
 - quadro enviado em t_0 colide com outros quadros enviados em $[t_0-1, t_0+1]$



Eficiência do Aloha puro

$P(\text{sucesso por um dado nó}) = P(\text{nó transmite}) \cdot$

$P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0-1, t_0]) \cdot$

$P(\text{nenhum outro nó transmite em } [t_0, t_0+1])$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$$

$$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

... escolhendo o valor ótimo de p e deixando $n \rightarrow$ infinito

...

Ainda pior !

$$= 1/(2e) = 0,18$$

CSMA (Carrier Sense Multiple Access - Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora)

CSMA: escuta antes de transmitir:

Se o canal estiver livre: transmite todo o quadro

Se o canal estiver ocupado, adia a transmissão

Analogia humana: não interrompa outros!

Colisões no CSMA

colisões ainda *podem* acontecer:

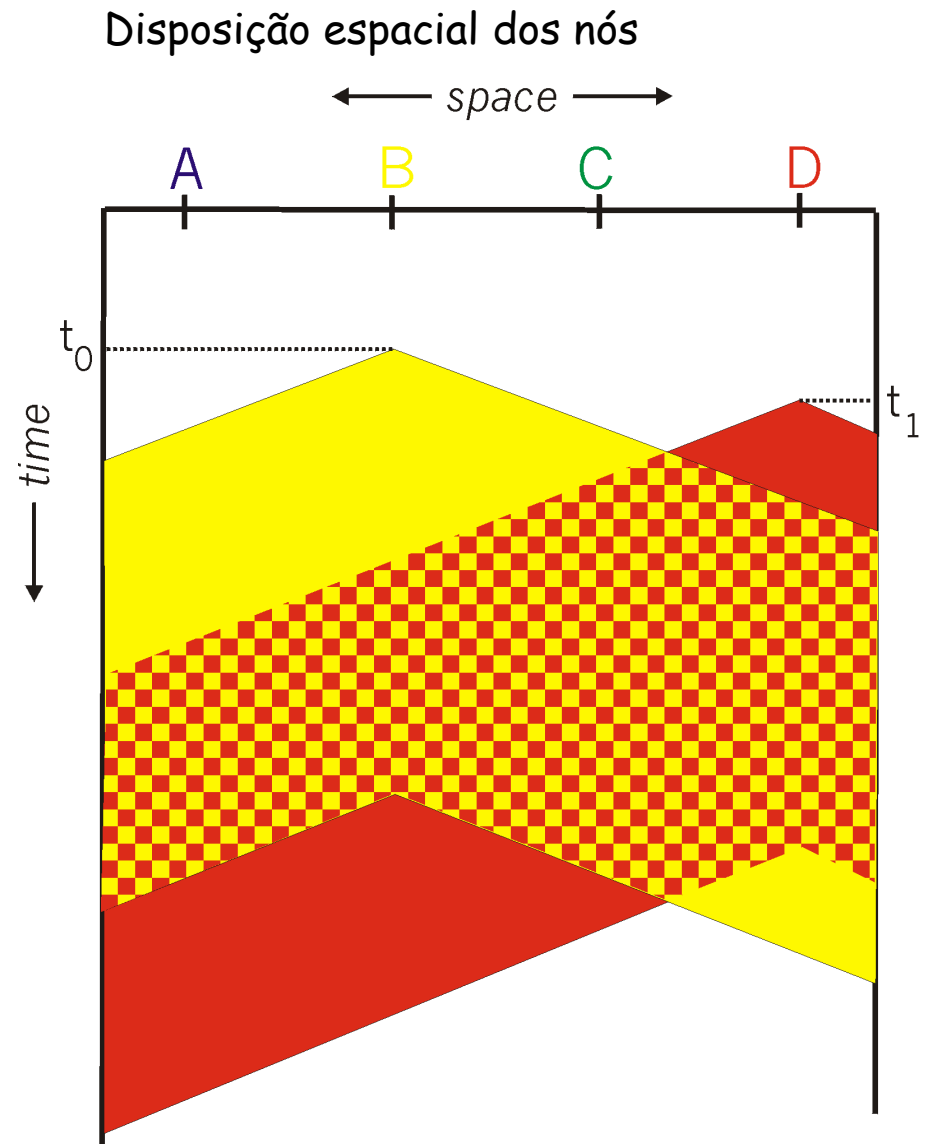
atraso de propagação significa que dois nós podem não ouvir a transmissão do outro

colisão:

todo o tempo de transmissão é desperdiçado

nota:

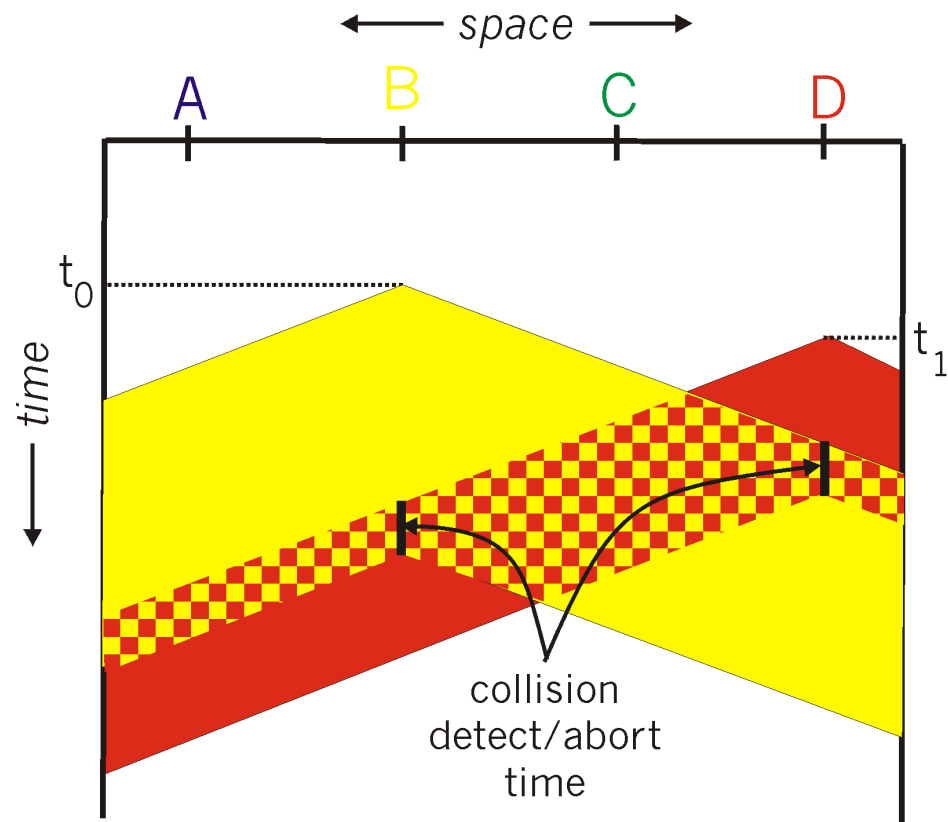
papel da distância e atraso de propagação na determinação da probabilidade de colisão



CSMA/CD (Detecção de Colisões)

- CSMA/CD:** detecção da portadora, adia a transmissão como no CSMA
- As colisões são *detectadas* em pouco tempo
 - Transmissões que sofreram colisões são abortadas, reduzindo o desperdício do canal
- Detecção de colisões:
- Fácil em LANs cabeadas: mede a potência do sinal, compara o sinal recebido com o transmitido
 - Difícil em LANs sem fio: o receptor é desligado durante a transmissão
- Analogia humana: bate papo educado!

Detecção de colisões em CSMA/CD



Protocolos MAC de "revezamento"

Protocolos MAC de particionamento do canal :

- Compartilha o canal eficientemente e de forma justa em altas cargas
- Ineficiente em baixas cargas: atraso no canal de acesso, alocação de $1/N$ da largura de banda mesmo com apenas 1 nó ativo!

Protocolos MAC de acesso aleatório:

- eficiente em baixas cargas: um único nó pode utilizar completamente o canal
- Altas cargas: overhead com colisões

Protocolos de revezamento:

Procura oferecer o melhor dos dois mundos!

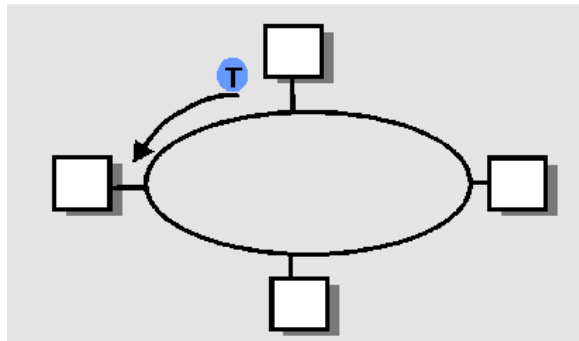
Protocolos MAC de "revezamento"

Polling:

- Nó mestre "convida" nós escravos a transmitir em revezamento
- Preocupações:
 - Overhead com as consultas (*polling*)
 - Latência
 - Ponto único de falha (mestre)

Passagem de permissão (*token*):

- controla **permissão** passada de um nó para o próximo de forma sequencial.
- mensagem de passagem da permissão
- preocupações:
 - overhead com a passagem de permissão
 - latência
 - Ponto único de falha (permissão)



Resumo dos protocolos MAC

- O que fazer com um meio compartilhado?
 - Particionamento do canal por tempo, frequência ou código
 - Divisão de Tempo, Divisão de Frequência
 - Particionamento Aleatório (dinâmico):
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Escutar a portadora: fácil em algumas tecnologias (cabeadas), difíceis em outras (sem fio)
 - CSMA/CD usado na Ethernet
 - CSMA/CA usado no 802.11
 - Revezamento
 - Consultas (*polling*) a partir de um ponto central, passagem de permissões

Tecnologias de LAN

Camada de enlace de dados até agora:

- serviços, detecção/correção de erros, acesso múltiplo

A seguir: Tecnologias de rede local (LAN)

- Endereçamento
- Ethernet
- Hubs e switches
- PPP