



EACH

Escola de Artes, Ciências e Humanidades
da Universidade de São Paulo

Redes de Computadores

Capítulo 5 – Camada de Enlace e Redes Locais

Profa. Cíntia B. Margi
Outubro/2009



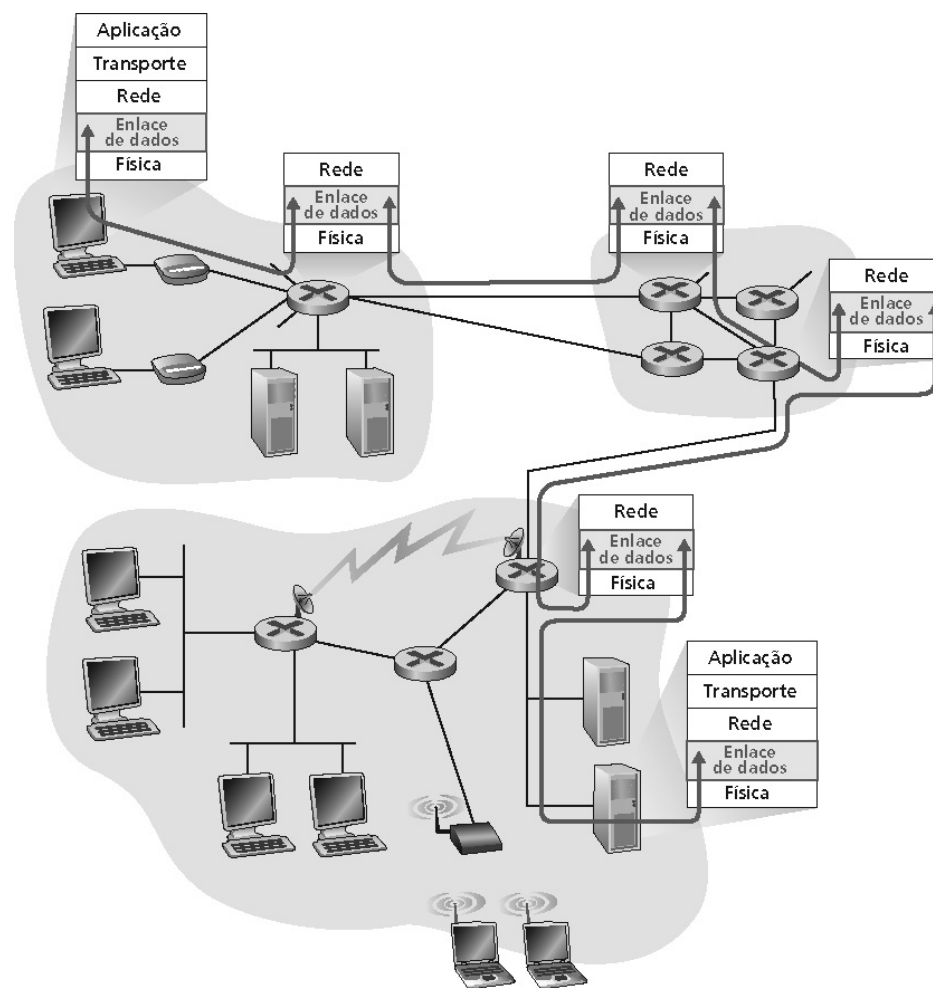
Modelo Internet

- **Aplicação:** suporta as aplicações de rede.
- **Transporte:** transferência de dados hospedeiro-hospedeiro (fim-a-fim).
- **Rede:** encaminhamento de datagramas da origem ao destino, determinação de rotas.
- **Enlace:** transferência de dados entre elementos vizinhos da rede.
 - PPP, Ethernet
- **Física:** bits “nos fios dos canais”.

Introdução

- **Terminologias:**

- ∇ Nó = hospedeiro ou roteador
- ∇ Enlace = canal de comunicação que conecta nós adjacentes ao longo do caminho.
- ∇ Quadro = unidade de dados da camada 2, encapsula o datagrama.
- **A camada de enlace tem a responsabilidade de transferir um datagrama de um nó para o nó adjacente sobre um enlace.**





Serviços da Camada de Enlace

- Enquadramento:
 - encapsula datagramas em quadros acrescentando cabeçalhos e trailer.
- Acesso ao enlace:
 - implementa acesso ao canal -> protocolos MAC (Medium Access Control).



Serviços da Camada de Enlace (cont.)

- Entrega confiável:
 - implementado através de reconhecimentos e retransmissões.
 - raramente usado em enlaces com baixa taxa de erro (fibra, alguns tipos de par de fios trançados de cobre).
 - enlaces sem fio (wireless): altas taxas de erro.
 - Por que prover confiabilidade fim-a-fim e na camada de enlace?



Serviços da Camada de Enlace (cont.)

- Controle de fluxo:
 - limitação da transmissão entre transmissor e receptor.
- Detecção de erros:
 - erros causados pela atenuação do sinal e por ruídos;
 - receptor detecta a presença de erros e avisa o transmissor para reenviar o quadro perdido.



Serviços da Camada de Enlace (cont.)

- Correção de erros:
 - receptor identifica e **corrige** o bit com erro(s) sem recorrer à retransmissão.
- Half-duplex e full-duplex:
 - com *half-duplex*, os nós em ambas as extremidades do enlace podem transmitir, mas não ao mesmo tempo.



Comunicação por Adaptadores

- ▽ Camada de enlace implementada no “adaptador” (isto é, NIC)
 - placa Ethernet, PCMCIA, 802.11.
- ▽ Adaptador é semi-autônomo.
- ▽ Camadas de enlace e física.

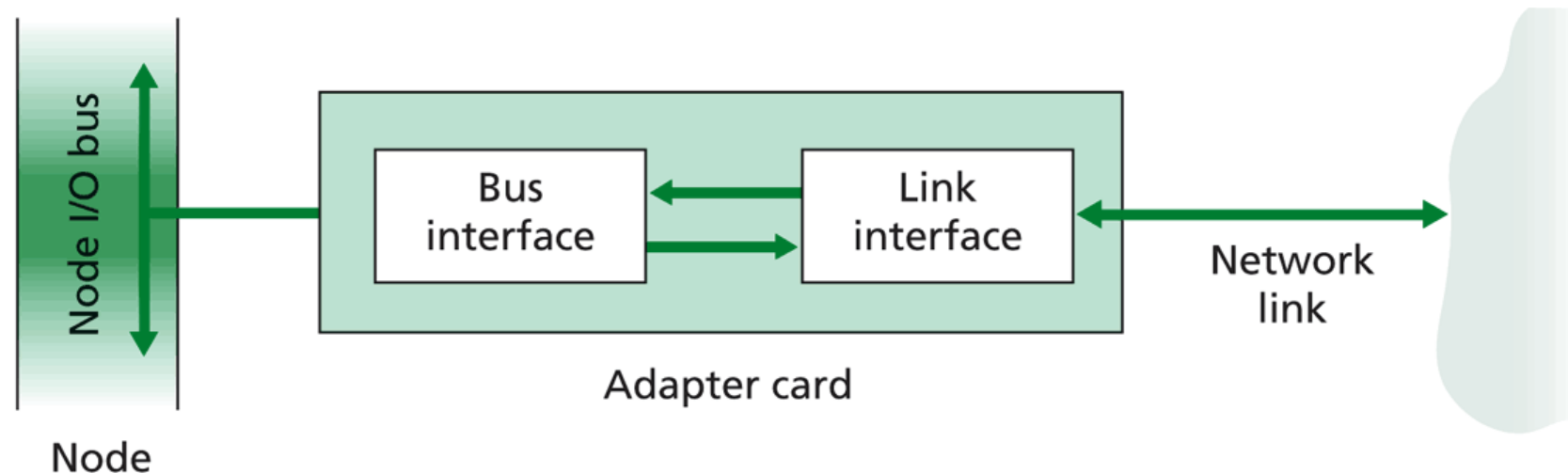


Figure 5.3 ♦ The adapter is a semi-autonomous unit.



Comunicação por Adaptadores

∇ Lado transmissor:

- encapsula o datagrama em um quadro
- adiciona bits de verificação de erro, transmissão confiável, controle de fluxo etc.

∇ Lado receptor:

- procura erros, transmissão confiável, controle de fluxo etc.
- extrai o datagrama, passa para o lado receptor.



EACH

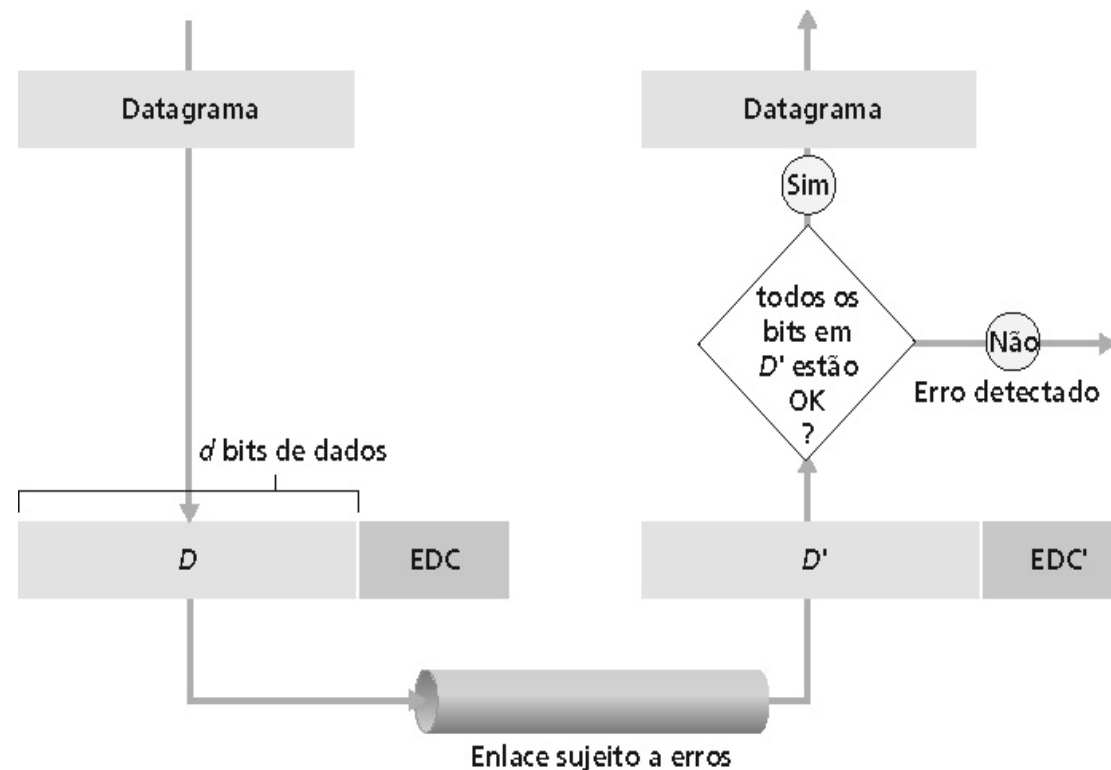
Escola de Artes, Ciências e Humanidades
da Universidade de São Paulo

Técnicas de Detecção e Correção de Erros



Detecção de Erros

- EDC= Bits de detecção e correção de erros.
- D = Dados protegidos pela verificação de erros; podem incluir os campos de cabeçalho.
- A detecção de erros não é 100% confiável!
- Protocolos podem deixar passar alguns erros, mas é raro...





Técnicas de Detecção de Erros

- Verificação de paridade:
 - idéias básicas de detecção e correção de erros.
- Somas de Verificação:
 - mais utilizados na camada de transporte.
- CRC (verificação de redundância cíclica):
 - normalmente empregadas na camada de enlace (NICs);
 - largamente usado na prática (ATM, HDCL).



Verificação de Paridade

- **Paridade com bit único:** detecta erro de um único bit.
- **Esquema de paridade par:** d bits de dados + 1 de paridade devem conter número par de bits 1.

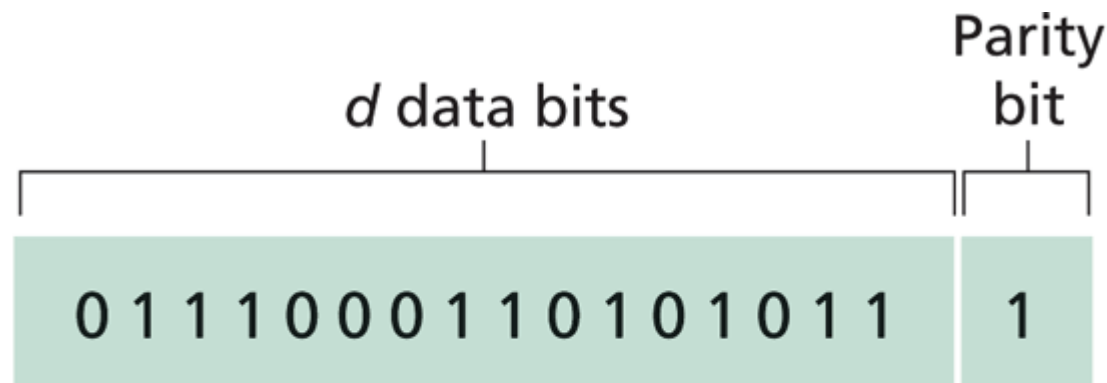


Figure 5.5 ♦ One-bit even parity



Verificação de Paridade

- **Paridade Bidimensional:**
 - permite identificar e corrigir **um** bit errado!
 - também detecta qualquer combinação de dois erros.
 - conhecida como FEC (Forward Error Correction).

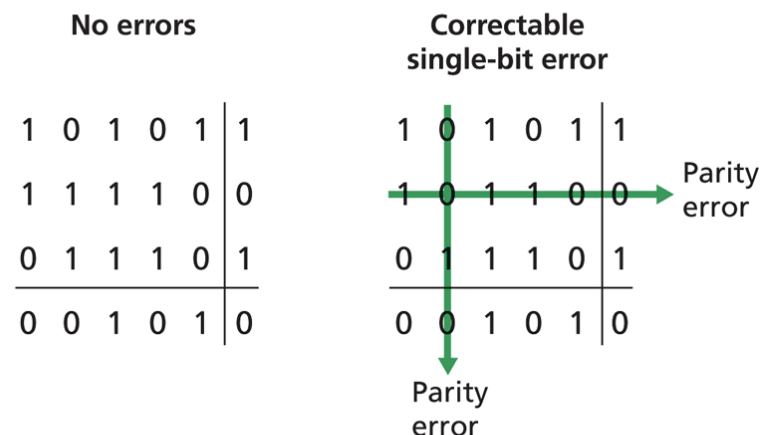
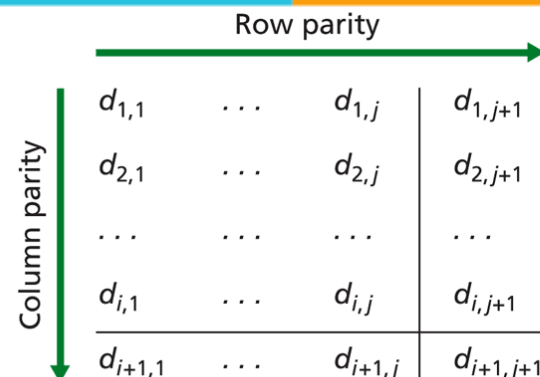


Figure 5.6 ♦ Two-dimensional even parity

Métodos de Soma de Verificação

- ❑ **Objetivo:** detectar “erros” (ex.: bits trocados) num segmento transmitido.
- ❑ Usado *apenas* na camada de transporte.
 - Fácil de implementar em software.
- Trata o conteúdo de segmentos como seqüências de números inteiros de 16 bits.
- ∀ Checksum é adição (soma em complemento de um) do conteúdo do segmento.

Verificação de Redundância Cíclica

- ∇ CRC (Cyclic Redundancy Check) ou Código Polinomial.
 - a cadeia de bits é como um polinômio, cujos coeficientes são 0 e 1;
 - operações na cadeia de bits interpretadas como aritmética polinomial.
- ∇ Os bits de dados, D , são vistos como um número binário.
- ∇ Escolhe um padrão gerador G de $r + 1$ bits.



CRC (cont.)

- ∇ **Objetivo:** escolher CRC bits, R , tal que:
- $\langle D, R \rangle$ é divisível de forma exata por G (módulo 2);
 - receptor conhece G , divide $\langle D, R \rangle$ por G . Se o resto é diferente de zero, erro detectado!
- ∇ Pode detectar todos os erros em seqüência com comprimento menor que $r+1$ bits.

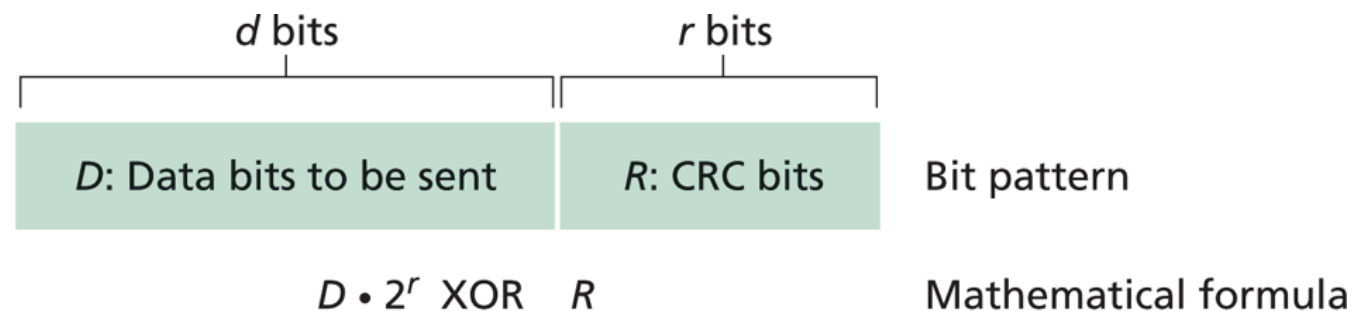


Figure 5.7 ♦ CRC codes



Cálculo de CRC no remetente

∀ Cálculos de CRC feitos por aritmética de módulo 2 sem 'vai 1' e 'empresta 1', o que é equivalente a XOR.

∀ **Desejado:**

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

∀ **Equivalente a:**

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

∀ Dividindo $D.2^r$ por G , obtém-se o resto R .



EACH

Escola de Artes, Ciências e Humanidades
da Universidade de São Paulo

Protocolos de Acesso Múltiplo

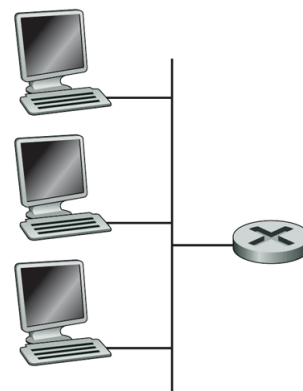


Enlaces e Protocolos de Múltiplo Acesso

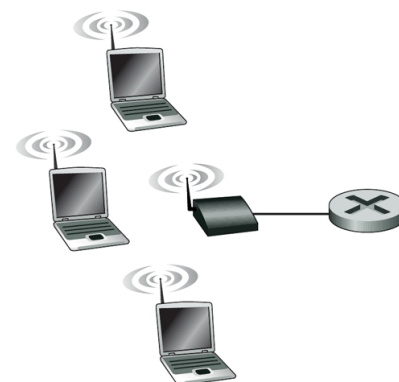
∇ Dois tipos de enlaces:

- Ponto-a-ponto (fio único).
 - PPP, SLIP.
- Broadcast (meio compartilhado);
 - Ethernet;
 - Upstream HFC;
 - rede sem fio (IEEE 802.11).

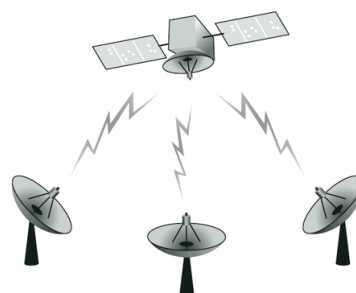
Shared wire
(for example, Ethernet)



Shared wireless
(for example, Wifi)



Satellite



Cocktail party



Figure 5.9 ♦ Various multiple access channels



Acesso ao Meio Compartilhado

- ∇ Canal de comunicação único e compartilhado.
- ∇ Duas ou mais transmissões simultâneas pelos nós geram interferência.
- ∇ Se um nó receber dois ou mais sinais ao mesmo tempo ocorre **colisão!**
- ∇ Assim, é necessário coordenar o acesso ao meio!
 - papel dos protocolos MAC (Medium Access Control).



Protocolos de Múltiplo Acesso

- ∇ Algoritmo distribuído que determina como as estações compartilham o canal, isto é, determinam quando cada estação pode transmitir.
- ∇ Comunicação sobre o compartilhamento do canal deve utilizar o próprio canal!
 - Nenhum canal fora-de-banda para coordenação.



Protocolo Ideal de Acesso

- ❑ Canal de broadcast de taxa R bps.
- ❑ Quando um nó quer transmitir, ele pode enviar a uma taxa R .
- ❑ Quando M nós querem transmitir, cada um envia a uma taxa média R/M
- ❑ Totalmente descentralizada:
 - nenhum nó especial para coordenar transmissões;
 - nenhuma sincronização de relógios e compartimentos.



Taxonomia de Protocolos MAC

- ∇ Divisão de canal
 - divide o canal em compartimentos (tempo, frequência);
 - aloca um 'pedaço' para uso de cada nó.
- ∇ Acesso aleatório:
 - canal não dividido, permite colisões;
 - “recuperação” das colisões.
- ∇ Passagem de revezamento:
 - seleção (*polling*): nó coordenador;
 - passagem de permissão (*token*).



Protocolos de Divisão de Canal: TDMA

- ❑ TDMA: acesso múltiplo por divisão temporal.
- ❑ Acesso ao canal é feito por “turnos” (TDM).
- ❑ Cada estação controla um compartimento (“slot”) de tamanho fixo em cada turno.
- ❑ Compartimentos não usados são desperdiçados.



Protocolos de Divisão de Canal: FDMA

- ❑ FDMA: acesso múltiplo por divisão de frequência.
- ❑ O espectro do canal é dividido em bandas de frequência (FDM).
- ❑ Cada estação recebe uma banda de frequência.
- ❑ Tempo de transmissão não usado nas bandas de frequência é desperdiçado.



Protocolos de Divisão de Canal: Exemplos

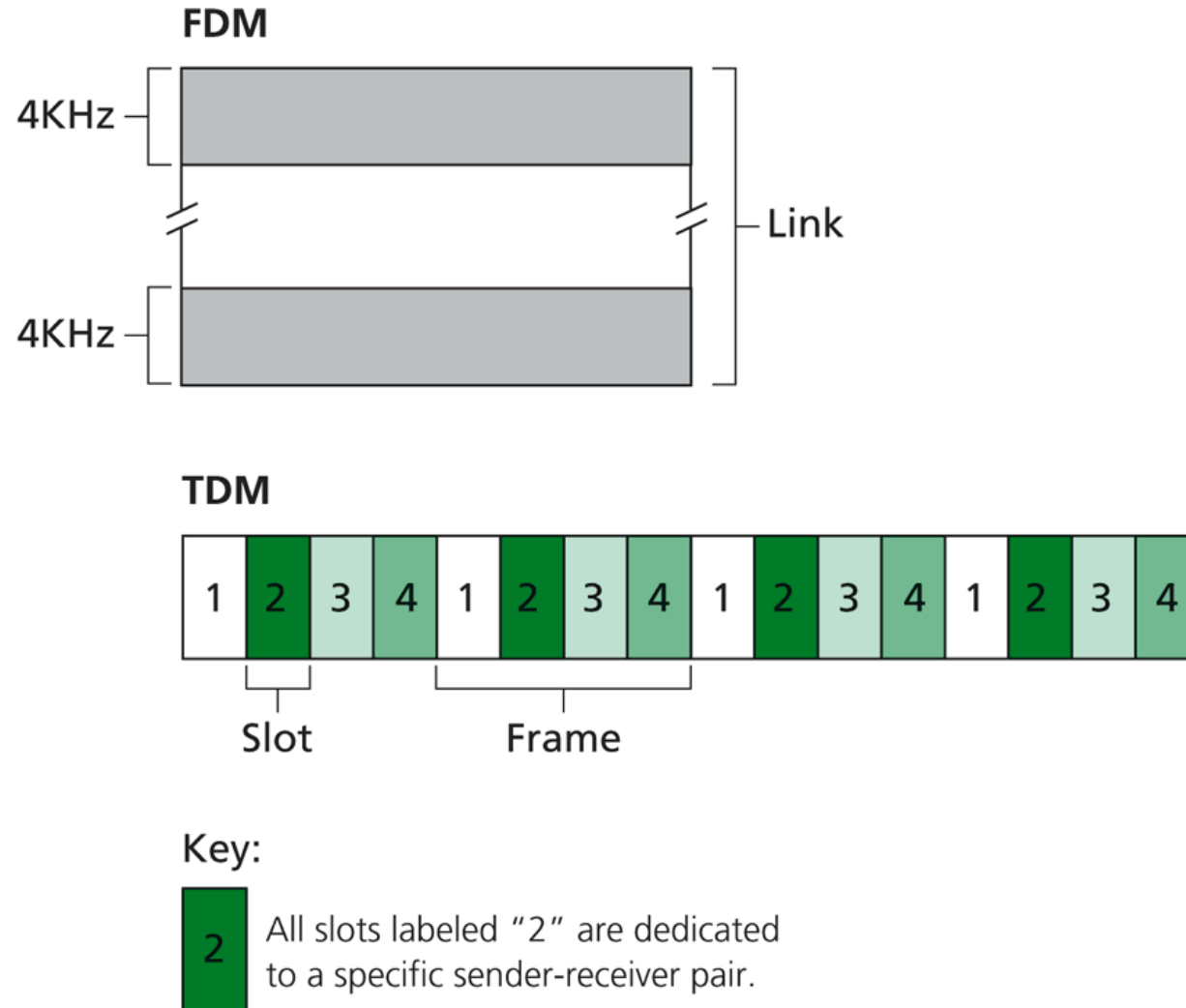


Figure 5.10 ♦ A four-node TDM and FDM example



Protocolos de Acesso Aleatório

- ∇ Quando o nó tem um pacote a enviar:
 - transmite com toda a taxa do canal R;
 - não há uma regra de coordenação *a priori* entre os nós.
- ∇ Múltiplas transmissões -> “colisão”!
- ∇ Protocolo MAC de acesso aleatório específica:
 - como detectar colisões;
 - como as estações se recuperam das colisões.
- ∇ Exemplos:
 - slotted ALOHA, ALOHA, CSMA e CSMA/CD.



Slotted Aloha - Suposições

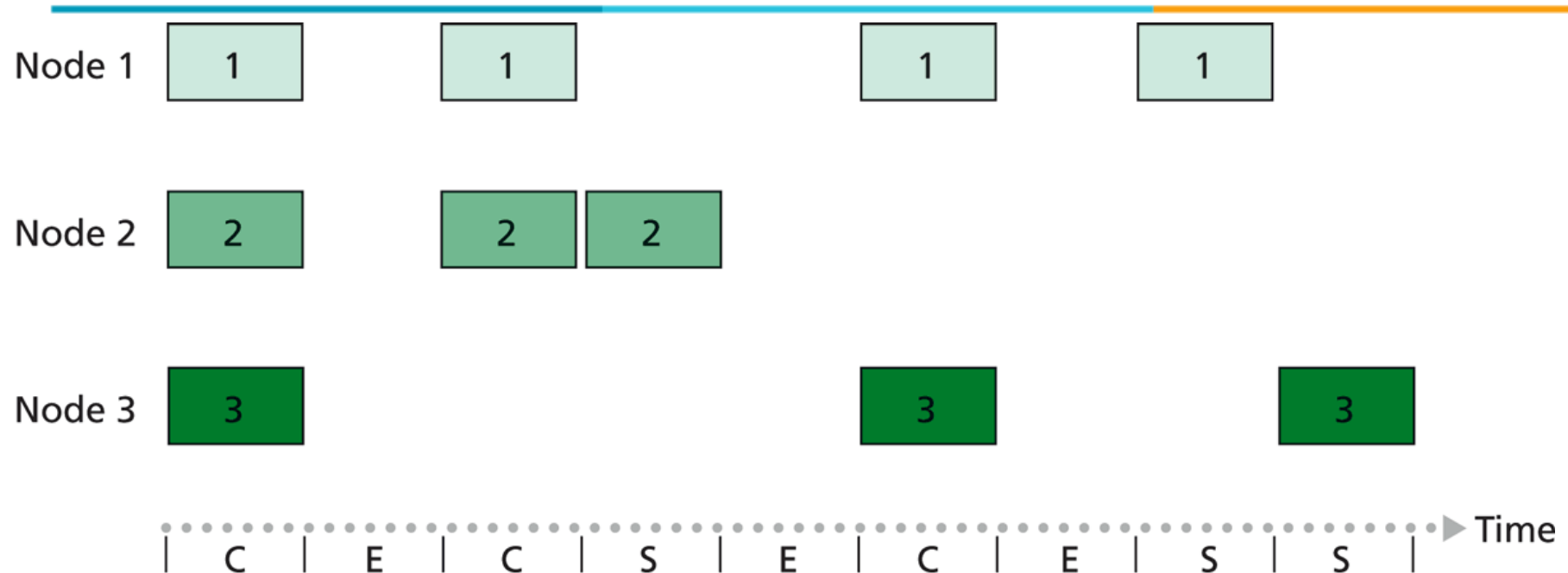
- ∇ Todos os quadros de mesmo tamanho.
- ∇ Tempo dividido em slots de mesmo tamanho, tempo para transmitir 1 quadro.
- ∇ Nós começam a transmitir quadros apenas no início dos slots.
- ∇ Nós são sincronizados.
- ∇ Se 2 ou mais nós transmitem no slot, todos os nós detectam a colisão.

Slotted Aloha - Operação

- ∇ Quando um nó obtém um novo quadro, ele transmite no próximo slot.
- ∇ Sem colisão, o nó pode enviar o novo quadro no próximo slot.
- ∇ Se há colisão, o nó retransmite o quadro em cada slot subsequente com probabilidade p até o sucesso.



Slotted Aloha - Operação



Key:

C = Collision slot

E = Empty slot

S = Successful slot

Figure 5.11 ♦ Nodes 1, 2, and 3 collide in the first slot. Node 2 finally succeeds in the fourth slot, node 1 in the eighth slot, and node 3 in the ninth slot.



Slotted Aloha

- Vantagens:
 - Um único nó ativo pode transmitir com a taxa completa de canal.
 - Altamente descentralizada: somente slots em nós precisam ser sincronizados.
 - Simples.
- Desvantagens:
 - Colisões, desperdício de slots.
 - Slots ociosos.
 - Tempo para detectar colisão $<$ tempo para transmissão do pacote.
 - Sincronização de clock.



Slotted Aloha - Eficiência

- **Eficiência** é a fração de slots bem-sucedidos quando há muitos nós, cada um com muitos quadros para enviar.
- Suponha N nós com muitos quadros para enviar, cada um transmite no slot com probabilidade p .
 - Prob. de o nó 1 obter sucesso num slot = $p(1-p)^{N-1}$
 - Prob. de qualquer nó obter um sucesso = $Np(1-p)^{N-1}$

Slotted Aloha – Eficiência (cont)

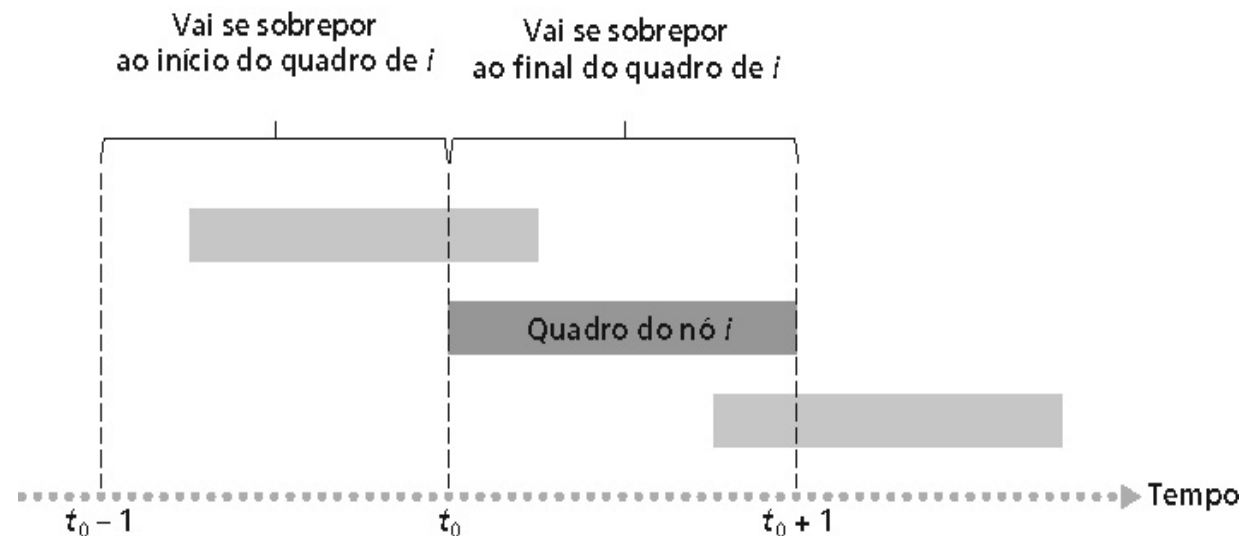
- ∇ Máxima eficiência \Rightarrow maximizar $Np(1-p)^{N-1}$
- ∇ Limite de $Np^*(1-p^*)^{N-1}$, com N indo ao infinito, resulta $1/e = 0,37$.

No máximo: uso do canal para envio de dados úteis: 37% do tempo!



Aloha puro (unslotted)

- ▽ Operação mais simples, não há sincronização.
- ▽ Quando um pacote precisa de transmissão é enviado sem esperar pelo início de um compartimento.
- ▽ A probabilidade de colisão aumenta:
Pacote enviado em t_0 colide com outros pacotes enviados em $[t_0-1, t_0+1]$





Eficiência do Aloha puro

$P(\text{sucesso de um dado nó}) = P(\text{nó transmitir}) *$

$P(\text{nenhum outro nó transmitir em } [p_0 - 1, p_0]) * P(\text{nenhum outro nó transmitir em } [p_0 - 1, p_0])$

$$= p * (1-p)^{N-1} * (1-p)^{N-1}$$

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

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

Pior do que Slotted Aloha!!



- ❑ Carrier Sense Multiple Access
- ❑ Escuta antes de transmitir:
 - Se o canal parece vazio: transmite o pacote.
 - Se o canal está ocupado, adia a transmissão.
 - Analogia humana:
não interrompa os outros!



CSMA - Colisões

- Colisões **podem** ocorrer:
 - o atraso de propagação implica que dois nós podem não ouvir as transmissões do outro!
- Colisão:
 - todo o tempo de transmissão do pacote é desperdiçado.



CSMA/CD

- ❑ CD = Collision Detection
- ❑ Detecção de portadora, deferência como no CSMA.
- ❑ Colisões **detectadas** num tempo mais curto.
- ❑ Transmissões com colisões são interrompidas, reduzindo o desperdício do canal.



CSMA/CD

- ❑ Detecção de colisão:
 - Fácil em LANs cabeadas:
 - medição da intensidade do sinal, comparação dos sinais transmitidos e recebidos.
 - Difícil em LANs sem fio:
 - receptor desligado enquanto transmitindo.
- ❑ Ethernet usa CSMA/CD!
 - detalhes do Ethernet mais adiante.
- ❑ http://media.pearsoncmg.com/aw/aw_kurose_network_2/applets/csmacd/csmacd.html



Protocolos MAC de Revezamento

- ❑ Protocolos MAC com divisão de canais:
 - Compartilham o canal eficientemente quando a carga é alta e bem distribuída.
 - Ineficiente nas cargas baixas: atraso no acesso ao canal (banda de $1/N$).
- ❑ Protocolos MAC de acesso aleatório
 - Eficiente nas cargas baixas: um único nó pode usar todo o canal.
 - Cargas altas: excesso de colisões.
- ❑ Protocolos MAC de revezamento:
 - Buscam o melhor dos dois mundos!



Protocolos MAC de Revezamento

- Seleção (polling):
 - Nó-mestre “convida” os escravos a transmitirem um de cada vez.
 - Problemas: overhead; latência; ponto único de falha (mestre).
- Passagem de token (permissão):
 - Controla um **token** passado de um nó a outro seqüencialmente.
 - Problemas: overhead; latência; ponto único de falha (token).



Protocolos MAC - Resumo

- ∇ Como se faz com um canal compartilhado?
- ∇ Divisão de canal:
 - ✎ TDMA, FDMA
- ∇ Acesso aleatório (dinâmico):
 - ✎ ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - ✎ Detecção de portadora: fácil em alguns meios físicos (cabos) e difícil em outros (wireless).
 - ✎ CSMA/CD usado na rede Ethernet.
- ∇ Revezamento:
 - ✎ Polling a partir de um site central, passagem de token.