



Marco Listanti

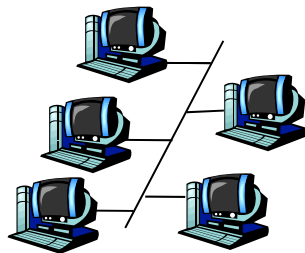
Lo strato di collegamento (Parte 2)

"Protocolli MAC"



Protocolli di accesso multiplo

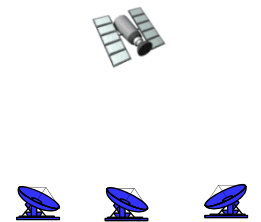
- Esistono due tipi di collegamenti di rete:
- **Collegamento punto-punto (PPP)**
 - Impiegato in connessioni telefoniche
 - Collegamenti punto-punto tra Ethernet e host
- **Collegamento broadcast (cavo o canale condiviso)**
 - Ethernet
 - Wireless LAN 802.11



canale cablato
condiviso



RF condivisa
(es. 802.11 WiFi)



RF condivisa
(satellite)



persone a un
cocktail party
(rumore, aria condivisa)



Protocolli di accesso multiplo

- Centinaia o anche migliaia di nodi possono comunicare direttamente su un canale broadcast
 - Si genera una collisione quando i nodi ricevono due o più frame contemporaneamente.
- **Protocolli di accesso multiplo**
 - Protocolli che fissano le modalità con cui i nodi regolano le loro trasmissioni sul canale condiviso
 - La comunicazione relativa al canale condiviso deve utilizzare lo stesso canale
 - non c'è un canale "out-of-band" per il coordinamento



Protocolli di accesso multiplo

■ Protocolli a suddivisione del canale (canalizzazione statica)

- Suddivide del canale in "parti più piccole" (slot di tempo, frequenza, codice)
- le parti vengono allocate ad un nodo per utilizzo esclusivo

■ Protocolli ad accesso dinamico

■ Protocolli ad accesso casuale (random access)

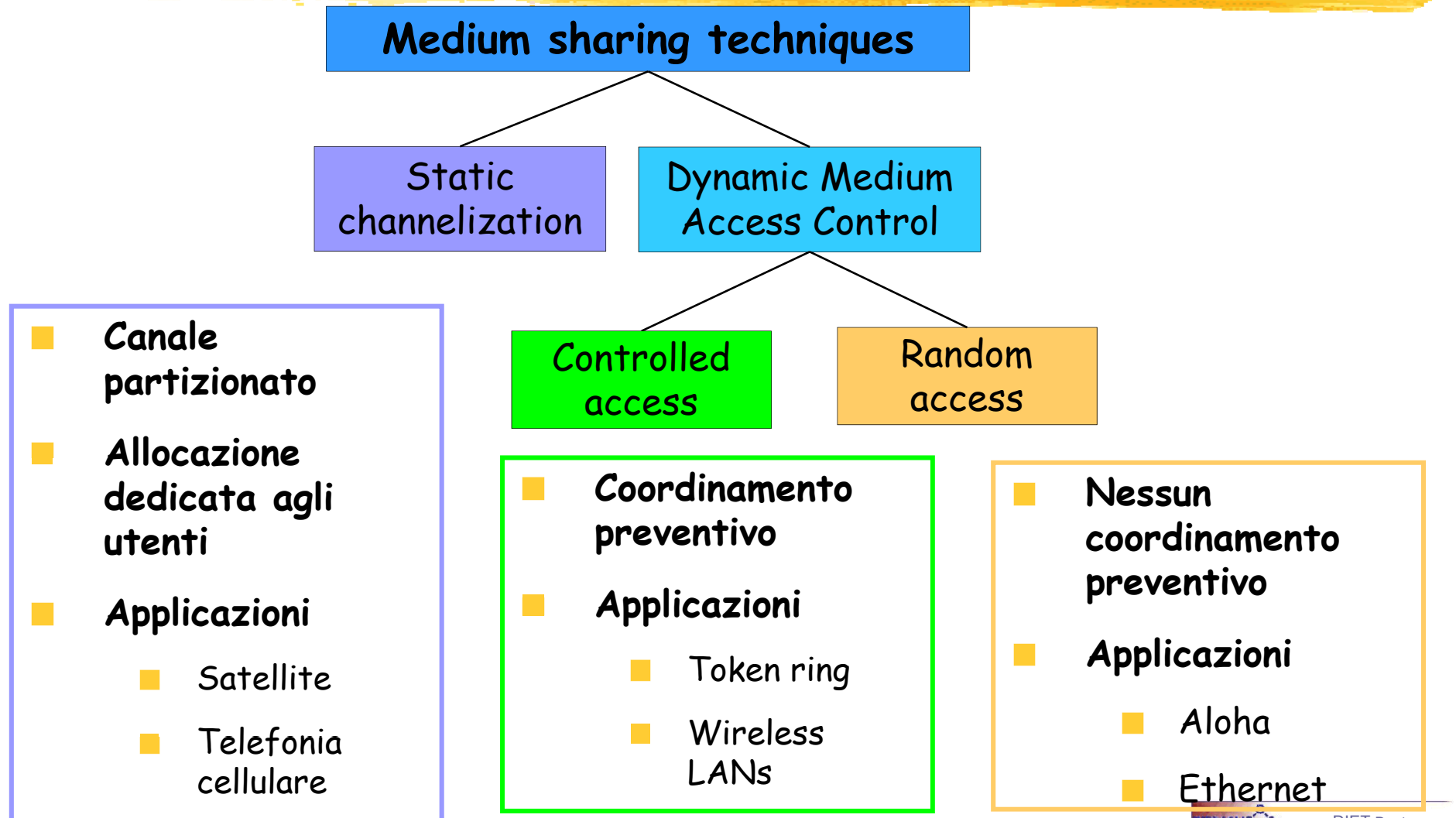
- I canali non vengono divisi e si può verificare una collisione
- I nodi coinvolti ritrasmettono ripetutamente i pacchetti

■ Protocolli ad accesso controllato (controlled access)

- Ciascun nodo ha il suo turno di trasmissione, ma i nodi che hanno molto da trasmettere possono avere turni più lunghi.



Protocolli di accesso multiplo

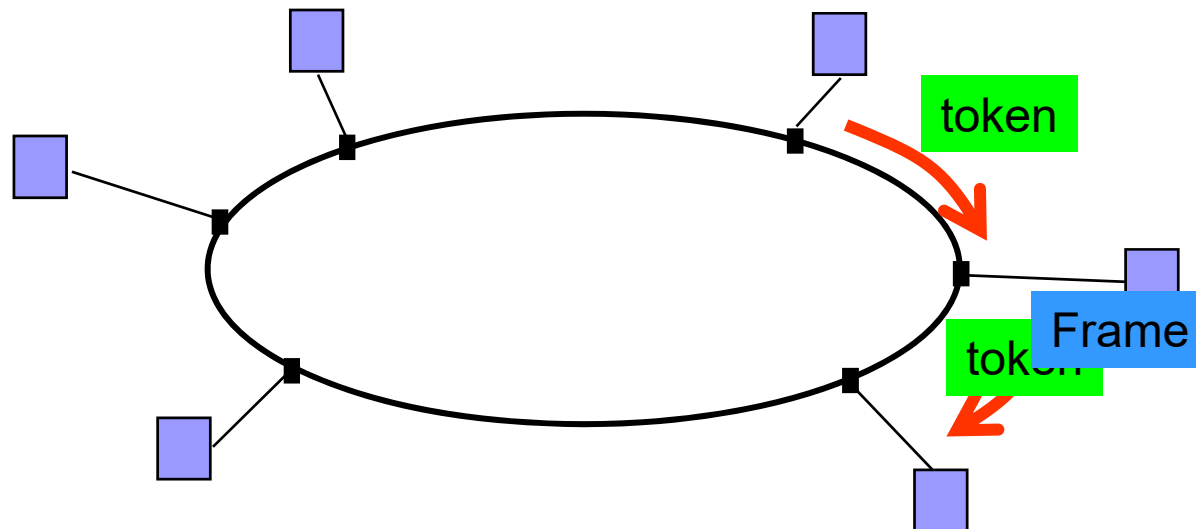




Protocollo ad accesso controllato Token-Passing

6

Rete ad anello

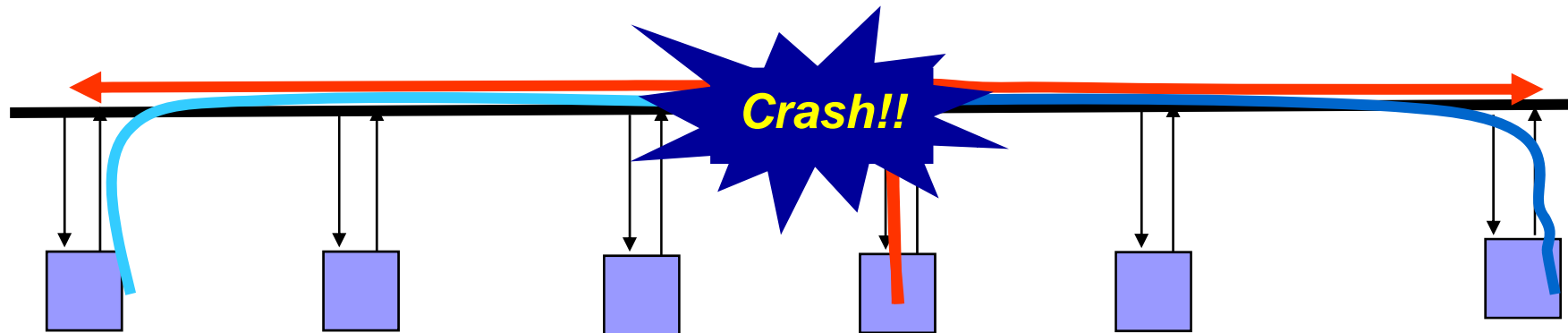


- La stazione che detiene il token può trasmettere
- Non sono possibili collisioni



Random Access

Rete a bus



- Una stazione trasmette quando è pronta
- Possibili collisioni, strategie di ritrasmissione



Protocolli ad accesso casuale

- Quando un nodo deve inviare un pacchetto
 - trasmette sempre alla massima velocità del canale, cioè **R bit/s**
 - nessun coordinamento a priori tra i nodi
- Se due o più nodi trasmettono “contemporaneamente” si ha una “**collisione**”
- Un protocollo ad accesso casuale definisce
 - Come rilevare un'eventuale collisione
 - Le politiche di ritrasmissione in caso di collisione
- Esempi di protocolli ad accesso casuale
 - ALOHA
 - slotted ALOHA
 - CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA



Prodotto Banda-Ritardo

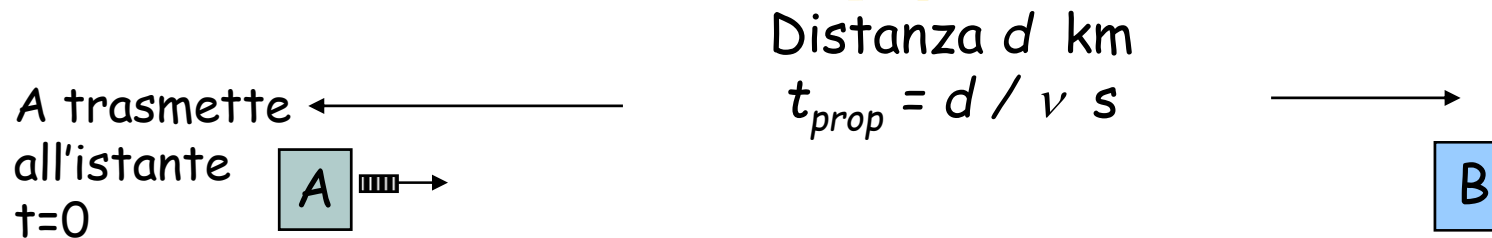
■ Prodotto banda ritardo

$$\text{PBR} = R \cdot d \text{ (bit)}$$

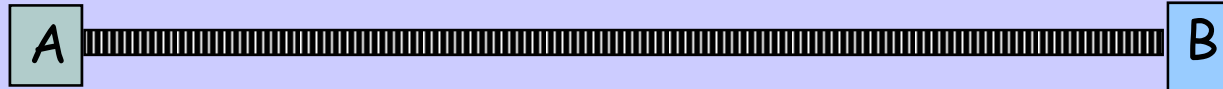
- **R** (bit/s): banda del canale
- **d** (sec): ritardo di propagazione end-to-end
- **E' il numero di bit che si trovano contemporaneamente sul canale**
 - lunghezza elettrica del canale
- **Parametro chiave dei protocolli MAC**
 - Il coordinamento tra i nodi richiede l'uso della banda del canale (in modo esplicito o implicito)
 - La difficoltà del coordinamento è legata al prodotto banda-ritardo



Esempio MAC con due nodi



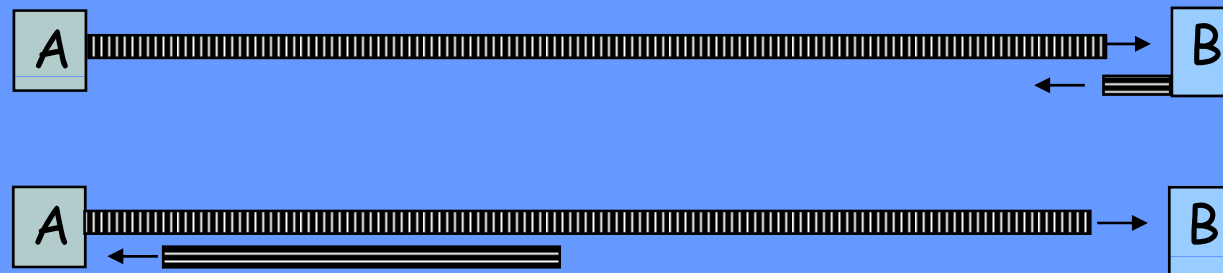
Caso 1



B non
trasmette
prima di $t=t_{prop}$
quindi A
cattura il canale

Caso 2

A rivela la
collisione
all'istante
 $t = 2 t_{prop}$



B trasmette
appena prima
di $t=t_{prop}$ e
rivela la
collisione
subito dopo



Calcolo dell'efficienza

- Nel caso in esame, la trasmissione di una frame ha un **intervallo di vulnerabilità** uguale a $2t_{prop}$
 - Il nodo B non deve iniziare la trasmissione un tempo t_{prop} prima e dopo rispetto all'inizio della trasmissione di A
 - R bit rate del canale (bit/s)
 - L lunghezza di una frame (bit)

$$\text{Efficienza} = \rho_{\max} = \frac{L}{L + 2t_{prop}R} = \frac{1}{1 + 2t_{prop}R/L} = \frac{1}{1 + 2a}$$

$$\text{Throughput Massimo} = R_{eff} = \frac{L}{L/R + 2t_{prop}} = \frac{1}{1 + 2a} R \text{ bit/s}$$

Prodotto banda
ritardo normalizzato

$$a = \frac{t_{prop}}{L/R}$$

← Ritardo di Propagazione
← Tempo di trasmissione di una frame



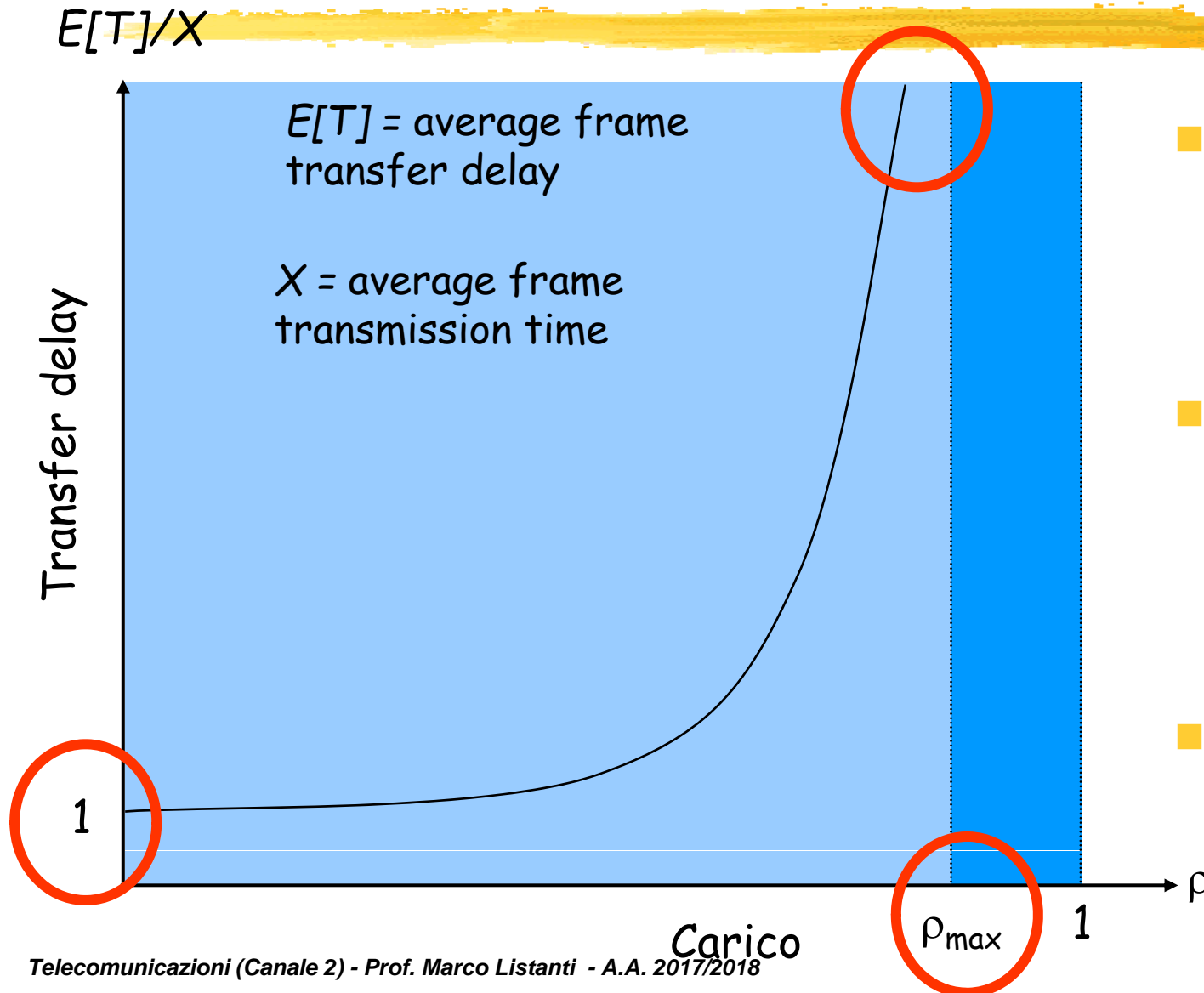
Valori tipici del prodotto banda-ritardo

Distanza	Bit Rate			Tipo di rete
	10 Mbit/s	100 Mbit/s	1 Gbit/s	
1 m	5×10^{-2}	5×10^{-1}	5×10	Desk area network (DAN)
100 m	5×10^1	5×10^2	5×10^3	Local area network (LAN)
10 km	5×10^2	5×10^3	5×10^4	Metropolitan area network (MAN)
1000 km	5×10^4	5×10^5	5×10^6	Wide area network (WAN)
100000 km	5×10^6	5×10^7	5×10^8	Global area network

- Max size Ethernet frame= 1500 byte = 12000 bit = 1.2×10^4 bit
- Se aumenta il prodotto banda-ritardo l'efficienza di un protocollo MAC diminuisce



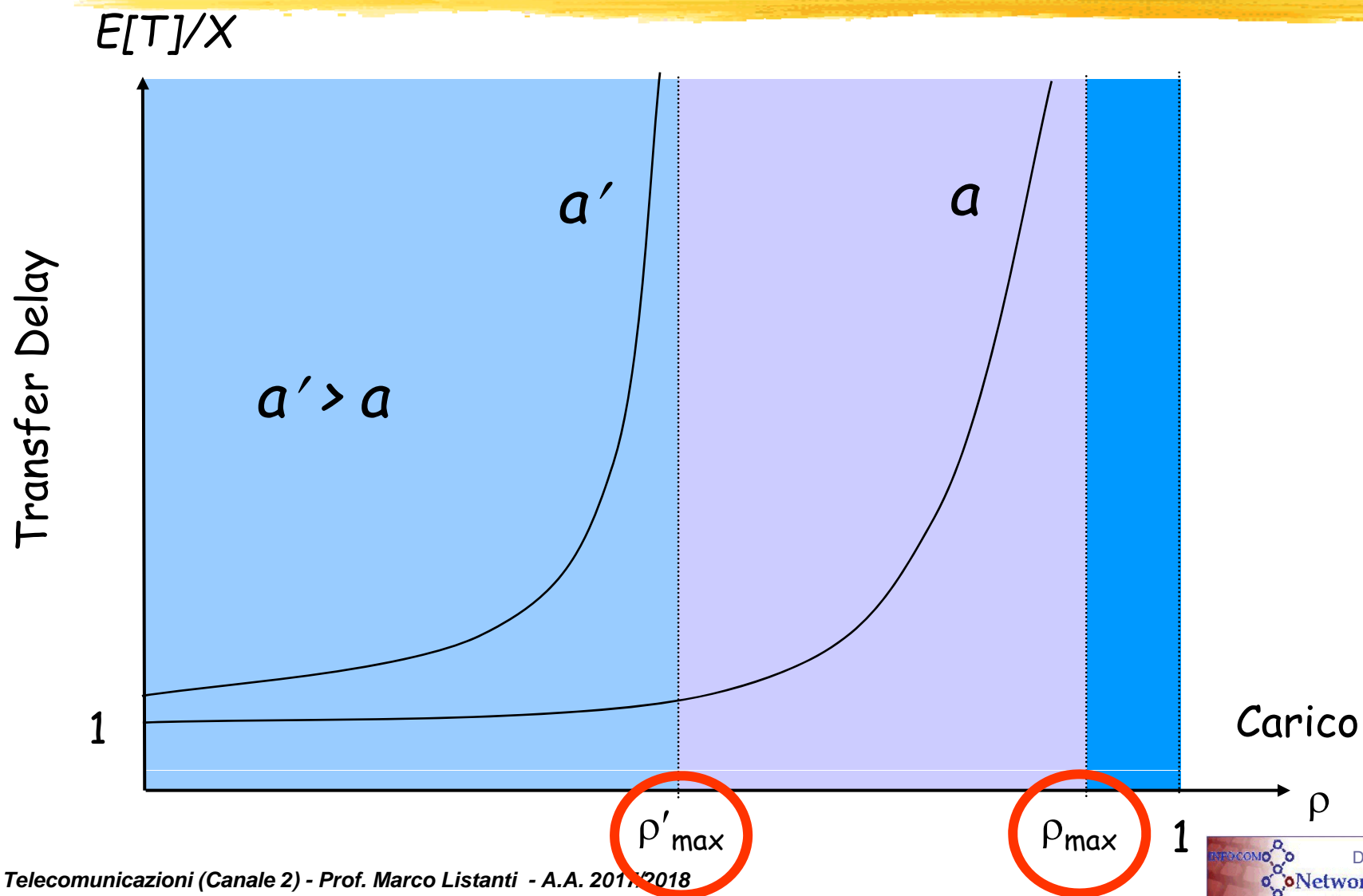
Prestazioni di ritardo



- A basso carico il ritardo è uguale al tempo di trasmissione
- Ad alto carico il ritardo cresce a causa delle attese per l'accesso al canale
- Carico massimo minore di 1



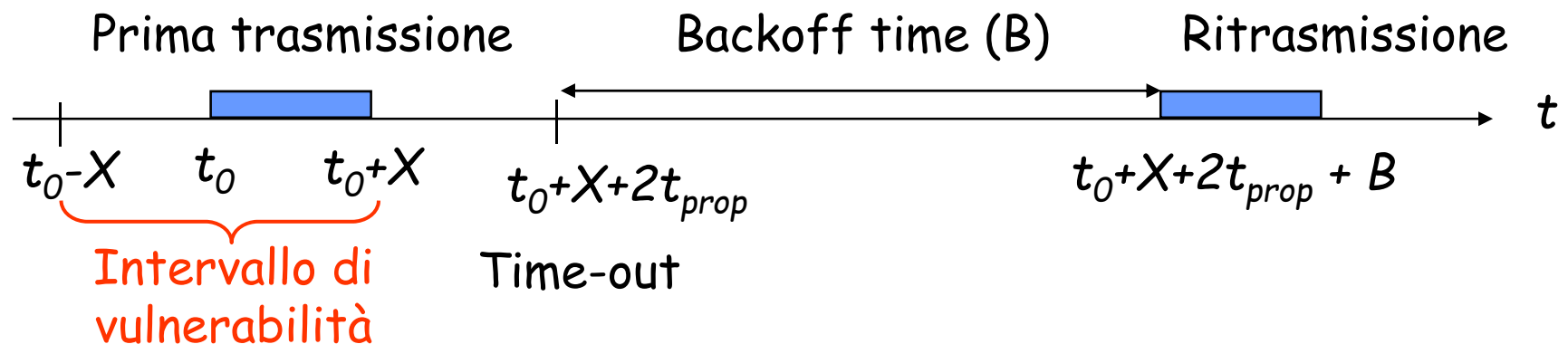
Dipendenza da a





Protocollo ALOHA

- Protocollo sviluppato per l'interconnessione tra dipartimenti dell'Università delle Hawaii
 - Un nodo trasmette appena ha una frame pronta
 - Se viene trasmessa più di una frame si ha una collisione (frame persa)
 - Se un nodo non riceve un ACK entro un certo tempo (timeout), il nodo calcola il tempo di ritrasmissione (backoff time)
 - Il nodo ritrasmette allo scadere del backoff time





Modello prestazionale Aloha

■ Definizioni

- X : frame transmission time (costante)
- S : throughput (numero medio di trame trasmesse con successo in un intervallo di X secondi) ($0 < S < 1$)
- G : load (numero medio di tentativi di trasmissione in un intervallo di X secondi)
- P_{succ} : probabilità che una trama sia trasmessa con successo

■ Si ha

$$S = G \cdot P_{success}$$



Modello prestazionale Aloha

- L'intervallo di vulnerabilità nella trasmissione di una frame è uguale a $2X$
- Si consideri che il carico G comprenda anche le trasmissioni
 - Dividiamo X in n intervalli di durata $\Delta = X/n$
 - se p è la probabilità di una trasmissione in un intervallo Δ si ha

$$G = n p$$

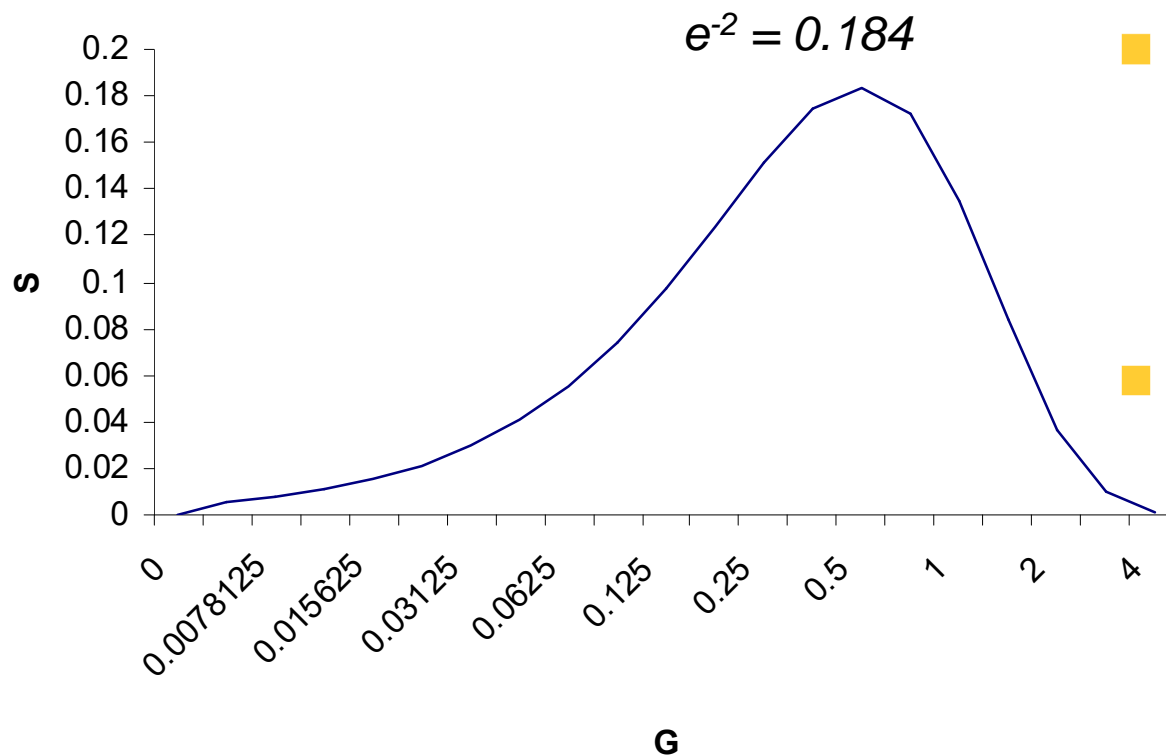
$$\begin{aligned} P_{succ} &= \\ &= P[0 \text{ arrivi in } 2X] = \\ &= P[0 \text{ arrivi in } 2n \Delta] = \\ &= (1 - p)^{2n} = \left(1 - \frac{G}{n}\right)^{2n} \\ &\text{per } n \rightarrow \infty \end{aligned}$$

$$P_{succ} = e^{-2G} \quad e = 2,7182$$



Throughput Aloha

$$S = GP_{\text{success}} = Ge^{-2G}$$



- Max throughput $\rho_{\text{max}} = 1/2e$ (18.4%)

- Comportamento bimodale

- per valori bassi di G , $S \approx G$

- per valori elevati di G , $S \downarrow 0$

- Le collisioni sono in numero elevato il throughput tende a zero

- instabilità



Slotted ALOHA

■ Ipotesi

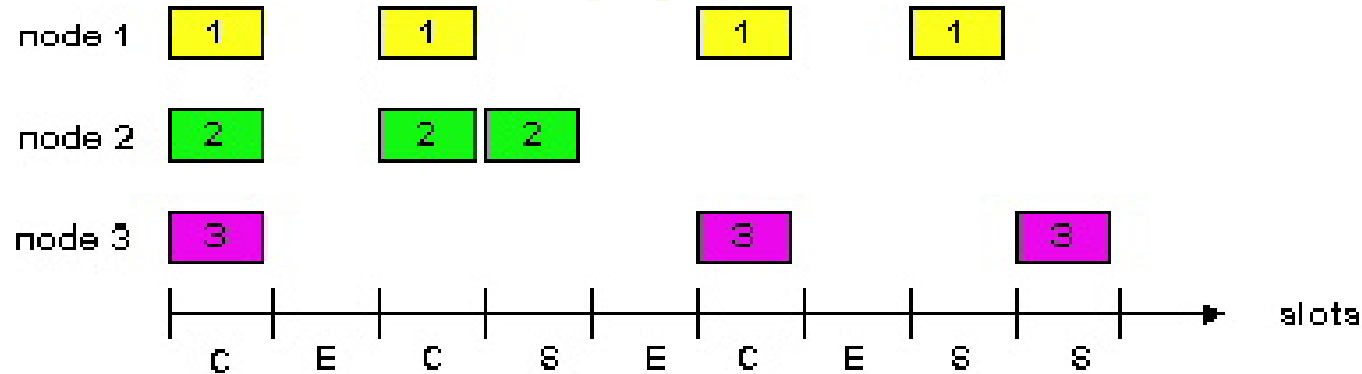
- Tutti i pacchetti hanno la stessa dimensione
- Il tempo è suddiviso in slot; ogni slot equivale al tempo di trasmissione di un pacchetto
- I nodi iniziano la trasmissione dei pacchetti solo all'inizio degli slot.
- I nodi sono sincronizzati
- Se in uno slot due o più pacchetti collidono, i nodi coinvolti rilevano l'evento prima del termine dello slot

■ Operazioni

- Quando a un nodo arriva un nuovo pacchetto da spedire, il nodo attende fino all'inizio dello slot successivo.
 - Se non si verifica una collisione: il nodo può trasmettere un nuovo pacchetto nello slot successivo
 - Se si verifica una collisione: il nodo la rileva prima della fine dello slot e ritrasmette con probabilità p il suo pacchetto durante gli slot successivi



Slotted ALOHA



Pro

- Consente a un singolo nodo di trasmettere continuamente pacchetti alla massima velocità del canale
- È fortemente decentralizzato, ciascun nodo rileva le collisioni e decide indipendentemente quando ritrasmettere.
- È estremamente semplice

Intervallo di vulnerabilità = X

Telecomunicazioni (Canale 2) - Prof. Marco Listanti - A.A. 2017/2018

Contro

- Una certa frazione degli slot presenterà collisioni e di conseguenza andrà "sprecata"
- Un'alta frazione degli slot rimane vuota, quindi inattiva



L'efficienza dello Slotted Aloha

L'**efficienza** è definita come la frazione di slot in cui avviene una trasmissione utile in presenza di un elevato numero di nodi attivi, che hanno sempre un elevato numero pacchetti da spedire.

- Supponiamo N nodi con pacchetti da spedire, ognuno trasmette i pacchetti in uno slot con probabilità p
- La probabilità di successo di un dato nodo $= p(1-p)^{N-1}$
- La probabilità che un nodo arbitrario abbia successo $= Np(1-p)^{N-1}$

- Per ottenere la massima efficienza con N nodi attivi, bisogna trovare il valore p^* che massimizza $Np(1-p)^{N-1} \rightarrow p^* = 1/N$

- Per un elevato numero di nodi, ricaviamo che

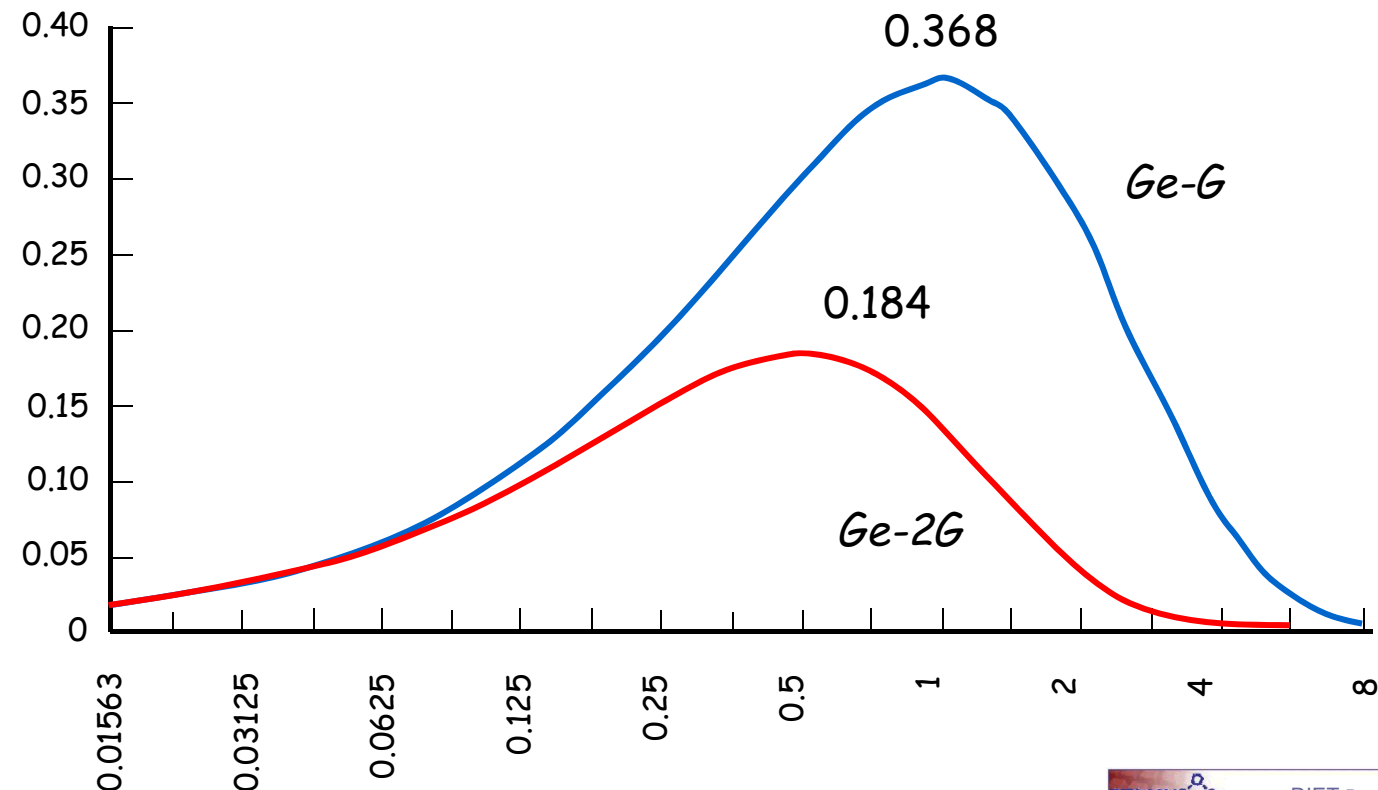
$$\lim_{N \rightarrow \infty} Np^* (1 - p^*)^{N-1} =$$
$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{N}\right)^N = \frac{1}{e} = 0,36$$

Nel caso migliore: solo il 36% degli slot sono utilizzati in modo utile



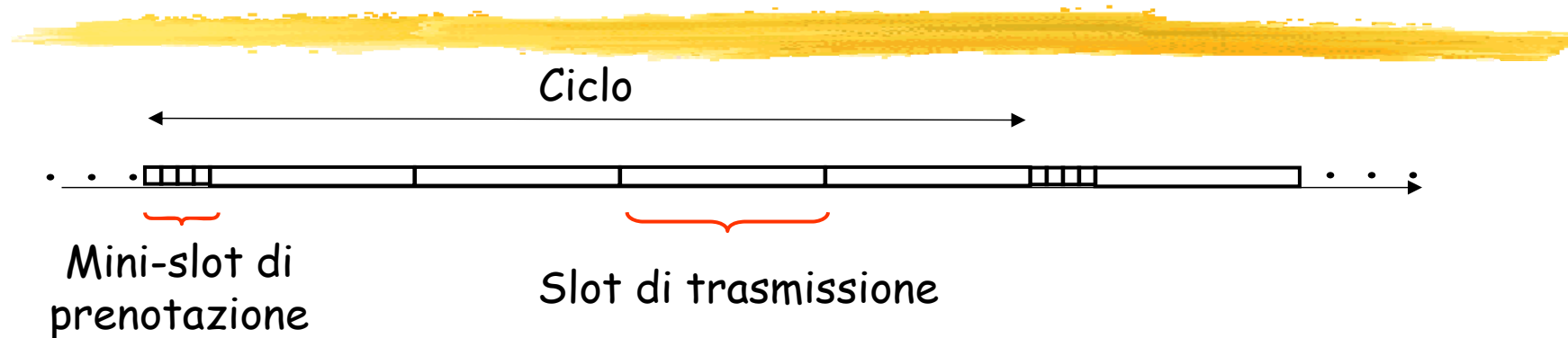
Throughput Aloha

$$\begin{aligned} S &= GP_{\text{success}} = GP[0 \text{ arrivi in } X] = GP[0 \text{ arrivi in } n\Delta] = \\ &= G(1-p)^n = G\left(1 - \frac{G}{n}\right)^n \rightarrow Ge^{-G} \end{aligned}$$





Applicazioni slotted Aloha



- Alcuni protocolli permettono la prenotazione di slot per effettuare la trasmissione delle frame
- L'asse dei tempi è suddiviso in cicli
- Ogni ciclo ha una serie di mini-slot per effettuare le prenotazioni
- I nodi usano il protocollo slotted Aloha nei mini-slot per effettuare le prenotazioni



Accesso multiplo a rilevazione della portante (CSMA)

■ Carrier Sensing Multiple Access

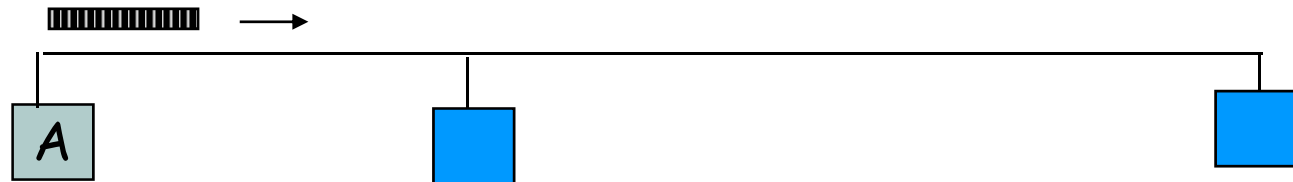
- Un nodo ascolta prima di trasmettere
 - Se rileva che il canale è libero, trasmette l'intera frame
 - Se il canale è occupato, il nodo aspetta un altro intervallo di tempo
- **Analogia:** se qualcun altro sta parlando, aspettate finché abbia concluso



CSMA

- **Un nodo ascolta il canale prima di trasmettere**
 - Se il canale è occupato, attende o applica il backoff (varie opzioni)
 - Se il canale è libero, inizia la trasmissione
 - **Intervallo di vulnerabilità è uguale a $2t_{prop}$** (effetto di cattura del canale)
 - Se avviene una collisione, questa interessa l'intera frame
 - se $\alpha > 1$, nessun guadagno rispetto ai protocolli ALOHA or slotted ALOHA

Il nodo A inizia
a trasmettere a
 $t = 0$



Il nodo A cattura
il canale al tempo
 $t = t_{prop}$



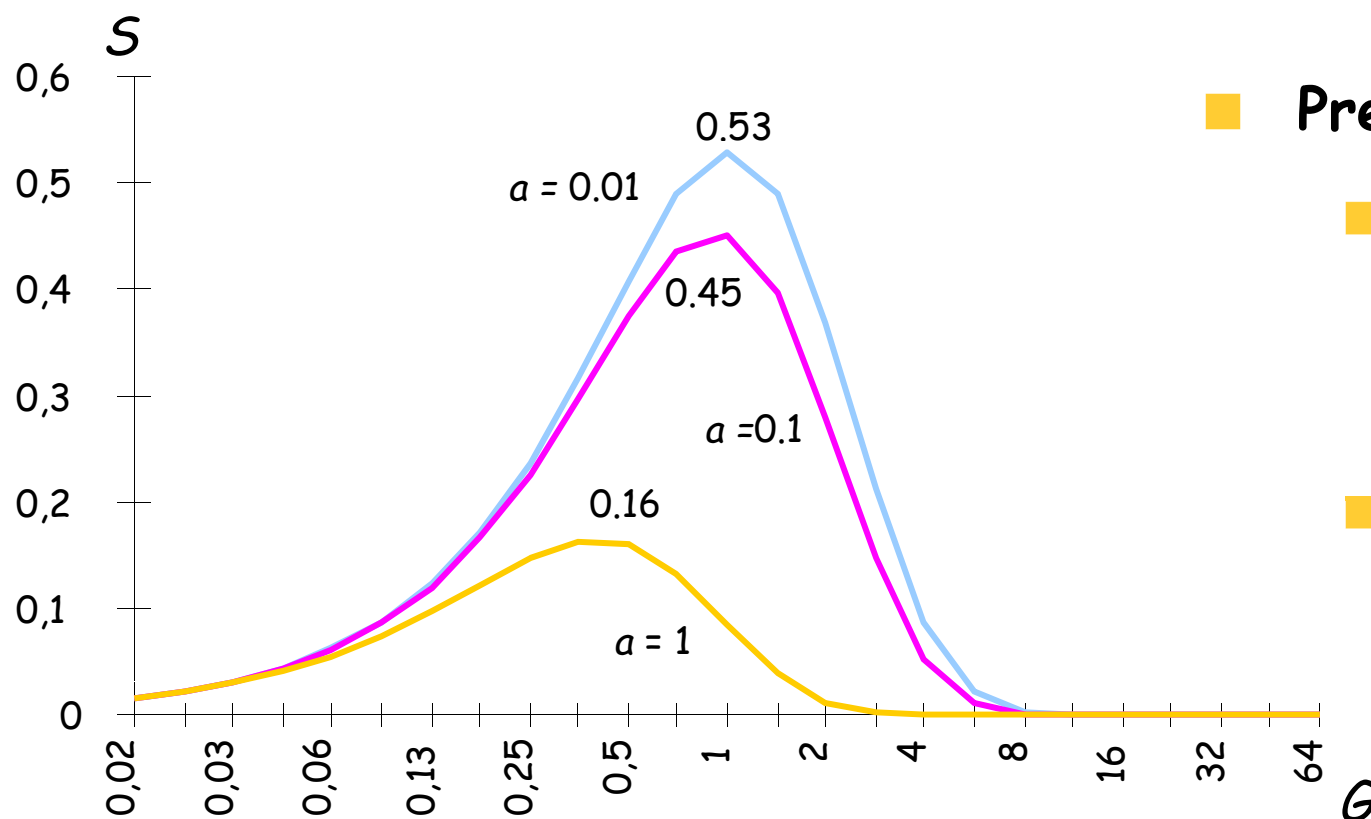


Algoritmi di persistenza

- Si applicano quando un nodo rivela il canale occupato
 - 1-persistent CSMA
 - Il nodo inizia la trasmissione non appena il canale si libera
 - Basso ritardo e bassa efficienza
 - Non-persistent CSMA
 - Il nodo applica un backoff, quindi effettua un nuovo carrier sensing
 - Alto ritardo e alta efficienza
 - p-persistent CSMA
 - Il nodo attende fino a che il canale si libera, quindi
 - con probabilità p trasmette
 - con probabilità $1-p$ attende un breve periodo (mini-slot) ed effettua nuovamente il carrier sensing
 - Il ritardo e l'efficienza possono essere modulati



Prestazioni 1-persistent CSMA

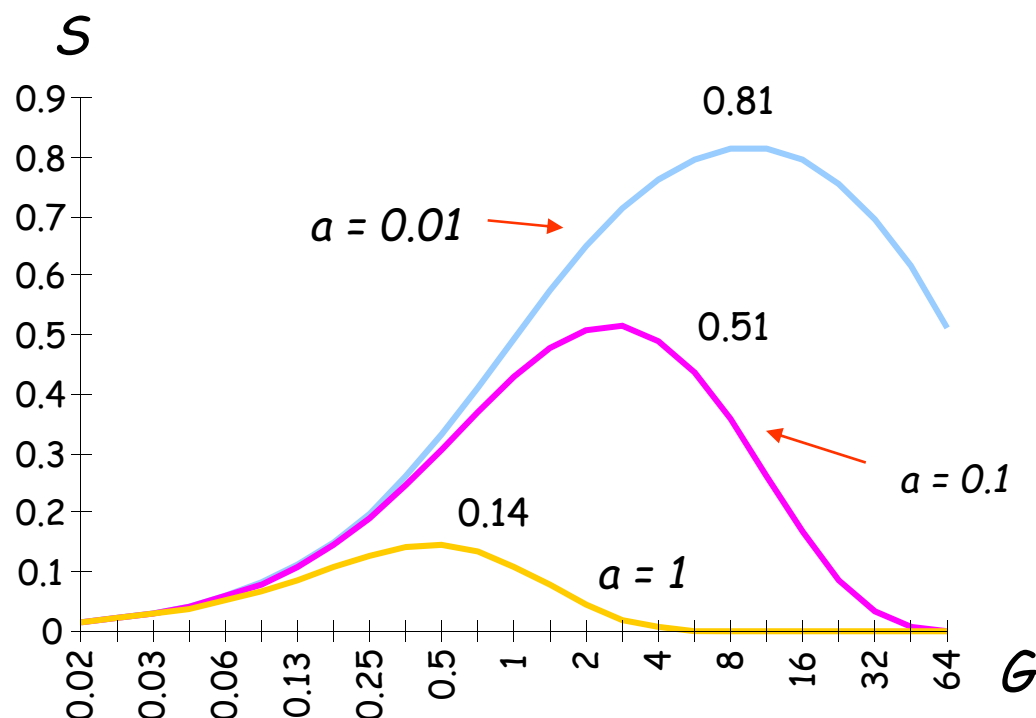


■ Prestazioni

- Migliori di Aloha e slotted Aloha per piccoli valori di a
- Peggiori di Aloha se $a > 1$



Prestazioni non-persistent CSMA



- Valori di throughput più alto rispetto a 1-persistent per piccoli valori di a
- Peggiori di Aloha se $a > 1$



CSMA with Collision Detection (CSMA/CD)

- **“Ascolta prima di parlare e mentre parli”**
 - Rivela le collisioni ed interrompe la trasmissione
 - Un nodo ascolta il canale prima di trasmettere
 - Dopo l'inizio della trasmissione il nodo continua ad ascoltare il canale per rivelare le collisioni
 - Se viene rivelata una collisione, tutti i nodi coinvolti interrompono la trasmissione e rischedulano dopo un intervallo di backoff
- Nel protocollo CSMA, una collisione comporta un periodo di inutilizzazione del canale uguale a al tempo di trasmissione di una frame
- Il protocollo CSMA-CD riduce la durata delle collisioni e quindi aumenta l'efficienza



Rivelazione di una collisione



- Nel caso peggiore i nodi coinvolti nella collisione le rivelano dopo un tempo $t = 2t_{prop}$
 - Minore del tempo di trasmissione di una frame

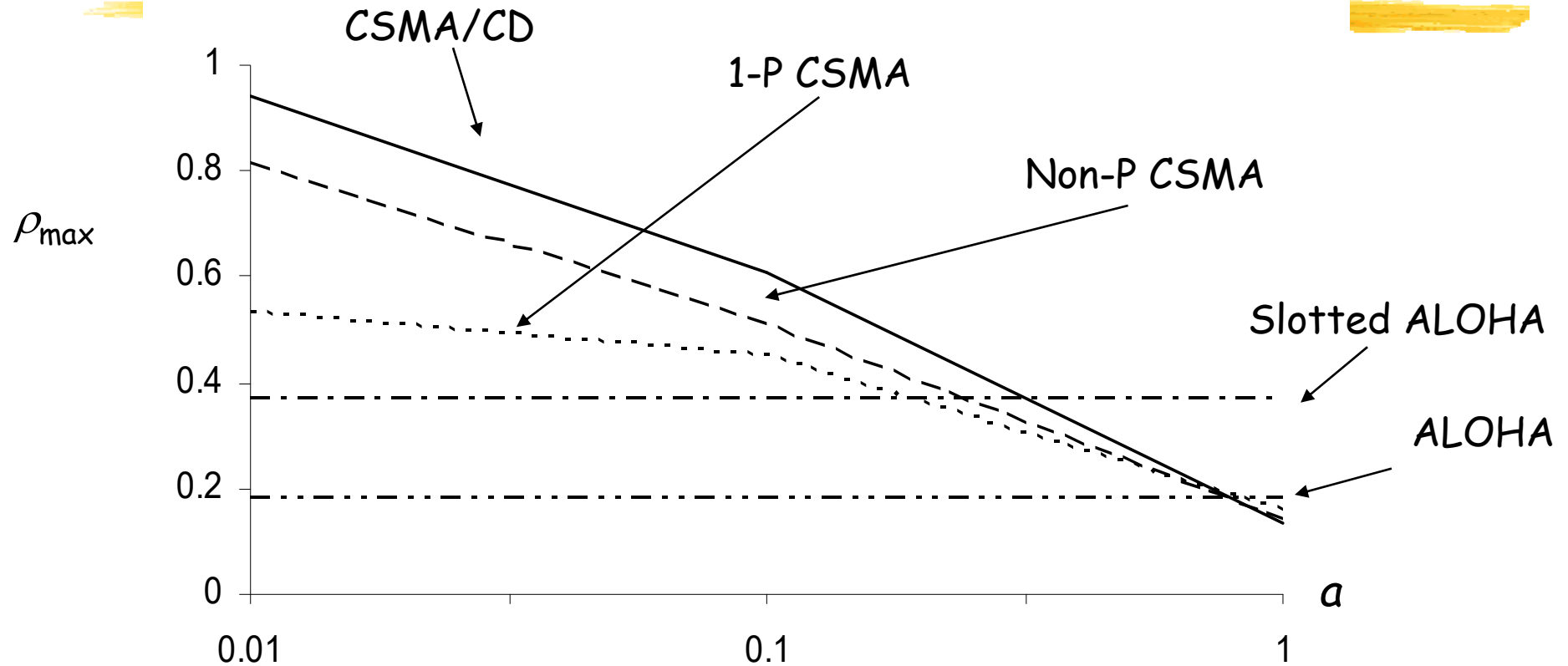


Ethernet

- Lo standard LAN Ethernet LAN è basato sul CSMA-CD
 - 1-persistent CSMA
 - $R = 10 \text{ Mbit/s}$
 - $t_{\text{prop}} = 51.2 \mu\text{s}$
 - 512 bit = 64 byte slot
 - distanza massima 2.5 km + 4 repeaters
- Truncated Binary Exponential Backoff
 - Dopo l'n-ma collisione, il tempo di backoff è scelto tra i valori $\{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$, dove $k = \min(n, 10)$



Confronto MAC random access



- For piccoli valori di a : CSMA-CD ha il throughput migliore
- For grandi valori di a : le prestazioni migliori sono di Aloha & slotted Aloha



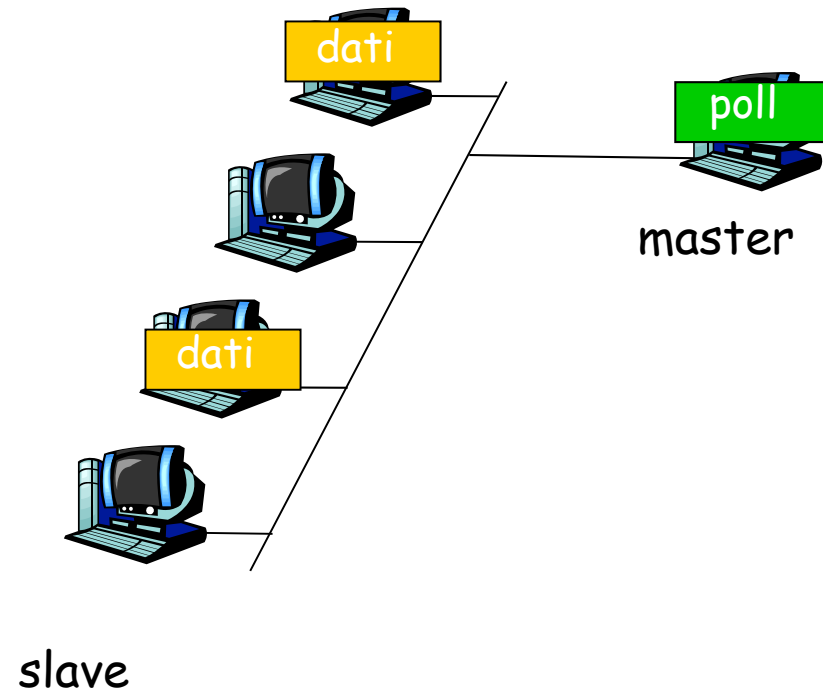
Protocolli MAC ad accesso controllato

- **Protocolli MAC a suddivisione del canale**
 - Condividono il canale equamente ed efficientemente con carichi elevati
 - Inefficienti con carichi non elevati
- **Protocolli MAC ad accesso casuale**
 - Efficienti con carichi non elevati: un singolo nodo può utilizzare interamente il canale
 - Carichi elevati: eccesso di collisioni
- **Protocolli ad accesso controllato**
 - Prendono il meglio dei due protocolli precedenti



Protocolli ad accesso controllato

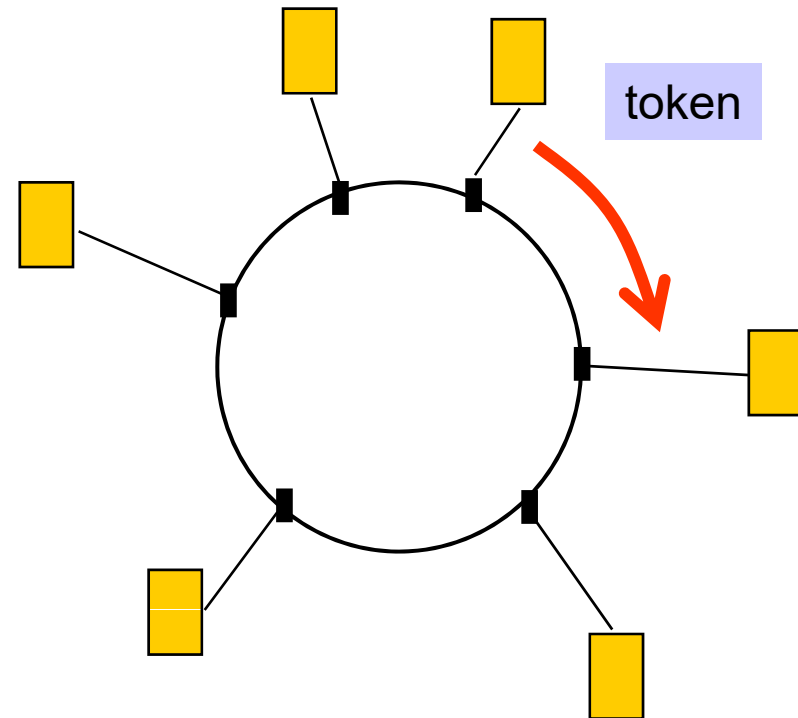
- **Protocollo polling**
- Un nodo principale sonda "a turno" gli altri.
- In particolare:
 - elimina le collisioni
 - elimina gli slot vuoti
 - ritardo di polling
 - se il nodo principale (master) si guasta, l'intero canale resta inattivo.





Protocolli ad accesso controllato

- **Protocollo token-passing**
- Un messaggio di controllo circola fra i nodi seguendo un ordine prefissato
- Messaggio di controllo (token)
- In particolare
 - decentralizzato
 - altamente efficiente
 - il guasto di un nodo può mettere fuori uso l'intero canale



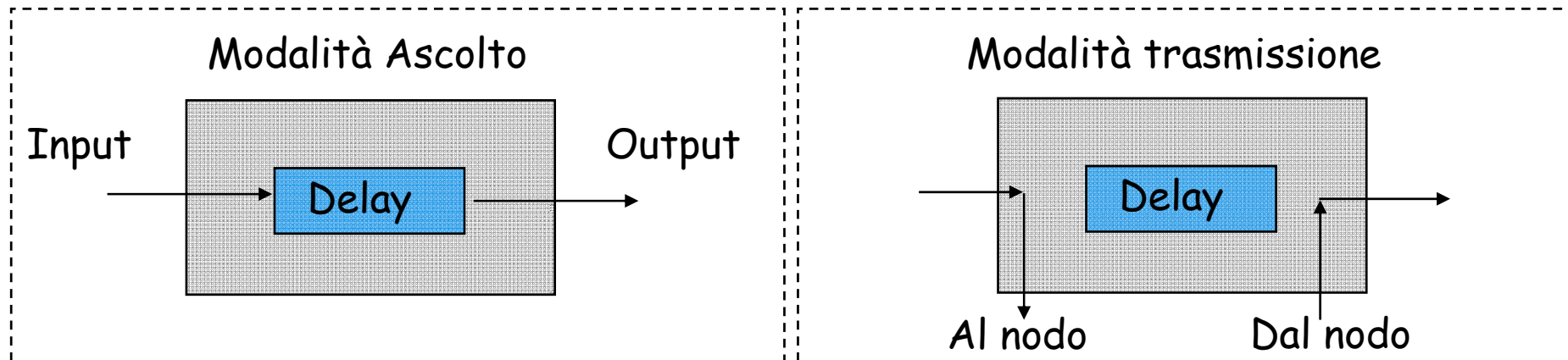


Application: Token-Passing Rings

■ Il flag delle frame può essere il token

■ Free token = 01111110

■ Busy token = 01111111



I nodi che sono pronti a trasmettere aspettano il token e cambiano il bit finale del flag per convertire il token da free a busy

Il nodo che ha il token trasmette, al termine della trasmissione reinserisce il free token

Metodi di reinserimento del token

■ Ring latency

- numero di bit che possono essere trasmessi simultaneamente sul ring

■ Multi-token operation

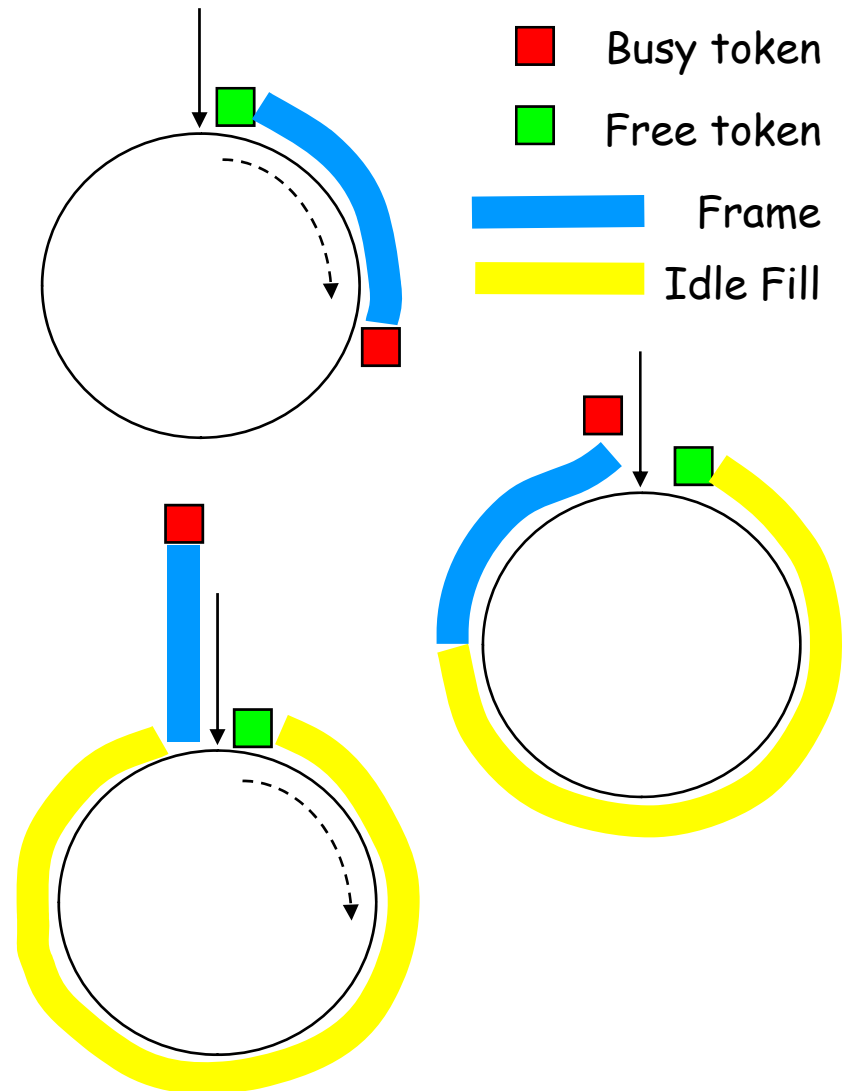
- Il Free token è trasmesso immediatamente dopo l'ultimo bit di una frame

■ Single-token operation

- Il Free token è inserito dopo che l'ultimo bit del busy token è ritornato al nodo origine
- Il tempo di trasmissione uguale almeno alla ring latency
- Se la frame è maggiore della ring latency, è equivalente al multi-token operation

■ Single-Frame operation

- Il Free token è inserito dopo che il nodo emittente ha ricevuto l'ultimo bit della sua frame
- E' equivalent ad aggiungere alla frame un trailer uguale alla ring latency





Throughput del protocollo Token Ring

■ Definizioni

- τ : tempo richiesto ad un bit per circolare nel ring
- T : tempo di trasmissione di una frame

■ Multi-token operation

- Assumiamo che la rete è caricata al massimo, tutti gli M nodi trasmettono una frame dopo aver ricevuto il token
- Equivale ad un protocollo di tipo polling con un tempo di servizio limitato a X

$$\rho_{\max} = \frac{MT}{\tau + MT} = \frac{1}{1 + \tau / MT} = \frac{1}{1 + a / M}$$

$$a = \frac{\tau}{T} \quad \text{è la ring latency normalizzata}$$



Throughput del protocollo Token Ring

■ Single-frame operation

- Il tempo di trasmissione di una frame è uguale al massimo tra T e τ

$$\rho_{\max} = \frac{MT}{\tau + M \max(T, \tau)} = \frac{1}{\frac{a}{M} + \max(1, a)}$$

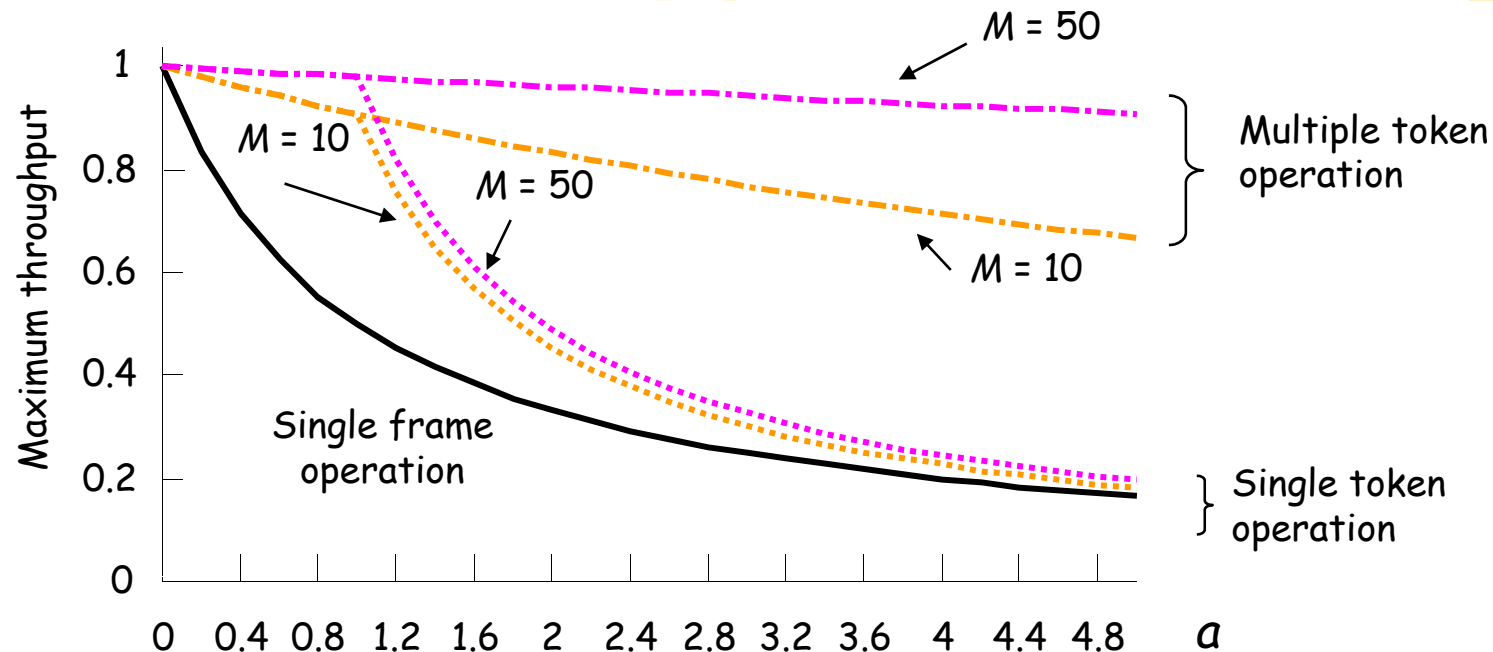
■ Single-token operation

- Il tempo di trasmissione di una frame è uguale a $T + \tau$

$$\rho_{\max} = \frac{MT}{\tau + M(T + \tau)} = \frac{1}{1 + a(1 + \frac{1}{M})}$$



Throughput del protocollo Token Ring



- Se $a \ll 1$: è accettabile qualsiasi strategia di reinserimento del token
- Se $a \approx 1$: è accettabile la modalità single token operation
- Se $a > 1$: è necessaria la modalità multitoken operation



Protocolli MAC: riepilogo

- **Cosa si può fare con un canale condiviso ?**
 - Suddivisione del canale per: tempo, frequenza, codice.
 - TDM, FDM
 - Accesso casuale
 - ALOHA, S-ALOHA, CSMA, CSMA/CD
 - Rilevamento della portante: facile in alcune tecnologie (cablate), difficile in altre (wireless)
 - CSMA/CD usato in Ethernet
 - CSMA/CA usato in 802.11
 - Ad accesso controllato
 - Polling con un nodo principale; a passaggio di token
 - Bluetooth, FDDI, IBM Token Ring