

# Controllo delle reti di comunicazione

Massimo Giussani

La maggior parte delle reti di telecomunicazioni, e in particolare delle reti di calcolatori, fa uso di un canale di trasmissione condiviso in cui l'accesso deve essere regolato da un opportuno meccanismo di controllo al fine di ridistribuire in maniera efficiente le risorse ed

**Medium Access Control (MAC) è il nome utilizzato per identificare i vari metodi di assegnazione del canale trasmissivo nelle reti di comunicazione**

evitare o gestire eventuali collisioni.

Il controllo dell'accesso al mezzo trasmissivo è in generale appannaggio delle reti di tipo broadcast, in particolare con topologie a bus, ad anello, a stella tramite hub e delle reti 'ad hoc' senza fili;

però fanno eccezione le reti commutate che implementano collegamenti punto-punto full-duplex per mezzo di commutatori e router. La comunicazione punto-punto, che è generalmente priva dei problemi di contesa, può tuttavia richiedere questo tipo di controllo per gestire il flusso nelle comunicazioni half-duplex.

I protocolli che si occupano di gestire l'accesso al mezzo possono agire allocando le risorse necessarie alla creazione di un canale fisico o logico oppure rilevando o eliminando le interferenze dovute alla trasmissione simultanea dei pacchetti di dati.

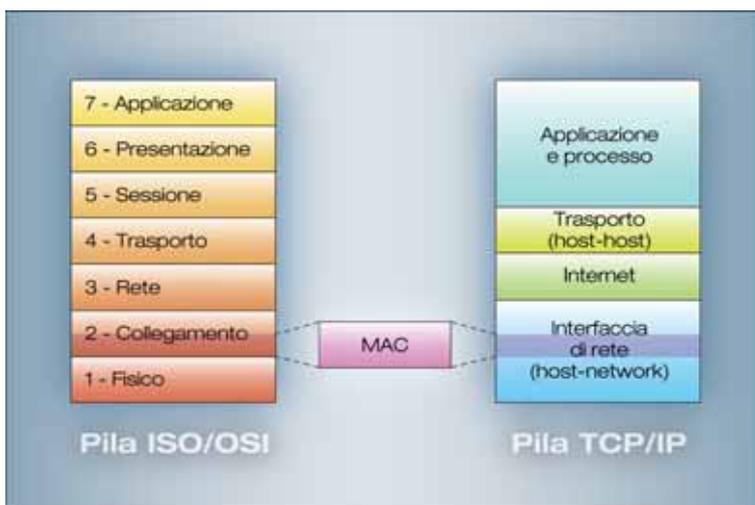
## Il sottostrato MAC

I vari metodi di assegnazione del canale di comunicazione vanno sotto il nome comune di Medium Access Control, o MAC, e possono essere implementati a diversi livelli di astrazione nel modello di riferimento ISO-OSI. Ad esempio, i meccanismi di multiplexazione adottati dalle tecniche di ripartizione del canale agiscono tipicamente a livello dello strato fisico, mentre le tecniche di accesso casuale e con prenotazione operano a un livello di astrazione superiore, in un sottostrato del livello di collegamento dati che prende appunto il nome di sottostrato MAC. Lo scopo è di interfacciarsi con lo strato fisico in maniera tale che il canale appaia allo strato successivo (nella pila OSI il sottostrato di collegamento logico LLC) come un mezzo di trasmissione dedicato e full-duplex. Uno dei compiti di questo livello di astrazione è gestire una forma di indirizzamento per l'identificazione dei nodi.

Nella pila di protocolli TCP/IP la suddivisione dei compiti di accesso al mezzo non è altrettanto ben demarcata e viene svolta all'interno dello strato di interfaccia di rete ('host to network'). Per fornire una panoramica completa accenneremo anche a tecniche di accesso per ripartizione del canale anche se, nell'ottica del modello OSI, la loro implementazione è più propriamente ascrivibile allo strato fisico.

## Le tipologie di accesso

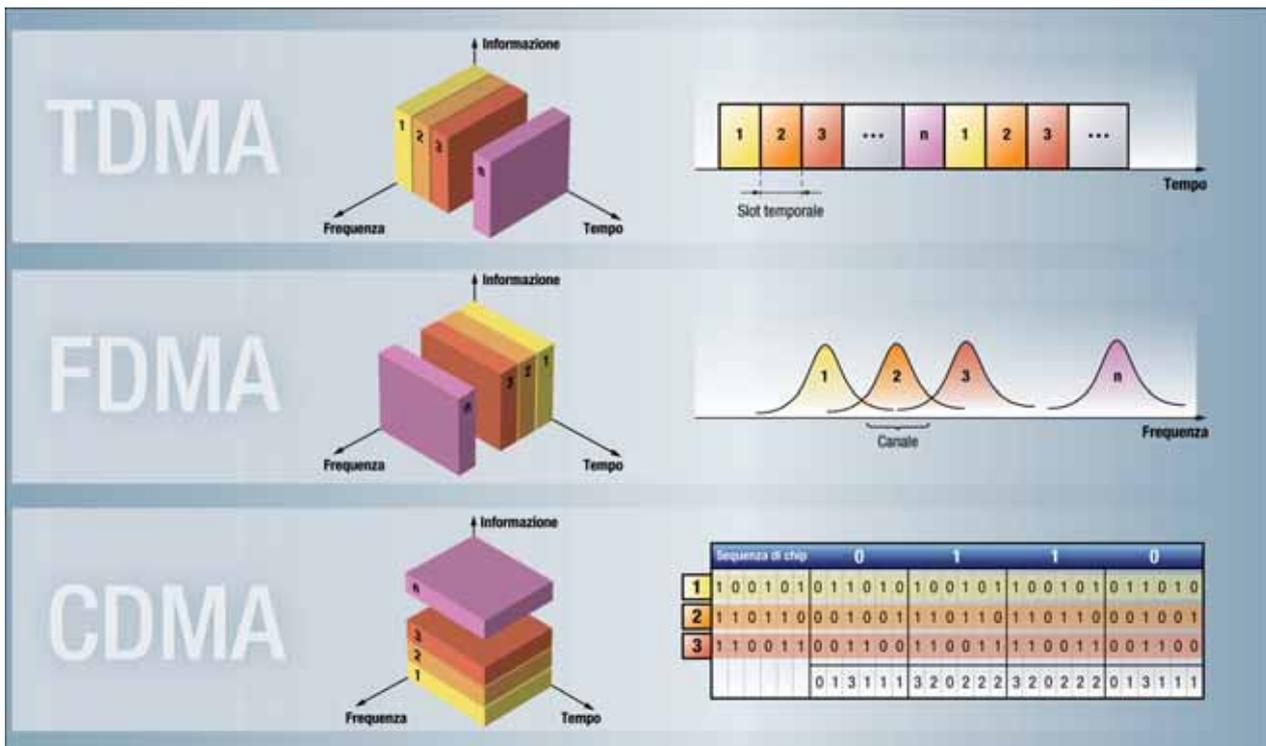
I meccanismi di accesso a un canale condiviso da più utenti si possono classificare in vari modi. Innanzitutto l'allocatione può essere statica o dinamica. Nel primo caso la suddivisione viene decisa in anticipo e non varia con il mutare delle condizioni di traffico della rete; ogni nodo dispone di una quota assegnata di risorse.



**Figura 1 - Posizionamento dello strato MAC nelle pile di riferimento ISO-OSI e TCP/IP**

se che limita le prestazioni rispetto alle potenzialità complessive del canale e viene sprecata inutilmente in caso di inattività. L'allocazione dinamica cerca di porre un rimedio a queste problematiche, assegnando le risorse in base alle necessità di trasmissione dei nodi richiedenti ed evitando ai nodi inattivi di occupare inutilmente il canale. L'allocazione dinamica può essere di tipo centralizzato o distribuito a seconda che esista un'entità precisa (ad esempio un nodo master che gestisce l'arbitraggio su un bus) che stabilisca chi deve trasmettere e quando, oppure che la decisione ven-

tuno dominio dimensionale. È possibile assegnare intervalli temporali (nell'accesso multiplo a divisione di tempo, Tdma), bande di frequenza (nelle tecniche a divisione di frequenza o lunghezza d'onda, Fdma o Wdma) o anche codifiche numeriche (nell'accesso per divisione di codice, Cdma). L'idea di base è sempre la stessa: sovrapporre i segnali nel dominio selezionato, inviare il segnale risultante sul canale e lasciare che le stazioni afferenti isolino la porzione di interesse con un opportuno meccanismo di 'proiezione' nel particolare sottospazio assegnato loro. Questo meccanismo



**Figura 2 - Schematizzazione delle principali tecniche di accesso al mezzo per partizionamento del canale**

ga presa autonomamente dai singoli nodi, eventualmente dopo aver valutato lo stato di occupazione del canale o l'esito della precedente trasmissione. In entrambi i casi vengono impiegati algoritmi specifici per cercare di garantire un'allocazione equa o comunque tale da minimizzare il verificarsi di congestioni della rete.

Per ragioni espositive, raggrupperemo qui le metodologie di accesso al mezzo in base al meccanismo di fruizione del canale, distinguendo tre categorie: tecniche di ripartizione del canale, tecniche di prenotazione o assegnamento di turni e tecniche di accesso casuale.

**Accesso per partizionamento del canale**

Le metodologie di partizionamento del canale si appoggiano alle tecniche di moltiplicazione, solitamente collocabili nello strato fisico della pila OSI. La filosofia di questo tipo di allocazione è semplice: a ogni stazione viene assegnata, in maniera statica o dinamica, una porzione di canale in un oppor-

tuno semplice finestra temporale nel Tdma, un filtro passa banda nel Fdma o un algoritmo di correlazione nel Cdma. La figura 2 mostra simbolicamente il modo in cui ciascun metodo ripartisce solo una delle variabili considerate, non imponendo vincoli sulle altre.

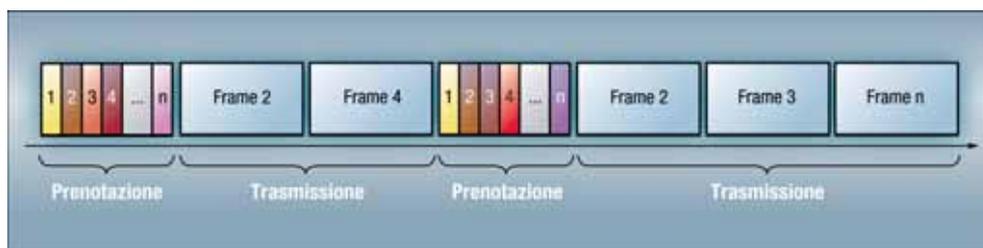
In particolare, nel caso dell'accesso a divisione di codice, la ripartizione in base alla codifica dei singoli bit fa sì che ciascuna stazione possa sfruttare per tutto il tempo che ritiene opportuno l'intera banda del canale. Questo fatto permette di utilizzare tecniche di modulazione a dispersione di spettro che offrono il bonus aggiuntivo di una superiore robustezza e segretezza delle comunicazioni.

**Accesso a turno o prenotazione**

Una diversa metodologia di accesso al canale prevede l'assegnazione di tutte le risorse a una singola stazione in seguito all'assegnamento di un turno da parte di un'entità di controllo centralizzata o di un meccanismo di prenotazione di-

istribuito. Il 'polling' è una tecnica di controllo centralizzato utilizzata da numerosi bus di campo di tipo master-slave: qui un'unità master gestisce il canale interrogando le varie stazioni slave e assegnando il canale a chi ne fa richiesta. Lo svantaggio di questo approccio è che quando il numero delle stazioni cresce, una porzione considerevole di tempo viene impegnata per la sola fase di interrogazione.

Una variante distribuita più efficiente utilizza un meccanismo di prenotazione a mappa di bit. La comunicazione in questo caso è preceduta dalla creazione sul canale di un frame contenente una sequenza di bit in numero pari a quello delle stazioni. A ogni stazione è assegnato un particolare bit, corrispondente a un preciso slot temporale nel frame; le stazioni che hanno necessità di impegnare il canale impongono il valore logico 1 nel corrispondente slot. Quando il frame è stato completato ogni stazione è in grado di sapere quali sono le contendenti al canale e la comunicazione inizia nell'ordine con cui sono stati assegnati i bit. Quando l'ultima stazione che si era prenotata ha completato la trasmissione si ripete il processo di prenotazione. Questa modalità di accesso al mezzo è schematizzata nella figura 3.



**Figura 3 - Tecnica di prenotazione a mappa di bit: l'accesso al mezzo viene concesso in un ordine prestabilito a tutte le stazioni che hanno fatto richiesta di poter trasmettere**

Il meccanismo può essere ulteriormente affinato per adattarlo alle reti con centinaia o migliaia di nodi. In questo caso una semplice mappa di bit determinerebbe un frame inefficiente da gestire. In questo caso si può usare una codifica binaria del numero delle stazioni e sfruttare l'ordinamento della codifica per stabilire un meccanismo di priorità basato sulla dominanza dei bit più significativi. Quando una stazione rileva che la comunicazione è stata richiesta da un'antagonista con numerazione più alta, rinuncia alla trasmissione e attende il successivo intervallo di prenotazione. Questa tecnica viene ripresa nell'assegnazione Csm/CR (Carrier Sense Multiple Access with Collision Resolution) utilizzata da certi bus di campo nel settore automobilistico.

Un altro modo di risolvere i conflitti di accesso al mezzo, che trova ampia applicazione nelle reti ad anello, consiste nel far passare da una stazione all'altra una particolare configurazione di bit, che prende il nome di token (gettone). Una stazione che voglia impegnare il canale deve attendere di ricevere il token, far sì che non sia più presente in rete e solo allora procedere all'invio dei propri dati. Al termine della tra-

missione il token viene rigenerato e reimmesso in rete, a disposizione di chi ne abbia bisogno.

### Accesso con rilevamento della portante

I protocolli di accesso al mezzo che hanno avuto maggior diffusione tra le reti broadcast, e in particolare nelle LAN e nelle MAN, offrono dei meccanismi per rimediare o minimizzare gli effetti delle collisioni, ossia del degrado dell'informazione trasmessa dovuto alla sovrapposizione, anche solo parziale, di frame inviati da stazioni in competizione.

Il precursore dei protocolli a contesa è il sistema Aloha, messo a punto da Norman Abramson dell'Università delle Hawaii. Il metodo è tanto semplice quanto brutale: ogni stazione trasmette quando lo ritiene opportuno e rimane in ascolto sul canale per tutto il tempo necessario ad assicurarsi che il proprio frame dati si sia propagato fino al nodo più lontano senza che altri lo abbiano disturbato. Se si sono verificate interferenze, la stazione attende un tempo casuale e poi riprende la trasmissione. Una versione più efficiente prevede una sincronizzazione degli intervalli di trasmissione e va sotto il nome di Aloha slotted; la maggior efficienza va imputata al

fatto che si vengono a formare delle zone franche in cui il canale non può essere disturbato.

Per ridurre la probabilità di collisione tra frame sono stati sviluppati dei protocolli a rilevamento di portante (Csm, Carrier Sense Multiple Access) nei quali i terminali, prima di impegnare

il canale, stanno in ascolto per verificare la presenza di una trasmissione pregressa. Dato che i segnali si propagano con una velocità finita è ancora possibile che una stazione inizi a trasmettere mentre un altro frame si sta ancora propagando nel mezzo fisico.

In caso di collisione le stazioni coinvolte ripetono la trasmissione dopo un intervallo di tempo casuale. In alcune varianti anche il controllo del canale e la sua occupazione nel caso appaia libero hanno luogo dopo un intervallo di tempo casuale; questo aiuta a distribuire il traffico e a ridurre le probabilità di congestione, di fatto aumentando la capacità di trasporto della rete.

### Accesso con rilevamento delle collisioni

Un ulteriore progresso consiste nel sospendere la trasmissione del proprio frame non appena ci si renda conto del verificarsi di una collisione in quelli che sono noti come protocolli Csm con rilevamento delle collisioni (Csm/CD, Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). È necessario che ogni stazione rimanga in ascolto sul canale

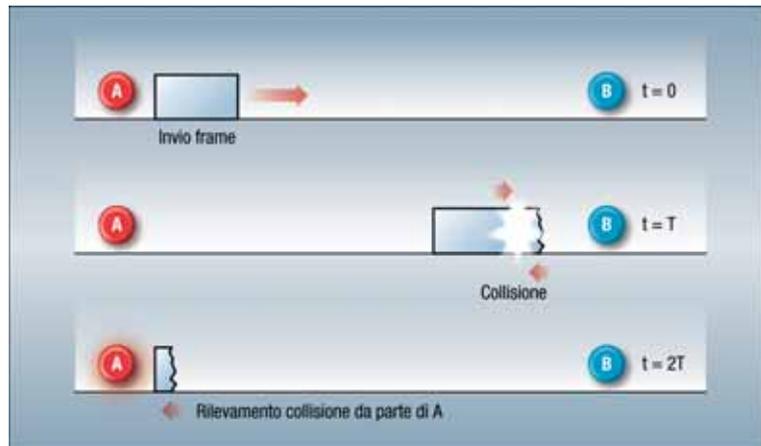
per un tempo pari a due volte il tempo di percorrenza del diametro della rete; questo perché nell'evenienza peggiore la collisione può aver luogo all'estremo opposto della rete, un istante prima che venga terminata la ricezione del frame inviato (figura 4).

Il rilevamento della collisione è delegato a un apposito circuito che confronta i livelli logici trasmessi con quelli ricevuti: è necessario che i segnali a livello fisico utilizzino una codifica tale da permettere il rilevamento di qualsiasi sovrapposizione di stati logici. Nelle reti Ethernet che fanno uso di Csmma/CD viene usata una codifica di tipo Manchester o Manchester differenziale, che permette anche di risolvere i problemi di sincronizzazione e offre una maggior immunità ai disturbi. Sebbene storicamente importante, il protocollo Csmma/CD è presente sulle moderne reti Ethernet principalmente per motivi di compatibilità con gli hub, non essendo richiesto dalle reti commutate che risolvono il problema delle collisioni creando delle connessioni punto-punto full-duplex per mezzo degli switch.

### Accesso con prevenzione delle collisioni

Il successo riscosso da Csmma/CD nelle reti cablate non è stato esportabile alle controparti senza fili. Il problema delle reti wireless è che le singole stazioni non sono sempre in grado di rilevare e raggiungere tutti i nodi che compongono la struttura. Alcuni di questi, infatti, possono trovarsi al di là della portata massima di ricezione o trasmissione. Questo fatto comporta in particolare l'insorgenza di due nuovi problemi relativi all'accesso al mezzo.

Il primo, che va sotto il nome di 'problema della stazione nascosta', si verifica quando la stazione trasmittente (che



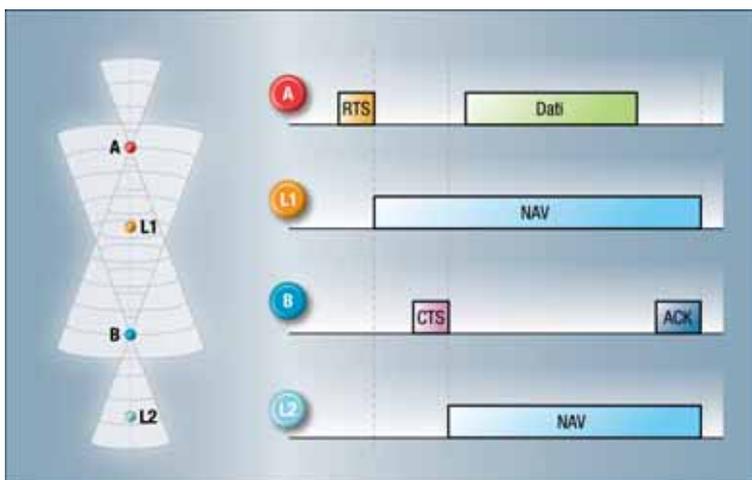
**Figura 4 - Rilevamento delle collisioni nel diffuso protocollo Csmma/CD che richiede che il trasmettitore resti in ascolto di eventuali interferenze per un tempo pari al doppio del tempo di propagazione fino al nodo più lontano della rete**

chiameremo A) non è in grado di percepire l'occupazione del canale da parte di una stazione (L2) comunque accessibile al destinatario (B) della sua trasmissione. Se la stazione L2 accede al mezzo mentre è in corso il trasferimento dei dati tra A e B, si verifica una collisione che invalida la comunicazione.

Il secondo problema, detto 'della stazione esposta', si verifica quando una stazione trasmittente rileva la presenza di una stazione attiva senza sapere che non è in grado di disturbare la comunicazione con l'interlocutore prescelto quando questi sia fuori della sua portata. In questo caso una stazione può rinunciare a trasmettere quando avrebbe invece l'opportunità per farlo. Per risolvere questi problemi è stata realizzata una variante del protocollo di accesso multiplo, denominato Csmma/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), che prevede lo scambio di brevi frame di controllo tra stazione trasmittente e ricevente allo scopo

di riservare il canale e di palesare l'intento di ricevere alle stazioni nei pressi del destinatario ma fuori dalla portata del mittente.

La figura 5 schematizza lo scambio di frame tra le stazioni A e B in presenza di altri nodi: la stazione A invia un frame RTS (Ready To Send) indirizzato a B che replica con un CTS (Clear To Send). Le stazioni come L1, entro la portata di A, cedono il canale dopo aver ricevuto l'RTS; le stazioni fuori portata, ma che potrebbero disturbare la ricezione di B, come L2, cedono il canale quando ricevono il CTS. Entrambe possono riprendere il possesso del mezzo trasmissivo quando i dati sono stati ricevuti, eventualmente segnalato dal frame di ACK (che sta per 'acknowledgement') di B. Opportuni meccanismi di temporizzazione preven- gono la monopolizzazione del canale da parte di pochi nodi. ■



**Figura 5 - La stazione L2, che non è in grado di rilevare il pacchetto RTS inviato da A, viene inibita dal pacchetto CTS ritornato da B**