

La puntualità è tutto

Fonte: www.deviantart.com

Massimo Giussani

I bus di comunicazione impiegati nelle applicazioni industriali si distinguono dalle loro controparti a livello di ufficio in particolare per i requisiti di robustezza ed elevata immunità alle interferenze, nonché per le modalità e la qualità della trasmissione dati. In particolare, nelle applicazioni più vicine al campo si tende a privilegiare lo scambio frequente di piccole quantità di dati, soggette a ben precisi vincoli temporali e di rispetto delle priorità. Per soddisfare queste esigenze, ben diverse dalla necessità

delle reti di ufficio di trasferire grandi moli di dati ad alta velocità, sono state sviluppate numerose tipologie di bus di campo, spesso di tipo proprietario e legate a specifiche soluzioni di automazione e controllo.

CAN, Controlnet, Interbus, Profibus e Worldfip, per nominarne solo alcuni, si sono guadagnati un proprio spazio nel variegato e frammentato panorama dell'automazione industriale. Con

il passare del tempo sono emerse nuove tendenze: da un lato il desiderio di una maggiore interoperabilità tra gli standard, per svincolarsi dal costoso 'vendor lock-in'; dall'altro l'incremento di funzionalità dei moderni sensori e attuatori, che ha imposto nuove esigenze in termini di banda passante e velocità di trasferimento anche ai bus di campo. Gli standard aperti si sono moltiplicati, spesso basandosi su varian-

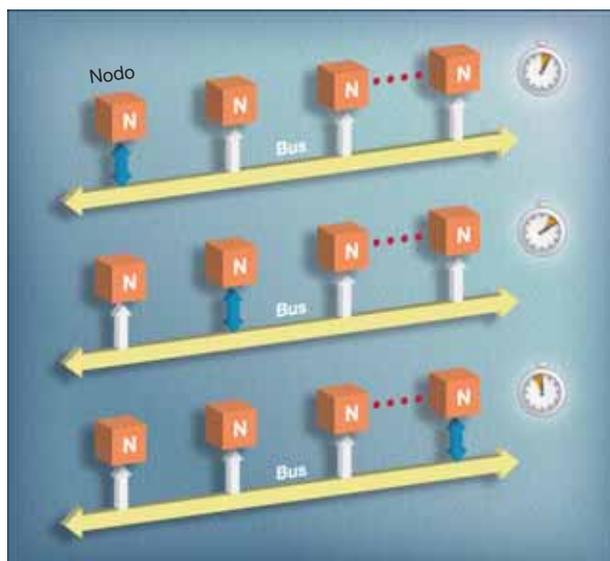
ti di Ethernet opportunamente modificate per soddisfare i requisiti di robustezza e determinismo delle applicazioni industriali, affiancandosi se non addirittura inglobando i più affermati protocolli proprietari.

Qualche definizione

In linea di massima una rete di comunicazione si dice 'deterministica' quando permette di conoscere con assoluta certezza il massimo ritardo con cui vengono scambiate le informazioni. Una definizione più circostanziata deve includere i concetti di 'latenza' e di 'jitter'. Con il primo termine si intende, in genere, il tempo che intercorre tra la trasmissione e la ricezione di un pacchetto dati da un nodo a un altro della rete. Questo tempo è influenzato da una serie di circostanze legate all'elaborazione delle informazioni, alla loro preparazione per la trasmissione sul canale e all'effettiva propagazione sullo stesso. Nelle reti che utilizzano protocolli implementati anche in software si ha innanzitutto un 'ritardo di elaborazione', legato all'esecuzione delle istruzioni necessarie all'incapsulamento dei dati. Tale ritardo dipende in pratica dalla frequenza e dalla CPU. I bus seriali sono poi soggetti a un 'ritardo di serializzazione', ossia il tempo che intercorre tra gli invii del primo e dell'ultimo bit del messaggio binario. Questo tempo è proporzionale al rapporto tra la dimensione del pacchetto dati e la velocità di trasmissione. Il 'ritardo di propagazione' è invece il tempo che intercorre tra la trasmissione di un bit da parte del nodo trasmittente e la sua ricezione da parte del destinatario. È sostanzialmente il tem-

**Caratteristica
imprescindibile
in molte applicazioni
industriali,
il determinismo
può essere
implementato
in vari modi**

po necessario per percorrere alla velocità della luce la distanza tra i nodi. In linea di massima è facile maggiorare tutti questi ritardi, una volta che si conosca l'architettura di rete. Esiste però un altro tipo di ritardo, che è casuale, determinato dalle modalità di accesso al mezzo trasmissivo e d'instrada-



Nell'accesso multiplo a divisione di tempo, a ogni nodo della rete viene assegnato un intervallo di trasmissione ben preciso

mento dei dati all'interno della rete. Nel termine 'ritardo di accodamento' si fanno solitamente confluire tutti i ritardi legati al traffico dati presente sul mezzo. Traffico che determina un'attesa prima che il messaggio possa essere inviato sul mezzo e, nelle reti che offrono più percorsi tra due nodi, può comportare l'instradamento lungo cammini di diversa lunghezza. Il ritardo di accodamento è la fonte principale di jitter, ovvero della variabilità nel ritardo complessivo tra la trasmissione dal nodo di origine e la ricezione da parte dei nodi cui è destinata la comunicazione. Consideriamo un messaggio trasmesso in 'multicast' da un dato nodo della rete all'istante t_0 ; questo messaggio verrà ricevuto da tutti gli altri nodi in istanti successivi compresi tra il valore $t_0 + t_{\min}$ e il valore $t_0 + t_{\max}$. Il jitter è definito come la differenza $t_{\max} - t_{\min}$ e viene generalmente espresso in millisecondi (altre volte viene fornito come variazione percentuale della latenza media).

Determinismi... al plurale

È possibile definire diversi tipi di determinismo di una rete di comunicazione. Vi è innanzitutto un determinismo nell'ordine di invio e ricezione dei messaggi, il cosiddetto 'determinismo di ordinamento'. Il determinismo all'invio richiede che i messaggi vengano trasmessi in un ordine predefinito e ripetibile, a parità di condizioni iniziali. In un bus condiviso questo comportamento è in genere associato a un meccanismo non stocastico di risoluzione della contesa. Il determinismo in ricezione riguarda il mantenimento dell'ordine temporale

d'invio nella sequenza dei messaggi ricevuti. Una forma più restrittiva di determinismo è rappresentata dal 'determinismo temporale', che, al rispetto delle due condizioni sopra citate, aggiunge un vincolo sul minimo e massimo ritardo di comunicazione. In una rete temporalmente deterministica (o, in breve, deterministica) i ritardi t_{\min} e t_{\max} che caratterizzano il jitter sono noti a priori e costituiscono una caratteristica del canale. Questo significa che la rete risponde a un qualsiasi evento entro un intervallo di tempo ben delimitato. Si tratta di una qualità fondamentale per garantire la sincronizzazione nel controllo di molti azionamenti industriali. Si pensi, ad esempio, al pilotaggio coordinato dei motori di una macchina utensile: le posizioni dei diversi assi devono essere aggiornate in un preciso ordine temporale, né troppo in ritardo, né troppo in anticipo, pena l'errato posizionamento dell'utensile.

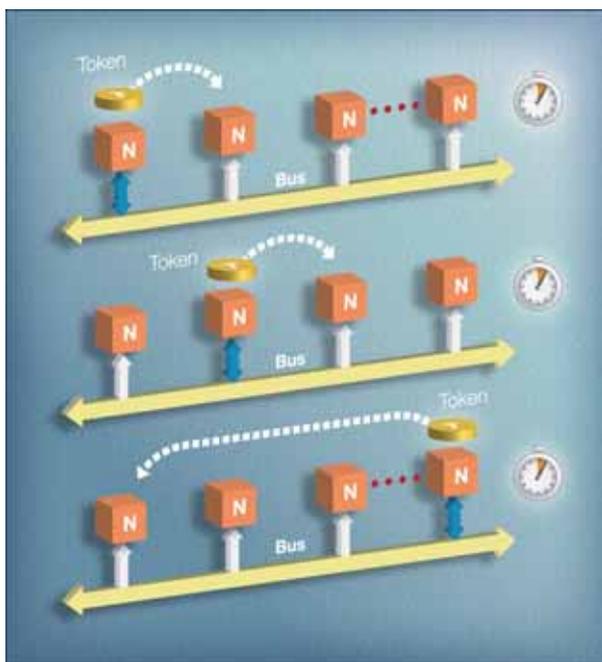
Esiste un'altra forma di determinismo che è sostanzialmente indipendente da quello temporale e che è il 'determinismo di percorso'. Questa caratteristica fa riferimento all'univocità del cammino tra il nodo di origine e quello di destinazione. Una rete con percorsi deterministici può non essere temporalmente deterministica e, viceversa, una rete che offre diverse possibilità d'instradamento, che contribuiscono in genere a peggiorare il jitter, può essere (temporalmente) deterministica. Il determinismo non va confuso con la capacità, legata al contesto applicativo, di fornire una risposta 'in tempo reale'. Una rete può benissimo essere deterministica, ma risultare troppo lenta per consentire lo svolgimento in tempo reale di determinate funzioni. I bus di campo 'storici', ad esempio, sono per la maggior parte deterministici; data però l'esigua larghezza di banda che li contraddistinguono, non sono in grado di gestire funzionalità computazionalmente intensive, come può essere ad esempio la visione artificiale, in tempo reale.

Assicurare il determinismo

Il metodo forse più semplice per assicurare il determinismo temporale in un bus di campo consiste nel sincronizzare la trasmissione delle informazioni per mezzo di un segnale di clock condiviso. La modalità di accesso per divisione di tempo (Tdma-Time division multiple access) consente una sincronizzazione della rete a livello globale, assegnando a ciascun nodo uno slot temporale entro il quale potrà trasmettere i dati senza dover contendere il mezzo e usufruendo di tutta la banda disponibile. L'accesso al mezzo per mezzo di Tdma è molto diffuso, specialmente nei bus orientati alla sicurezza. Fanno uso di questo meccanismo i bus 'time triggered', come TT-Can, TTP/C e persino la stessa Ethernet, che può utilizzare questo sistema in maniera da aggirare l'aleatorietà della contesa a rilevamento delle collisioni di Csm/CD.

Nelle reti ad accesso distribuito si possono adottare dei meccanismi di arbitraggio deterministico, ad esempio mediante

il passaggio di 'token'. In ogni istante un solo nodo è in possesso del token, che gli permette di accedere in trasmissione al canale; una volta esaurito il tempo a disposizione, il 'gettone' viene passato al nodo successivo secondo un ordine prestabilito dal protocollo. Nella sua forma più semplice il passaggio avviene seguendo un percorso ad anello (fisico o logico): se si fa in modo che il tempo di possesso abbia limiti inferiore e superiore ben determinati, come avviene nei protocolli 'timed-token', si ottiene un'equa distribuzione del canale, in maniera del tutto simile all'accesso a divisione di



Nei protocolli di tipo 'timed-token' i nodi possono comunicare per un tempo predeterminato solo quando ricevono il token

tempo. Profibus e leee token bus adottano questo tipo di approccio. Il determinismo può essere assicurato anche da una modalità di tipo master-slave, in cui un nodo speciale (master) gestisce l'accesso al mezzo da parte degli altri nodi (slave). In questo caso, il determinismo è una 'questione locale', sostanzialmente gestibile attraverso la pianificazione all'interno del dispositivo master. Questo approccio ha lo svantaggio di introdurre un elemento sensibile di guasto, in quanto in caso di danni al master viene compromessa l'intera rete. È anche possibile realizzare topologie con più master, che si contendono il controllo tramite passaggio di token. Effetto collaterale dell'approccio master-slave è che parte della banda viene sprecata per i messaggi di controllo con cui il master fornisce il diritto a occupare il canale. Le comunicazioni sono infatti di tipo 'broadcast': il master trasmette a tutti i nodi un messaggio contenente l'identificativo del nodo al quale spetta il canale ed è possibile iniziare la trasmissione solo dopo che questo messaggio di controllo è stato completamente ricevuto e decodificato. Tra i protocolli che fanno uso di questo meccanismo citiamo Ethernet

Powerlink (EPL) e Flexible time-triggered Ethernet (Ftte). Nei vari metodi illustrati il determinismo è subordinato a uno stretto controllo della rete, e questo parrebbe escludere la possibilità di trasmissioni estemporanee, come quelle legate al verificarsi di eventi specifici. In realtà, è possibile ritagliare uno spazio alle comunicazioni basate sugli eventi anche in un sistema deterministico, ad esempio assegnando slot temporali o turni di accesso al canale espressamente pensati per questo scopo. Se l'ampiezza di banda è sufficientemente elevata, il traffico aciclico può coesistere con quello ciclico senza compromettere il determinismo della rete.

Una Babele di protocolli

Un esempio estremo e al contempo semplice di comunicazione deterministica è rappresentato dal protocollo bus AS-i (Actuator sensor interface), che utilizza connessioni di tipo 'multidrop', realizzate per mezzo di opportune prese vampiro su una piattina bifilare. Il sistema adotta un meccanismo di tipo master-slave con interrogazione dei dispositivi connessi a intervalli periodici. Una rete a pieno carico (un master e 31 slave) comporta una latenza di 5 µs circa, più che sufficiente alle esigenze di molti controlli industriali. Anche Sercos (Serial realtime communication system), un'interfaccia aperta ampiamente utilizzata per controllare i servoazionamenti nelle macchine utensili multiasse, utilizza un approccio di tipo master-slave, questa volta con una topologia ad anello (con un massimo di 255 slave).

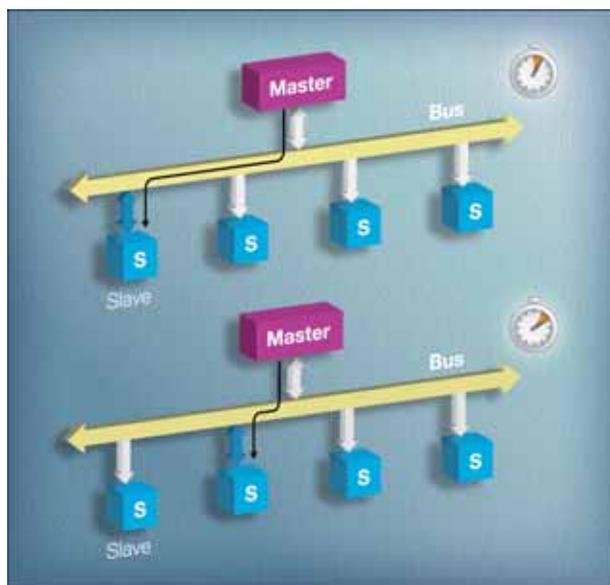
La totale assenza di collisioni sul mezzo e l'assegnazione degli slot temporali da parte del master consentono a Sercos di controllare in maniera deterministica e in tempo reale fino a 40 assi con un tempo di ciclo di 1 ms e un jitter massimo di 1 s. I dati di configurazione, diagnostica e i valori dei parametri controllati sono inviati su un canale di servizio per le comunicazioni acicliche.

Originariamente sviluppato da Phoenix Contact, Interbus utilizza un approccio master-slave con 'polling' ciclico su una topologia ad anello che, a differenza di altre soluzioni, fa ricorso a un solo cavo (doppino intrecciato o fibra ottica) per le linee di andata e ritorno. Worldfip (Field instrumentation protocol) adotta un modello di comunicazione di tipo 'publisher-subscriber', mediato da un distributore che funge da arbitro del bus e si occupa di far rispettare i vincoli temporali del sistema. Il bus può essere configurato in modo da operare in modalità ciclica o periodica, fornendo così un mezzo deterministico per comunicare i valori delle variabili di processo. Il protocollo supporta anche una modalità di trasmissione orientata agli eventi, adatta al trasferimento di allarmi e di messaggi per configurazione e diagnostica.

Alla corte del CAN...

Il bus seriale CAN (Controller Area Network) introdotto da Bosch per semplificare il cablaggio in ambito automobilisti-

co, è divenuto con il passare degli anni uno dei bus di campo più diffusi al mondo, grazie anche alla sua robustezza, semplicità e flessibilità; è la base di alcune soluzioni deterministiche come TT-Can e Devicenet. Nella sua forma originaria, utilizza un meccanismo di accesso al mezzo con rilevamento della portante (Csmo-Carrier sense multiple access) e una risoluzione non casuale della contesa basata sulla priorità. In sostanza, i nodi che vogliono trasmettere si mettono in ascolto sul canale e se lo trovano libero iniziano a trasmettere (e contestualmente a ricevere), partendo dal



Le comunicazioni di tipo master-slave trasformano il problema del determinismo in una questione di pianificazione gestita dal dispositivo master

bit più significativo, un codice binario che rappresenta la priorità di cui godono. La scelta dei livelli e la sovrapposizione dei segnali sul canale è tale da fare in modo che tutti i nodi a priorità più bassa vedano almeno uno dei bit trasmessi non concorde con il livello letto sul bus. Accortisi di avere perso la contesa del mezzo, questi nodi cessano immediatamente di trasmettere, per riprendere subito dopo aver ricevuto la fine del 'frame' trasmesso dal nodo vincitore. Il vantaggio di questo approccio è che nessun messaggio ad alta priorità può essere ritardato da messaggi a bassa priorità. Il vero problema dal punto di vista del determinismo è che il protocollo lascia a tutti i nodi la libertà di trasmettere in istanti arbitrari, a seconda degli eventi che si verificano nel sistema. Il numero di collisioni con frame a più alta priorità non è in questo caso prevedibile e questo determina valori di jitter intollerabili per molte applicazioni. Una possibile soluzione a questo problema consiste nell'adottare varianti di protocollo che prevedano comunicazioni a intervalli predeterminati di tempo (time-triggered). In questo modo, ogni nodo trasmette in un proprio slot temporale, eliminando i problemi associati alla contesa del canale. TT-Can (Time-Triggered CAN) è un protocollo di questo tipo, proposto da Bosch nel 1999, che

offre comunicazioni strettamente deterministiche. Un'altra evoluzione deterministica del bus CAN è Devicenet, protocollo della famiglia CIP (Common Industrial Protocol) introdotto nel 1994 da Allen Bradley.

...e oltre

Un altro protocollo della famiglia CIP è Controlnet, che offre prestazioni deterministiche grazie all'impiego di un meccanismo di accesso al mezzo a divisione di tempo denominato 'Concurrent Tdma'. La scala dei tempi viene divisa in intervalli di uguale ampiezza, all'interno dei quali viene allocato un periodo per i servizi di comunicazione pianificata (SST-Scheduled Service Time) e un periodo per i servizi non pianificati (UST-Unscheduled Service Time). In ciascun intervallo tutti i nodi utilizzano il servizio di comunicazione pianificata, eventualmente inviando un breve frame che ne confermi la presenza in rete; questo tipo di comunicazione è strettamente deterministica.

L'intervallo UST, invece, viene riservato alle comunicazioni asincrone, facendo in modo che a ogni ciclo un nodo alla volta possa accedervi, eventualmente lasciandolo in tutto o in parte ai nodi successivi. A ogni ciclo il 'diritto di prelazione' sull'intervallo UST passa al nodo successivo, così da rendere equa la suddivisione del canale anche per questo tipo di comunicazioni.

Uno dei bus di campo con il maggior parco d'installato, specialmente in Europa, è Profibus nelle sue varie incarnazioni FMS, DP e PA. Basato su comunicazioni di tipo master-slave e 'multimaster' (quest'ultima governata dal passaggio di token), Profibus offre connessioni semplici orientate al byte e servizi per connessioni complesse in modalità ciclica e aciclica. La variante DP (Decentralized Peripheral) è ottimizzata per le comunicazioni ad alta velocità tra i sistemi di controllo dell'automazione e gli I/O distribuiti. In particolare, la versione VO adotta una modalità di comunicazione ciclica a velocità costante senza possibilità di collisione e può essere configurata per fornire risposte di tipo deterministico.

Negli ultimi anni hanno trovato sempre più diffusione in ambito industriale i protocolli basati sulla tecnologia Ethernet, per via dei vantaggi che offrono in termini di apertura, economia di scala e costante rinnovamento tecnologico. Le prime varianti industriali di Ethernet erano tutt'altro che deterministiche, in quanto ancora dipendenti dal meccanismo di risoluzione stocastica delle collisioni di Csmo/CD. Gli approcci più recenti hanno permesso di implementare il determinismo utilizzando protocolli MAC con Csmo modificato, reti commutate esenti da collisioni, strati superiori che implementano tecniche di tipo Tdma, master-slave o basate sul passaggio di token. Ethernet PowerLink (EPL), Time-Triggered Ethernet (TTE), RealTime Ethernet, Foundation Fieldbus HSE (High speed Ethernet) e Profinet sono alcuni esempi d'implementazioni deterministiche basate sulla tecnologia Ethernet. ■