

Sincronizzazione in reti RTE tramite IEEE 1588

Paolo Ferrari, Alessandra Flammini, Daniele Marioli, Andrea Taroni (*)

Lo standard IEEE 1588 definisce il Precision Time Protocol (PTP) per scambiare le informazioni relative al tempo

Nel settore dell'automazione industriale moderna si può affermare che la produttività di una macchina è legata in modo diretto alla velocità di funzionamento dei suoi sensori e attuatori. Le architetture più comuni per la realizzazione di un sistema altamente ripetitivo si basano su sistemi centralizzati, dove una sola unità centrale di elaborazione (CPU) comanda localmente tutti i punti di ingresso e uscita. È semplice, infatti, associare un interrupt a un evento in ingresso in modo che sia riferibile al sistema di temporizzazione centrale; la CPU quindi può elaborare e programmare l'attuazione dell'uscita con uno sfasamento temporale ben preciso e ripetitivo rispetto all'istante dell'evento d'ingresso. Diverso è il caso dei sistemi distribuiti, dove CPU, sistema di attuazione delle uscite e sistema di acquisizione degli ingressi sono solo dei nodi all'interno di una rete di comunicazione industriale. In questa situazione i tre nodi potrebbero avere riferimenti temporali sfasati tra loro e oscillatori locali la cui frequenza nominale è soggetta a una certa tolleranza, cambiando al variare della temperatura (tipicamente da 10 a 100 ppm/°C) e di molti altri fattori (vibrazioni, rumore elettrico ecc.).

Ultimamente, le reti Ethernet per applicazioni industriali in tempo reale, dette Real-Time Ethernet (RTE), si stanno diffondendo nell'ambito dei collegamenti a livello di sensori e attuatori, grazie alle ottime prestazioni (100 Mbaud) e al limitato costo dei dispositivi di interfaccia. Queste nuove tecnologie si stanno proponendo come soluzioni standard: è il caso di Powerlink, Profinet IO, EtherCAT, Ethernet/IP, ciascuna in grado di soddisfare in particolare un sottoinsieme delle esigenze delle applicazioni in tempo reale. In questo contesto diventa importante la sincronizzazione accurata di tutti i nodi che partecipano a una rete industriale per l'automazione distribuita, specialmente se in tempo reale.

La sincronizzazione tra nodi RTE

Esiste un approccio semplice ai problemi introdotti, che può essere applicato se le distanze tra i nodi consentono di trascurare il ritardo di propagazione del segnale sul mezzo, come molto spesso avviene nei collegamenti industriali in tempo reale. Si può infatti pensare che la CPU sincronizzi i nodi mediante l'invio di messaggi di sincronizzazione di tipo broadcast, ossia diretti contemporaneamente a tutti i nodi, come indicato in figura 1. Ciò non è però facilmente applicabile a una rete industriale basata su Ethernet, poiché la presenza di switch rende non trascurabili i ritardi di trasmissione. Se si mira solamente a ridurre (e poi a trascurare) i ritardi di trasmissione, gli HUB Ethernet sembrerebbero la solu-

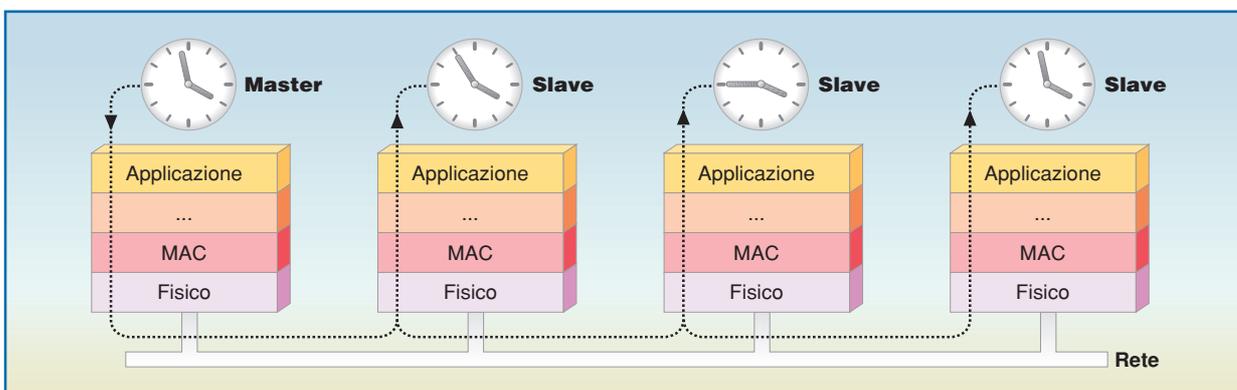


Fig. 1 - Distribuzione della sincronizzazione mediante messaggio di sincronizzazione

zione ideale (ritardi introdotti nell'ordine del microsecondo), ma nell'ambiente industriale e più in generale nelle applicazioni dove è sentita l'esigenza di determinismo, anche la probabilità di collisione deve essere ridotta al minimo. Agli HUB vengono perciò preferiti gli switch, che inoltrano i pacchetti Ethernet solo ai rispettivi destinatari ma che aggiungono dei ritardi la cui entità dipende dall'architettura e dalla tecnologia dello switch stesso. Gli switch si possono classificare in due gruppi: gli switch store&forward caratterizzati dal fatto che memorizzano il messaggio in arrivo, ne verificano la correttezza e lo reinoltrano al destinatario; gli switch cut-through, che memorizzano il messaggio solo fino all'indirizzo del destinatario e che quindi reinoltrano anche messaggi corrotti e frammenti. Esistono anche gli switch fragment-free derivati dai cut-through, che verificano che i pacchetti soddisfino anche il criterio di minima lunghezza Ethernet (64 byte). In figura 2 è illustrato come il ritardo introdotto da uno switch sia formato da una parte T_d , data dall'architettura e funzione della lunghezza del pacchetto, e da una parte T_{sid} che dipende dalla costruzione dello switch e dalla gestione delle code interne. Il tempo T_d , nel caso degli switch store&forward varia da 5,76 μ s a 122 μ s secondo la lunghezza del pacchetto, mentre nel caso degli switch cut-through $T_d = 1,12 \mu$ s ($T_d = 5,76 \mu$ s per i fragment-free).

Nelle RTE, soprattutto per la tipologia dei protocolli a divisione del tempo (Tdma), i messaggi real-time con esigenze di determinismo condividono il mezzo trasmissivo con il traffico TCP/IP a bassa priorità (supervisione di processo, diagnostica, funzioni d'integrazione). Il meccanismo di buffering di uno switch tradizionale potrebbe quindi far aumentare il jitter di ogni pacchetto fino a 122 μ s. Si fa notare che neppure le priorità e le Vlan definite dalle specifiche Ethernet (Ieee 802.1Q/1P) possono ridurre questo tipo di jitter.

a commutazione di pacchetto è nato molto tempo fa nel settore delle telecomunicazioni e ha portato alla creazione dello standard NTP (Network Time Protocol). Ieee 1588-PTP è l'evoluzione dello standard NTP e ne migliora l'accuratezza di sincronizzazione riducendone però l'applicabilità a poche sottoreti. La tabella riassume le caratteristiche dei due protocolli raffrontate con le prestazioni relative alla sincronizzazione di elementi distribuiti nel caso si adotti una strategia basata su ricevitori GPS (Global Positioning System). Si nota come la sincronizzazione tramite GPS risulti essere la migliore, ma per applicarla occorre dotare tutti i nodi di un'antenna esterna e di un ricevitore dedicato, rendendone nettamente problematico l'utilizzo in campo industriale. Sicuramente è più economico utilizzare una soluzione dove i dati di processo e quelli relativi alla sincronizzazione passano sullo stesso cavo. Lo standard Ieee 1588 non è stato creato appositamente per le RTE, ma affronta il problema in modo più generale, definendo le modalità per descrivere la qualità dei 'clock' in sistemi connessi da una rete generica. Nello specifico vengono descritti il modo di rappresentare il tempo, le operazioni a livello di protocollo di rete (PTP), la scelta del riferimento temporale e lo scambio di tali informazioni. Data la sua completezza, lo standard Ieee 1588 al momento sembra molto promettente come metodo di sincronizzazione essendo indipendente dalla tecnologia utilizzata e consentendo implementazioni scalabili da quella full-software, che soffre di forte interazione con il livello applicazione, fino alla soluzione hardware. Nello standard è prevista una negoziazione per l'individuazione della migliore sorgente di clock (chiamata master clock) e ci si propone di stimare, oltre allo sfasamento (O) tra i riferimenti temporali del master e dello slave, anche il ritardo di trasmissione (D) tra master e slave, assunto come identico in entrambe le direzioni.

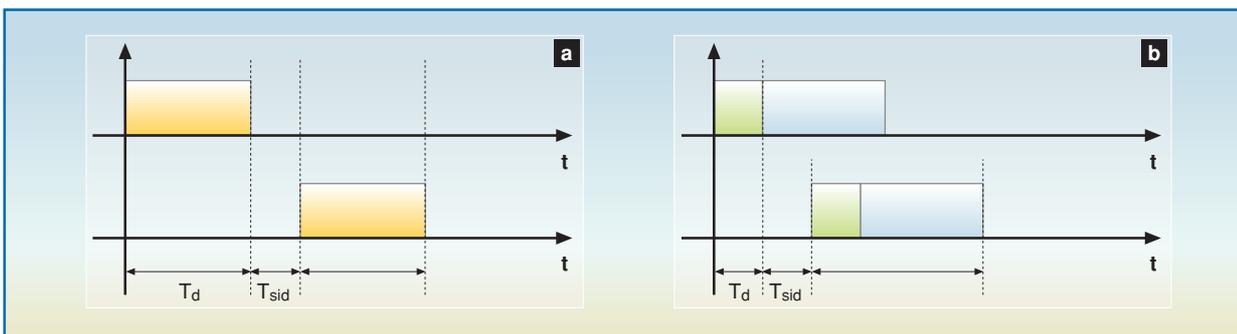


Fig. 2 - Funzionamento degli switch e ritardi introdotti: a) Store&Forward, b) Cut-Through e Fragment-Free

Standard internazionale Ieee 1588

Molti dei protocolli RTE si basano su uno standard internazionale unico per sviluppare le loro soluzioni di sincronizzazione: lo standard Ieee 1588. Esso definisce il Precision Time Protocol (PTP), il protocollo per scambiare le informazioni relative al tempo.

Lo scambio di un riferimento temporale all'interno di una rete

Il protocollo PTP definisce quattro tipi di messaggi relazionati tra loro come descritto qui di seguito. Il master invia un messaggio di sincronizzazione (Sync) all'istante t_{SyncMk} che lo slave riceve all'istante t_{SyncSk} ; se il master non può inserire nel messaggio Sync l'istante t_{SyncMk} esatto di invio (timestamp di spedizione) perché lo può sapere solo dopo la spedizione, allora manda successivamente un secondo messaggio

(Follow_Up) contenente t_{SyncMk} . I messaggi Sync si succedono a intervalli regolari (intervalli di Sync). Lo slave sporadicamente invia un messaggio (Delay_Req) all'istante $t_{DelaySn}$ che il master riceve all'istante $t_{DelayMn}$. Il master risponde allo slave con un messaggio Delay_Res contenente il tempo $t_{DelayMn}$. A questo punto lo slave ha tutte le informazioni necessarie.

$$t_{SyncSk} = t_{SyncMk} + O_k + D_{M \rightarrow Sk}$$

$$t_{DelayMn} = t_{DelaySn} - O_k + D_{S \rightarrow Mk}$$

Supponendo il ritardo di trasmissione simmetrico ($D_{M \rightarrow Sk} = D_{S \rightarrow Mk} = D$) allora si ha:

$$D = ((t_{SyncSk} - t_{SyncMk}) + (t_{DelayMn} - t_{DelaySn}))/2$$

$$O_k = t_{SyncSk} - t_{SyncMk} - D$$

O_k è continuamente aggiornato perché può variare in seguito alla variazione del riferimento locale, mentre D si può considerare un valore statico in assenza di particolari condizioni di traffico (per esempio congestioni). Questa considerazione permette di aggiornare O_k mediante l'invio da parte del master di un messaggio di sincronizzazione seguito eventualmente dal messaggio di follow-up. Si ricorda che per l'aggiornamento della stima di O_k devono essere applicati particolari algoritmi per filtrarne le variazioni brusche.

tine dello stack e al MAC, ma rimane il jitter associato agli switch. Infatti, nel caso di una rete Ethernet, D dipende sicuramente dal numero e dalla tipologia di switch che separano il master dallo slave.

Per ovviare anche a questo problema lo standard prevede che gli switch possano disporre di un proprio 'clock' e che agiscano verso l'esterno come 'boundary clock'. In pratica ciò consiste nel non propagare i messaggi PTP (Sync, Delay_Req, ecc.), ma agire analogamente a uno slave rispetto ai messaggi provenienti dal master clock e apparire come master clock per gli slave a valle. Anche ricorrendo a un'implementazione hardware e all'uso di switch aderenti allo standard, possono permanere delle fluttuazioni sulla stima di D e di O_k per effetto della quantizzazione dei timestamp, del jitter presente a livello fisico e delle implementazioni degli switch. Per ottenere sincronizzazioni nell'ordine di 100 ns bisogna filtrare in modo statistico; ciò può rallentare la convergenza e richiedere un più frequente invio del messaggio di sincronizzazione (Sync) da parte del master.

Le soluzioni proposte sono varie. Per esempio, la tecnologia Profinet IO si avvale di un nuovo tipo di switch che riconosce le fasi operative del ciclo di comunicazione: durante la fase delle comunicazioni tradizionali basate su IP il comportamento di questo switch è quello di un normalissimo store&forward; durante la fase dedicata al traffico isocrono e in tempo reale (RT) tutte le operazioni di instradamento dei pacchetti sono eseguite secondo una rigida sequenza temporale programmata nel dispositivo in fase di configurazione. Con questo approccio i ritardi vengono eliminati perché lo switch sa già quali pacchetti RT arriveranno e dove essi sono destinati. Sotto il profilo della sincronizzazione, questi switch sono definiti 'bypass' (oppure trasparenti) perché in grado di interpretare e

METODI DI SINCRONIZZAZIONE A CONFRONTO

	NTP	IEEE1588-PTP	GPS
Estensione	Geografica	Poche sottoreti	Geografica
Comunicazione	Internet	LAN	Satellite
Accuratezza	Millisecondi	Microsecondi	Microsecondi
Stile	Peer 2 Peer (group)	Master/slave	Client/server
Sicurezza	Sì	No	No
Amministrazione	Configurato	Auto organizzante	N/A
Hardware	No	Sì, max accuratez.	Ricevitore RF + μP
Aggiornamento	Varia, secondi	~ 2 secondi	~ 1 secondo

Quando il protocollo PTP dello standard IEEE 1588 viene implementato su Ethernet si usa solitamente il protocollo UDP/IP e i suoi timestamp dovrebbero riferirsi al bit meno significativo del byte SFD (Start of Frame Delimiter) del frame Ethernet.

Se la generazione dei timestamp è data da una stima software dell'istante in cui i pacchetti transitano sul cavo, si avranno dei problemi di jitter, direttamente legati sia al software che implementa gli strati superiori dello stack sia al dispositivo periferico che implementa il MAC Ethernet. L'unico modo per sincronizzare due sistemi a meno di un microsecondo è quello di utilizzare un hardware realizzato appositamente che rilevi i tempi t_{SyncMk} , t_{SyncSk} , $t_{DelayMn}$ e $t_{DelaySn}$ a livello di MII (Media Independent Interface), ossia all'interfaccia tra il livello fisico e il MAC. Agendo in questo modo si elimina il contributo di jitter dovuto alle variazioni del tempo di esecuzione delle rou-

te e al MAC, ma rimane il jitter associato agli switch. Infatti, nel caso di una rete Ethernet, D dipende sicuramente dal numero e dalla tipologia di switch che separano il master dallo slave. Per ovviare anche a questo problema lo standard prevede che gli switch possano disporre di un proprio 'clock' e che agiscano verso l'esterno come 'boundary clock'. In pratica ciò consiste nel non propagare i messaggi PTP (Sync, Delay_Req, ecc.), ma agire analogamente a uno slave rispetto ai messaggi provenienti dal master clock e apparire come master clock per gli slave a valle. Anche ricorrendo a un'implementazione hardware e all'uso di switch aderenti allo standard, possono permanere delle fluttuazioni sulla stima di D e di O_k per effetto della quantizzazione dei timestamp, del jitter presente a livello fisico e delle implementazioni degli switch. Per ottenere sincronizzazioni nell'ordine di 100 ns bisogna filtrare in modo statistico; ciò può rallentare la convergenza e richiedere un più frequente invio del messaggio di sincronizzazione (Sync) da parte del master. Le soluzioni proposte sono varie. Per esempio, la tecnologia Profinet IO si avvale di un nuovo tipo di switch che riconosce le fasi operative del ciclo di comunicazione: durante la fase delle comunicazioni tradizionali basate su IP il comportamento di questo switch è quello di un normalissimo store&forward; durante la fase dedicata al traffico isocrono e in tempo reale (RT) tutte le operazioni di instradamento dei pacchetti sono eseguite secondo una rigida sequenza temporale programmata nel dispositivo in fase di configurazione. Con questo approccio i ritardi vengono eliminati perché lo switch sa già quali pacchetti RT arriveranno e dove essi sono destinati. Sotto il profilo della sincronizzazione, questi switch sono definiti 'bypass' (oppure trasparenti) perché in grado di interpretare e

correggere i messaggi di tipo IEEE 1588 per la sincronizzazione del sistema, eliminando di fatto i problemi legati alle asimmetrie e all'uso dei boundary clock. In conclusione, tra tutte le metodologie di sincronizzazione si può affermare che il recente standard IEEE 1588 (2002 IEEE, dal 2004 IEC 61588) è già considerato un riferimento comune per le applicazioni che necessitano di sincronizzazione via rete, dalle applicazioni di strumentazione distribuita fino alle tecnologie RTE destinate alle applicazioni industriali in tempo reale. Unico punto da esplorare è l'uso della IEEE 1588 nelle applicazioni wireless, dove i problemi legati alla corruzione del segnale in presenza di interferenze distruttive o eventi eccezionali (EMI) potrebbero influire pesantemente sugli algoritmi di sincronizzazione. ■

(*) Dipartimento di Elettronica per l'Automazione e Profibus (Centro di Competenza Profibus)