

Prestazioni di reti ibride per applicazioni industriali

I sistemi di comunicazione ibridi, in particolare le reti cablate/wireless, offrono prospettive di applicazione molto interessanti in ambito industriale. La realizzazione di estensioni wireless di reti cablate permette il collegamento di componenti non raggiungibili con un cavo quali, ad esempio, i dispositivi collocati su sistemi in movimento. In questo articolo si analizzano inizialmente le caratteristiche generali delle reti ibride considerate. Viene poi proposta un'estensione wireless della rete Ethernet Powerlink basata sulla rete IEEE 802.11 (WiFi). Nella parte finale si riportano i risultati di alcuni test eseguiti su una rete prototipale realizzata in pratica. Si evidenziano e analizzano, infine, le differenze tra i risultati teorici attesi e quelli effettivamente ottenuti.

Lucia Seno
Stefano Vitturi
Federico Tramarin

Keyword

Reti di comunicazione industriali, Estensioni wireless di reti cablate, Ethernet Powerlink, IEEE 802.11

GLI AUTORI

L. Seno, S. Vitturi, Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR-IEIT, U.O.S. di Padova; F. Tramarin, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione Università di Padova

Negli ultimi anni si è assistito a un notevole incremento dell'utilizzo di reti di comunicazione nei sistemi di automazione industriale. Le reti di comunicazione di campo [1], o fieldbus, sono state le prime ad essere impiegate a partire, all'incirca, dall'inizio degli anni '90. Successivamente (inizio anni 2000), sono state introdotte le reti basate su Ethernet [2] che sono note come real-time o industrial Ethernet. Infine, di recente, si sono iniziati ad adottare anche sistemi di comunicazione wireless poiché le loro caratteristiche e potenzialità li rendono molto attraenti per applicazioni industriali.

Le prestazioni richieste alle reti industriali sono spesso stringenti in termini di determinismo e/o real-time. Tali aspetti possono rivelarsi molto critici quando si adottano reti wireless le cui prestazioni, come è ben noto, possono essere influenzate negativamente da errori di trasmissione e/o interferenze con altri sistemi di comunicazione operanti nella stessa banda. Per questo motivo, recentemente sono state eseguite molte analisi allo scopo di verificare l'effettiva idoneità delle reti wireless per applicazioni industriali. I risultati, come evidenziato in [3] e nei riferimenti in esso contenuti, si sono rivelati incoraggianti e, di conseguenza, le reti wireless possono essere considerate una validissima opportunità per implementare sistemi di comunicazione industriale.

Tuttavia, come confermato dalle opinioni di molti esperti, è da escludere che le reti wireless sostituiscano totalmente in un prossimo futuro i sistemi cablati in questi ambiti applicativi. Molto più probabilmente, esse saranno usate per collegare a sistemi cablati già installati alcuni componenti difficili da raggiungere con un cavo, quali ad esempio dispositivi mobili o collocati in posizioni

che non consentono un cablaggio agevole. Le configurazioni risultanti sono reti ibride (cablate/wireless) che implementano estensioni wireless di sistemi cablati. Esse possono essere di molti tipi. Comunque, nell'ambito dei sistemi di automazione industriale, soprattutto ai livelli più bassi della produzione (dove le prestazioni richieste alle reti sono le più severe), le caratteristiche fondamentali delle reti ibride considerate possono essere così riassunte:

- I segmenti wireless hanno estensione geografica limitata (alcune decine di metri) e comprendono pochi dispositivi.
- I controllori (cioè i dispositivi "intelligenti" che implementano i task di automazione) sono collegati al segmento cablato.

In questa memoria saranno dapprima illustrate le modalità con le quali possono essere realizzate reti ibride e verranno fatte alcune considerazioni generali sull'implementazione di estensioni wireless di reti industriali. Successivamente, sarà presa in considerazione la rete Ethernet Powerlink e verrà descritto un esempio di estensione wireless basata sulla rete IEEE 802.11 (WiFi). Infine, saranno mostrati i dettagli dell'implementazione di tale estensione e discussi i risultati di alcuni test prestazionali eseguiti su di essa.

Implementazione di reti ibride

In linea di principio, l'interconnessione tra sistemi di comunicazione diversi può avvenire a qualsiasi livello del modello di riferimento OSI [4]. Tuttavia, nella pratica comune, si riscontrano quasi esclusivamente interconnessioni implementate a livello fisico, a livello data link e a livello applicazione.

I dispositivi usati per realizzare il collegamento

tra sistemi diversi sono noti con il nome di Intermediate System.

Interconnessione a livello fisico

Nell'interconnessione a livello fisico, gli intermediate system utilizzati sono dispositivi denominati repeater. La loro funzione è quella di adattare i differenti livelli di segnale tra sistemi di comunicazione che si basano su livelli fisici diversi ma che adottano lo stesso protocollo di accesso al mezzo trasmissivo.

Le reti di comunicazione industriali adottano protocolli di accesso al mezzo trasmissivo che sono spesso molto diversi da quelli dei più comuni sistemi wireless. Di conseguenza, non vi è alcuna possibilità di implementare estensioni wireless di reti industriali cablate a livello fisico. Per questo motivo, l'uso di repeater non sarà considerato nel seguito di questa memoria.

Interconnessione a livello data link

L'interconnessione a livello data link viene realizzata per mezzo di un tipo di intermediate system denominato bridge. La **► figura 1** riporta un esempio di bridge usato per interconnettere una rete cablata e una wireless. In questo caso, al bridge viene dato il nome di Access Point.

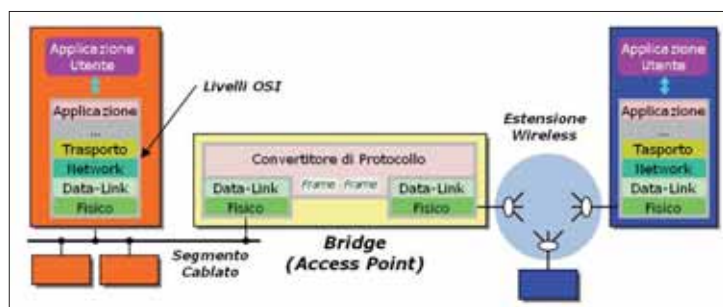


Figura 1 - Utilizzo di un bridge

Come si può notare, il bridge ha il compito di trasferire frame tra sistemi di comunicazione diversi che adottano, nei livelli superiori al data link, gli stessi protocolli. Il bridge, di fatto, implementa un adattamento dei livelli fisici dei due sistemi di comunicazione e, inoltre, esegue la conversione dei formati dei frame adottati da essi. Un classico esempio di applicazione

è costituito dall'interconnessione tra reti Ethernet e WiFi che adottano, ai livelli superiori, lo stack TCP/IP.

Interconnessione a livello applicazione

Gli intermediate system usati al livello applicazione prendono il nome di gateway. Si tratta di dispositivi complessi (e spesso costosi) che realizzano il trasferimento di informazione tra i livelli applicazione di sistemi diversi, come mostrato nella **► figura 2**.

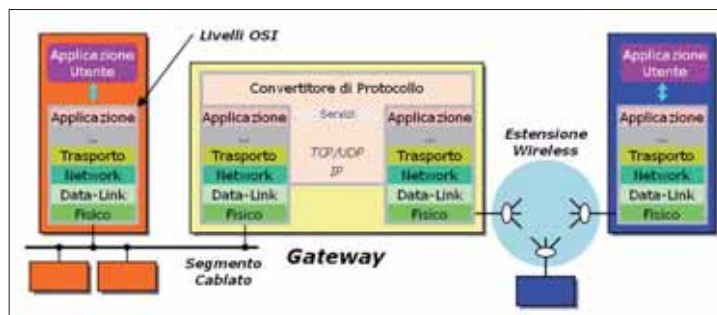


Figura 2 - Utilizzo di un gateway

Dalla figura 2 risulta evidente che un gateway deve implementare completamente gli stack protocollari delle due reti interconnesse e, inoltre, deve essere equipaggiato con le adeguate schede di interfaccia verso le due reti. Talvolta, gli intermediate system operanti al livello applicazione prendono il nome di proxy. Si tratta di dispositivi, per certi versi, più evoluti di un gateway in quanto permettono di rappresentare un segmento di rete come un singolo nodo, rendendo "trasparente" la struttura sottostante per ragioni, ad esempio, di sicurezza e/o di prestazioni.

Implementazione di estensioni wireless di reti industriali

Nonostante le estensioni wireless di reti industriali siano tecnicamente fattibili, vi sono alcuni aspetti peculiari delle loro implementazioni che devono essere tenuti in adeguata considerazione poiché da essi dipendono sensibilmente le prestazioni delle reti ibride realizzate.

Limitazione del throughput sul segmento wireless

Anche se la massima velocità di trasmissione sul segmento wireless può essere elevata (ad esempio 54 Mbit/s per reti IEEE 802.11g), il mezzo trasmissivo è condiviso da tutti i nodi collegati a tale segmento. Tale situazione può determinare una riduzione significativa del throughput per singola stazione, in particolare se il numero totale di stazioni aumenta. Inoltre, il consistente overhead di trasmissione (header, frame di acknowledgment, eventuali frame CTS e RTS per riservare il mezzo trasmissivo), tipico dei sistemi wireless, può ulteriormente contribuire a ridurre l'efficienza di trasmissione.

Il problema descritto può essere risolto, almeno parzialmente, mantenendo basso il numero di nodi sul segmento wireless o, eventualmente, allocando i nodi in

alcune sottoreti adeguatamente separate. Alternativamente si può ricorrere, se possibile, a sistemi wireless di nuovissima generazione, quali ad esempio le reti IEEE 802.11n. Tali reti permettono di adottare velocità di trasmissione molto più elevate e, soprattutto, si basano sulla tecnologia Mimo (multiple-input multiple-output) la quale garantisce che trasmissioni e ricezioni possano avvenire contemporaneamente su canali diversi incrementando, anche in maniera sensibile, il throughput.

Tecniche di accesso al mezzo trasmissivo delle reti wireless

Alcune tra le più diffuse reti wireless adottano delle tecniche casuali per accedere al mezzo trasmissivo (l'esempio più ovvio è rappresentato dalla Distributed Coordination Function, DCF, usata da IEEE 802.11). Questo comporta che si possano verificare ritardi e latenze non prevedibili (e spesso non limitati) nella trasmissione di messaggi. Il problema può essere aggravato dal verificarsi di collisioni tra messaggi trasmessi da nodi diversi e dai conseguenti (aleatori) periodi di back-off attesi prima di procedere alla ritrasmissione. Per risolvere tale inconveniente, si può ricorrere a tecniche diverse di accesso al mezzo trasmissivo. È il caso di protocolli basati su tecniche TDMA (Time Division Multiple

Access), che si rivelano particolarmente adatti poiché garantiscono a ogni stazione una porzione adeguata di banda trasmissiva. In alternativa, anche meccanismi di prioritizzazione dei messaggi si rivelano efficaci. Per esempio, IEEE 802.11e introduce quattro possibili livelli di priorità, rendendo possibile l'assegnazione di una priorità elevata a messaggi critici.

Errori di trasmissione

È ben noto che i sistemi wireless possono essere caratterizzati da probabilità di errore non trascurabili nella trasmissione dei messaggi causate da difficoltà nella propagazione del segnale e/o dall'interferenza con altri sistemi trasmissivi operanti nella stessa banda. Tale problema, nel caso delle reti industriali, assume importanza rilevante in quanto i messaggi possono incorrere in frequenti ritrasmissioni e, di conseguenza, essere ricevuti con notevoli ritardi dalle stazioni destinatarie. Per risolvere questo inconveniente si ricorre spesso a un'adeguata dislocazione delle antenne di trasmissione/ricezione, in modo da garantire la corretta propagazione del segnale. Se tale accorgimento non si rivela efficace, si può cercare di ridurre la velocità di trasmissione (anche se questo può portare a una riduzione del throughput) in quanto le tecniche di modulazione usate alle basse velocità sono più robuste. Infine, per limitare il fenomeno dell'interferenza, si può scegliere di trasmettere nella banda a 5 GHz, come viene fatto dai sistemi IEEE 802.11a.

La rete Ethernet Powerlink

La rete Ethernet Powerlink è stata originariamente sviluppata da un gruppo di aziende e organizzazioni di ricerca (EPL Standardization Group) e successivamente inclusa nello standard internazionale IEC 61784 [5] relativo alle reti real-time Ethernet. Si tratta di una rete che mantiene la totale compatibilità con Ethernet e implementa le funzionalità real-time per mezzo di un protocollo del livello data link (denominato EPL DLL) collocato al di sopra del protocollo MAC (medium access control) nativo di Ethernet, come illustrato nella ► **figura 3** che riporta l'architettura di comunicazione di Ethernet Powerlink.

Da un punto di vista strutturale, la rete comprende un nodo master (denominato Managing Node, MN) e fino a 240

slave (Controlled Node, CN) che possono essere collegati sfruttando varie topologie (per esempio, bus, stella e catene lineari). Lo standard raccomanda l'uso di hub per il collegamento dei nodi, in quanto tali dispositivi introducono basse latenze. Tuttavia, possono essere usati anche dei comuni dispositivi switch.

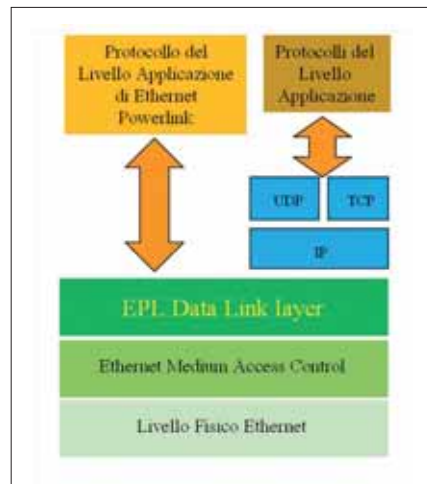


Figura 3 - Architettura di comunicazione di Ethernet Powerlink

Funzionamento di Ethernet Powerlink

Il protocollo del livello data link di Ethernet Powerlink stabilisce che sulla rete venga continuamente ripetuto un ciclo durante il quale il MN interroga i CN inviando a essi i dati di uscita e ricevendo da essi i dati di ingresso. Il ciclo, riportato nella ► **figura 4**, implementa una tecnica di tipo TDMA che consente un accesso ordinato alla rete da parte di tutti i nodi coinvolti.



Figura 4 - Ciclo di funzionamento di Ethernet Powerlink

Nel dettaglio, il MN inizia un ciclo inviando in broadcast a tutti i CN il frame Start of Cycle (SoC). Successivamente inizia il periodo isocrono durante il quale, a ogni CN da interrogare in quel ciclo, il MN invia il frame Poll Request (PReq) che contiene i valori delle uscite. Il CN risponde con il frame Poll Response (PRes), che riporta gli ingressi. Per motivi legati alla corretta esecuzione del ciclo

Powerlink, il protocollo prevede che se un CN non risponde entro un tempo predefinito (EPL time-out), il MN passi al CN successivo. Infine, è opportuno notare che non tutti i CN sono necessariamente interrogati nell'ambito dello stesso ciclo. Infatti, nella fase di configurazione della rete si può specificare il periodo con il quale ogni CN deve essere interrogato. Tale periodo è espresso come multiplo del ciclo di Ethernet Powerlink. Terminato il periodo isocrono, inizia il periodo aciclico durante il quale un qualsiasi nodo della rete può inviare un messaggio asincrono, previa autorizzazione ricevuta dal MN durante il periodo precedente. Infine, si passa al periodo Idle, durante il quale non vi sono operazioni sulla rete e si attende l'inizio di un nuovo ciclo.

Estensione wireless di Ethernet Powerlink

La rete IEEE 802.11 (wireless local area network, WLAN) si è rivelata idonea per realizzare estensioni wireless di sistemi cablati industriali grazie alle sue caratteristiche e prestazioni. In particolare, IEEE 802.11 implementa un accesso al mezzo trasmissivo basato su una tecnica di tipo CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) denominata DCF (distributed coordination function)¹. In pratica, una stazione che deve trasmettere un frame verifica dapprima che la rete sia libera per un tempo denominato distributed interframe space (DIFS). Se questo accade, la stazione inizia a trasmettere. In caso contrario, la stazione attende

un tempo casuale (back-off time), calcolato come una variabile aleatoria uniforme, trascorso il quale tenta nuovamente di accedere alla rete. È importante osservare che il tempo di back-off è atteso da una stazione anche quando una trasmissione non ha avuto

esito positivo, cioè quando la stazione, dopo aver trasmesso un messaggio, non ha ricevuto il frame di acknowledgement

¹ In realtà, lo standard IEEE 802.11 introduce anche una seconda, opzionale, modalità di accesso, denominata PCF (Point Coordination Function) che però nella quasi totalità dei dispositivi disponibili in commercio non è mai implementata.

(ACK), specificato dallo standard, entro un tempo denominato ACK time-out.

Le caratteristiche di Ethernet Powerlink, in particolare la sua totale compatibilità con Ethernet, rendono possibile l'implementazione di una sua estensione wireless al livello data link, usando un Access Point come bridge tra il segmento cablato e quello wireless. Inoltre, anche l'estensione wireless al livello applicazione può essere ottenuta implementando un dispositivo gateway come menzionato nel paragrafo ► **Implementazione di reti ibride**. Di seguito si riportano le caratteristiche delle due estensioni.

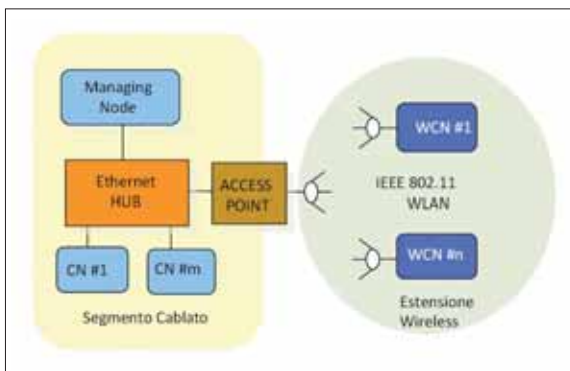


Figura 5 - Estensione di Ethernet Powerlink al livello data link

Estensione di Ethernet Powerlink al livello data link

L'estensione al livello data link può essere realizzata secondo lo schema descritto nella ► **figura 5**.

Come si può notare, l'estensione wireless contiene dei dispositivi denominati wireless controlled node (WCN). Si tratta di componenti che implementano lo stesso protocollo dei nodi controllati di Powerlink ma, diversamente da questi, sono dotati di interfaccia IEEE 802.11 anziché di interfaccia Ethernet. La loro realizzazione, almeno dal punto di vista progettuale, non presenta particolari difficoltà dato che il protocollo dei nodi controllati Powerlink (come quello del MN, in effetti) è disponibile in codice sorgente [6] e, di conseguenza utilizzabile su molti dispositivi a microprocessore. La caratteristica più importante dello schema proposto nella ► **figura 5** è rappresentata dal fatto che i WCN sono inseriti direttamente nel ciclo di Powerlink. Questo significa che essi ricevono dal MN i frame PReq e rispondono con i frame PRes. Chiaramente, poiché nel segmento wireless l'accesso al mezzo trasmissivo è regolato dalla tecnica

CSMA/CA propria dello standard IEEE 802.11, vi possono essere latenze e jitter indesiderati nel polling dei WCN. Tuttavia, come sarà illustrato nel paragrafo seguente, questi fenomeni possono essere adeguatamente circoscritti in modo che essi non influenzino i nodi collocati sul segmento cablato e che, di conseguenza, venga garantita la precisa esecuzione del ciclo di Ethernet Powerlink.

Estensione di Ethernet Powerlink al livello applicazione

Lo schema dell'estensione a livello applicazione di Ethernet Powerlink è riportato nella ► **figura 6**.

In questo caso, le stazioni presenti sul segmento wireless non sono incluse nel ciclo di Powerlink e quindi funzionano in maniera indipendente dalla rete cablata. L'estensione fa uso di un gateway che, sul segmento cablato si comporta come un nodo Powerlink (può funzionare indifferentemente come MN o come CN), mentre

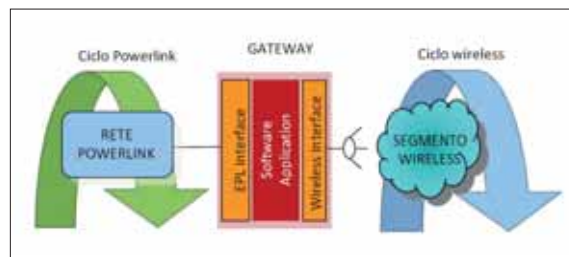


Figura 6 - Estensione di Ethernet Powerlink al livello applicazione

sul segmento wireless coordina lo scambio dati con le stazioni ad esso collegate. In pratica, può essere ipotizzato che sul segmento wireless venga implementato un ciclo di funzionamento (diverso e indipendente dal ciclo di Powerlink) durante il quale ogni stazione viene interrogata dal gateway. I dati ottenuti vengono messi a disposizione del MN che, quando interroga il gateway, fornisce anche i dati di uscita che saranno successivamente inoltrati alle stazioni wireless.

Implementazione dell'estensione wireless di Ethernet Powerlink

Nell'ambito delle attività di ricerca svolte presso CNR-IEIIT, è stata implementata una versione prototipale dell'estensione

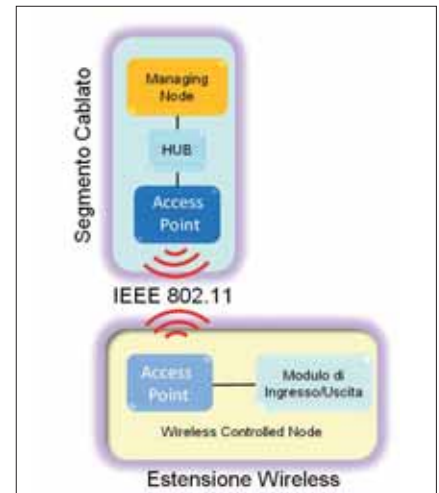


Figura 7 - Implementazione dell'estensione di Ethernet Powerlink al livello data link

wireless di Ethernet Powerlink a livello data link, come descritto nella ► **figura 7**. Come si può notare, il WCN è stato realizzato collegando un access point a un nodo controllato disponibile in commercio (un modulo di ingresso/uscita prodotto dalla ditta B&R Automation). Il segmento cablato consiste nel solo MN collegato a un dispositivo hub, mentre l'estensione wireless comprende il solo WCN collegato al segmento cablato tramite l'access point connesso al dispositivo hub.

Sulla rete mostrata nella figura 7 sono state eseguite alcune misure di prestazioni. In particolare, è stato misurato il tempo di polling del WCN, cioè il tempo che intercorre tra l'istante in cui viene generato (dal MN) il frame PReq verso

il WCN e l'istante in cui il MN riceve il corrispondente PRes inviato dal WCN. Il tempo di polling del nodo controllato wireless rappresenta un indice prestazionale di fondamentale importanza. Infatti, analizzando il suo andamento si ottengono informazioni utili a stimare latenze e jitter nel polling dei WCN e, inoltre, esso viene utilizzato nel calcolo del tempo di ciclo della rete Ethernet Powerlink.

Al fine di comprendere l'influenza dei componenti usati sulle prestazioni del sistema, le misure sono state eseguite usando due diversi access point. In particolare, sono stati usati un dispositivo LinkSys, modello WAP54G, e un 3Com, modello Office Connect. Inoltre, la rete prototipale è stata installata in un ambiente caratteriz-

zato da un buon rapporto segnale/disturbo (e quindi bassa probabilità di errore nella trasmissione dei frame) e dove non erano presenti sorgenti di interferenza. Entrambi tali aspetti sono stati verificati per mezzo di un analizzatore di spettro.

I risultati ottenuti sono riportati nella ► **tabella 1**:

Teorico	Linksys	3com	
Media	0,4 ms	1,6 ms	2,1 ms
Deviazione Standard	0,004 ms	1,4 ms	0,06 ms

Tabella 1 - Valori misurati del tempo di polling di un WCN

Come si può notare, c'è una differenza significativa tra i valori calcolati teoricamente (per motivi di spazio, l'analisi teorica non è riportata in questa memoria; il lettore interessato la può trovare in [7]) e i risultati delle misure. Come sarà chiarito nei prossimi paragrafi, tale discrepanza è dovuta ai ritardi introdotti dai componenti usati, in particolare gli access point.

In secondo luogo, le misure eseguite con l'access point LinkSys presentano una deviazione standard molto alta a testimonianza di una notevole aleatorietà del tempo di polling. Un'analisi eseguita a posteriori ha dimostrato che tale dispositivo entrava periodicamente in una sorta di "sleep-state" dal quale impiegava un tempo elevato per uscire. In questo modo, molte delle misure relative al polling time hanno riportato dei valori elevati. Questo comportamento imprevedibile dell'access point ha causato spesso il verificarsi di time-out sul MN che, di conseguenza concludeva l'interrogazione del WCN senza aver ottenuto risposta e continuava ad eseguire il ciclo di Powerlink.

L'access point 3Com ha mostrato un comportamento molto più regolare. Tuttavia, il tempo di polling misurato, come si può notare nella ► **tabella 1** presenta un valore medio molto più elevato rispetto al valore teorico. Al fine di individuare le cause di tale differenza, sono state eseguite alcune misure atte a verificare il ritardo introdotto dall'access point nel trasferimento di un frame. In particolare, si è ricavata la densità di probabilità (PDF) di tale ritardo. L'andamento ottenuto è riportato nella ► **figura 8**.

La misura è stata eseguita inviando periodicamente dei frame di lunghezza limi-

tata (tipici di applicazioni industriali) e rilevando con un oscilloscopio digitale il tempo di "attraversamento" del dispositivo. Nella ► **figura 8**, TP rappresenta il periodo con il quale sono stati inviati i frame, mentre DA è il ritardo introdotto dall'access point. Come si può notare, il ritardo è una variabile aleatoria che, sor-

prendentemente, dipende anche dal periodo dei frame inviati. In particolare, più basso è il periodo, minore è il ritardo. In pratica, anche in questo caso sembra che l'access point entri in uno sleep-state dal quale impiega un certo

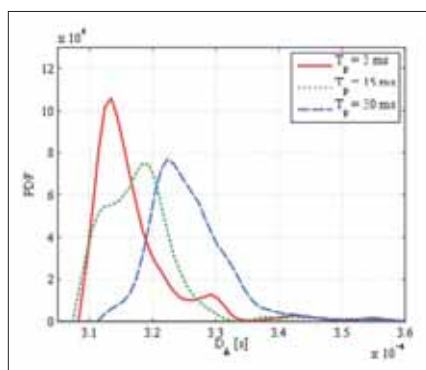


Figura 8 - Densità di probabilità del ritardo introdotto dall'access point

tempo per uscire, seppure molto più ridotto di quello richiesto dal LinkSys. Inoltre, come può essere riscontrato nella figura, il valore medio cade nel range 300-350 μ s. Proprio quest'ultimo dato fornisce buona parte delle spiegazioni cercate. Infatti, considerato che nella rete prototipale realizzata per eseguire il polling di un nodo controllato wireless sono necessari quattro attraversamenti di access point, il ritardo medio complessivo introdotto da questi dispositivi è nel range 1,2-1,4 ms. Tale valore, sommato a quello calcolato teoricamente (0,4 ms) porta a un valore complessivo del ritardo medio molto vicino a quello medio misurato. La differenza residua può essere imputata a latenze e/o ritardi introdotti da altri dispositivi, quale ad esempio, il tempo di elaborazione delle schede e/o del software utilizzato.

Conclusioni

La disponibilità di molteplici tipologie di reti per applicazioni industriali e, in particolare, di sistemi wireless, ha reso possibile la realizzazione di particolari reti ibride (cablate/wireless), che implemen-

tano estensioni wireless di sistemi cablati. In questa memoria si è fatto riferimento alla rete Ethernet Powerlink e si è descritta una sua estensione wireless basata su IEEE 802.11.

I risultati ottenuti attraverso delle accurate sessioni sperimentali hanno confermato l'efficacia della soluzione proposta, dimostrando la fattibilità pratica dell'estensione wireless di Ethernet Powerlink. Allo stesso tempo, tali risultati hanno evidenziato come l'influenza dei ritardi introdotti dai dispositivi impiegati sia molto rilevante nel determinare le prestazioni dell'intero sistema.

Di conseguenza, una possibile interessante attività futura è rappresentata da misure da eseguire su tali componenti (access point, schede di interfaccia) al fine di determinare con esattezza le loro caratteristiche. I risultati ottenuti potranno essere usati in seguito per perfezionare le analisi teoriche e/o i modelli di simulazione di tali reti, così da poter predire con maggiore precisione il loro comportamento.

Bibliografia

- [1] J. P. Thomesse, "Fieldbus Technology in Industrial Automation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1073-1101, June 2005.
- [2] J. D. Decotignie, "Ethernet-Based Real-Time and Industrial Communications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 6, pp. 1102-1117, June 2005.
- [3] A. Willig, "Recent and Emerging Topics in Wireless Industrial Communications: a Selection", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 4, no. 2, pp. 102-124, May 2008.
- [4] International Standard Organization ISO/IEC 9545 standard, *Information technology -- Open Systems Interconnection -- Application Layer Structure*, 1994.
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC 61784, *Digital data communications for measurement and control, part 2: Additional profiles for ISO/IEC 8802-3 based communication networks in real time applications*, November 2007.
- [6] Open Powerlink, <http://openpowerlink.sourceforge.net/>
- [7] L. Seno, S. Vitturi, C. Zunino, "Analysis of Ethernet Powerlink Wireless Extensions Based on the IEEE 802.11 WLAN", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol.5, Issue 2, May 2009, pp. 86-98. ■