

Reti wireless industriali: prestazioni ed affidabilità

Stefano Galimberti

La disponibilità di standard di riferimento internazionali permette ormai un'adozione più generalizzata delle tecnologie wireless anche in ambito industriale. L'utente deve tuttavia essere in grado di valutare il livello di prestazioni ed affidabilità che la rete wireless può garantire nel contesto applicativo specifico. In particolare, è importante dimensionare la rete in modo che le funzionalità richieste rimangano integre e consistenti anche in presenza di stress "ambientali" e situazioni impreviste. I parametri da valutare nella definizione di una rete wireless efficace ed affidabile sono spesso poco conosciuti, specialmente con riferimento a tecnologie recenti come le reti "Mesh" a sincronizzazione di tempo.

Keyword

Wireless, Hart, SP100, sensori.

Allo stato attuale, due sono gli standard di riferimento per applicazioni wireless in ambito industriale: "WirelessHart" – rilasciato in forma definitiva da ormai più di un anno - ed ISA SP 100-11 - previsto per un rilascio finale entro l'anno ma ormai consolidato in tutti gli aspetti chiave. Entrambi gli standard nascono primariamente per soddisfare le esigenze del Controllo di Processo, ma promettono un'evoluzione anche nell'area dell'Automazione di Fabbrica, specie dove non siano richiesti tempi di risposta particolarmente veloci.

I due standard in questione, pur sviluppati in maniera indipendente, risultano in effetti molto simili a livello di scelte tecnologiche di base, e si differenziano in modo rilevante solo ai livelli più alti del protocollo ISO/OSI; la memoria è quindi in larga misura applicabile ad entrambi gli standard.

Nel seguito, verranno discusse alcune problematiche di "sicurezza funzionale" ("Functional Safety") ma non si prenderanno in considerazione, per ragione di spazio, gli aspetti di "protezione" della rete da accessi non autorizzati ("Security").

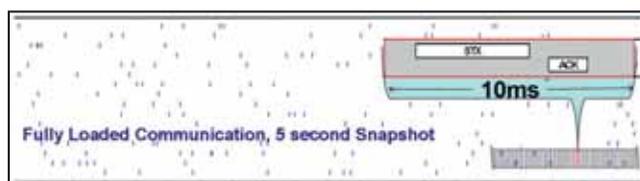
Tecnologie di base

Ricapitoliamo brevemente le tecnologie di base comuni agli standard WirelessHart ed SP100, in modo da permettere una migliore comprensione delle problematiche di prestazione ed affidabilità ad esse assicurate.

- Banda operativa ISM a 2,4 GHz (WiFi).
- Conformità con lo standard IEEE 802.15.4 2006 DSSS (livello fisico).
- Trasmissione a 10 mW (eirp); distanza di comunicazione tra 50 e 150 metri.
- 16 canali RF "paralleli", con capacità di trasmissione di

250 Kbps ciascuno.

- Modulazione "Spread Spectrum" (tipo DS) all'interno di ogni canale.
- Modalità "Frequency Hopping" a livello di pacchetto tra i vari canali.
- Modalità preferenziale di accesso ai canali di tipo TDMA, con opzione CSMA
- "Slot" TDMA (128 byte/10 ms) con sincronizzazione di tempo (cfr figura)
- Supporto sia per reti "Mesh" multi-hop che per reti "Star".
- Buffering locale e gestione specifica per la massima affidabilità "end-to-end".
- Tecniche di "Diversità" (frequenza, spazio, tempo) per maggiore affidabilità.



Prestazioni

Le "prestazioni" di una rete wireless sono associate ad una serie di parametri operativi misurabili, che possono assumere maggiore o minore rilevanza in funzione dell'applicazione specifica. È perciò opportuno – e generalmente possibile – ottimizzare i parametri maggiormente importanti a scapito degli altri.

Per semplicità, ci limiteremo a discutere i parametri operativi che risultano di solito più rilevanti, e cioè "Distanza di comunicazione", "Velocità di comunicazione", "Tempo di latenza" e "Consumo energetico".

Distanza di comunicazione

L'equazione di Friis (cfr tabella) permette di calcolare la

S. Galimberti, Pepperl+Fuchs Elcon

potenza ricevuta P_r in funzione della potenza trasmessa P_t , dei guadagni di antenna G e della distanza L ; la massima distanza di comunicazione possibile in condizioni ideali può quindi essere facilmente calcolata in funzione della sensibilità specificata per il ricevitore (tra -90 e -100 dBm, nel nostro caso).

$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4 \pi L} \right)^2$		$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4 \pi L} \right)^N$	
Environment	Path Loss exponent N		
Free space environment	2		
Urban environment, no shadowing	2,7 ~ 3,5		
Urban environment, shadowing	3 ~ 5		
Office environment no line-of-sight	4 ~ 6		
Factory environment, no line-of-sight	2 ~ 3		

In condizioni reali, l'equazione di Friis va corretta aumentando l'esponente N a valori maggiori di 2 in funzione dell'ambiente operativo, reperibili in opportune tabelle del tipo di quella sopra descritta. Va inoltre considerato un discreto margine di sicurezza, data l'elevata "varianza", sia spaziale che temporale, tipicamente associate all'esponente di Path Loss.

Le cause principali della riduzione delle distanze di comunicazione nei casi applicativi reali sono le seguenti: presenza di "rumore" o "interferenza" di altre reti nella banda operativa; presenza di riflessioni con interferenza "multipath" distruttiva (le riflessioni "radenti" o dovute a superfici metalliche sono le peggiori); percorso diretto (line-of-sight) tra antenna ricevente e trasmettente parzialmente ostruito; Antenna impropriamente installata (ad esempio troppo bassa o prossima a pareti).

Gli standard Wireless considerati permettono di aumentare le prestazioni a livello di distanza di comunicazione grazie alle seguenti soluzioni tecnologiche: Modalità Frequency Hopping (riduzione degli effetti "multipath"); Rete con topologia Mesh (possibilità di "multi-hop"); Modulazione "spread-spectrum" (riduzione della la sensibilità al rumore).

Velocità di comunicazione

Il "throughput" teorico massimo 802.15.4 è pari a 4 Mbps (250 kbps per 16 canali); nel caso tipico di rete basate su singolo "access-point", la velocità di comunicazione verso il sistema di controllo riduce però ad un massimo teorico di 250 kbps (singolo canale) equivalente a circa 150 kbps a livello di "payload" utile.

Se si considerano altre limitazioni associate alla modalità di gestione affidabile ed ottimizzata della rete – unitamente alla necessità di non avvicinarsi troppo al punto di saturazione si può attualmente stimare una capacità, per una rete di 30 dispositivi, una capacità media pari a circa una transazione al secondo (dove per transazione si intende un messaggio monodirezionale con ACK con un massimo di 80 byte di dati utili). Ovviamente sono possibili picchi di traffico momentanei molto più alti, specie se essi si riferiscono ad un singolo dispositivo per volta.

Va però considerato separatamente il caso di dispositivi wireless alimentati con batterie primarie sostituibili; si tratta in

effetti di un caso applicativo piuttosto comune, specie nel caso di sensoristica wireless in ambito industriale.

Assumendo come obiettivo una durata batteria di almeno qualche anno, ed assumendo dimensioni di batterie contenute (max due celle di tipo D), vi sono ovviamente dei vincoli relativamente al numero medio di messaggi trasferiti nell'unità di tempo. Tuttavia, l'efficienza energetica delle tecnologie wireless considerate permette ad ogni dispositivo di supportare – indicativamente – una transazione ogni 30 secondi pur con durata batteria dell'ordine degli anni (assumendo ovviamente che il contributo energetico "wireless" sia dominante rispetto a quello "sensore", come spesso accade).

Tempo di latenza

Il tempo di latenza è definito come il ritardo di propagazione di un messaggio tra "origine" – tipicamente, il sensore wireless – e destinazione – i.e., sistema di controllo e supervisione ("Host").

Un tipico sensore wireless trasmette spontaneamente ("publishing") i dati rilevanti al sistema di controllo con una periodicità fissa (od eventualmente adattabile automaticamente alle condizioni di processo). La rete wireless alloca automaticamente la banda di comunicazione richiesta (i.e. assegna gli slot TDMA necessari) in modo da garantire la periodicità di trasmissione impostata.

Ovviamente, il tempo di latenza non potrà mai essere inferiore al numero degli "hop" della rete "Mesh" moltiplicato per 10 ms (tempo di slot); tuttavia, la periodicità di trasmissione dati è di solito superiore al secondo; la latenza dovuta al singolo hop non è perciò generalmente il fattore limitante.

Per una rete wireless operante in ambiente "industriale", un tasso relativamente alto di "fallimenti" nella trasmissione di un messaggio da nodo a nodo è da considerarsi normale. Il nodo Tx ripeterà la trasmissione al successivo "slot" disponibile – non necessariamente il successivo – e ciò contribuirà ad aumentare latenza.

Grazie agli slot molto brevi (10 ms), il rapporto tra periodo di "publishing" e durato a slot è generalmente superiore a 100. Tramite una gestione sufficientemente "intelligente" della rete è perciò possibile minimizzare gli effetti sulla latenza di "retry" anche multiple; ciò è sempre possibile a patto di allocare un numero sufficiente di "slot" di riserva, anche a costo di un leggero aumento del consumo energetico.

In conclusione, una rete wireless di dimensioni non eccessive ed opportunamente configurata può ridurre il tempo di latenza fino a qualche decimo di secondo.

Consumo energetico

L'adozione di tecnologie è principalmente motivata dall'eliminazione dei cavi di collegamento; tuttavia, è desiderabile eliminare non solo i cavi dati ma anche quelli di alimentazione.

Il nodo wireless "ideale" dovrebbe perciò disporre di una sorgente di alimentazione autonoma e locale. Si sono perciò considerate varie soluzioni di "energy-harvesting", incluso l'utilizzo di pannelli solari e sfruttamento diretto dell'energia di "vibrazione" del punto di installazione.

Allo stato attuale, le batterie primarie al Litio rimangono però l'opzione preferita per l'alimentazione di dispositivi wireless in ambito industriale, grazie all'elevato grado di compattezza ed affidabilità che esse possono garantire; la dimensione massima di batteria tipicamente accettata è pari a 2 celle di tipo "D".

Mediamente, si stima come accettabile per l'utente finale una durata di batterie da 2 a 5 anni, in funzione del tipo di installazione; l'obiettivo massimo in casi particolari viene invece generalmente fissato a 10 anni.

Ovviamente, non solo il sensore stesso, ma anche la tecnologia wireless di base deve garantire il raggiungimento di tali obiettivi. La soluzione identificata per ridurre a livello minimo il consumo di un nodo wireless – in una rete Mesh – è quella della sincronizzazione TDMA a livello di slot; in pratica, sia il nodo Tx che il nodo Rx sono normalmente in stato di "power-down", e si risvegliano solo – contemporaneamente – quando si avvicina uno slot temporale assegnato per la comunicazione. Nello stato di "power-down" è attivo solo un "orologio" a bassissimo consumo – ed altissima precisione – tale da mantenere la sincronizzazione di rete per almeno un minuto, anche in assenza di messaggi scambiati.

In conclusione, la tecnologia attuale permette un consumo RF ridotto al livello orientativo di 300 µJ/messaggio/hop, tale da rendere ragionevole una durata di batterie vicina 10 anni per un sensore di temperatura che trasmetta un messaggio al minuto in una rete wireless Mesh tipica.

Affidabilità

Come "affidabilità" intendiamo la capacità della rete wireless di operare come specificato, anche in presenza degli "stress" operativi previsti e con scostamenti accettabili relativamente ai tempi di risposta medi.

A questo proposito, il comitato di standardizzazione SP100 ha definito una serie di categorie applicative (cfr tabella) associate a dei requisiti di affidabilità crescenti; allo stato attuale, le tecnologie wireless in discussione raggiungono orientativamente i livelli 2-3.

Category	Class	Application	Description
Safety	0	Emergency action	(always critical)
	1	Closed loop regulatory control	(often critical)
Control	2	Closed loop supervisory control	(usually non-critical)
	3	Open loop control	(human in the loop)
Monitoring	4	Alerting	Short-term operational consequence (e.g., event-based maintenance)
	5	Logging and downloading/uploading	No immediate operational consequence (e.g., history collection, sequence-of-events, preventive maintenance)

↑ Importance of message timeliness increases

Integrità dati

Si definisce come integrità dati la capacità di un sistema di comunicazione di evitare la "perdita" informazioni in un'ampia gamma di condizioni operative. In termini pratici, un pacchetto dati può venire ritardato ma non deve mai andare perso.

Un'elevata integrità si ottiene tramite una serie di accorgimenti

ai vari livelli del protocollo di comunicazione. Le tecniche attualmente adottate a livello wireless sono le seguenti:

- Controllo di correttezza messaggio ricevuto (e.g. CRC multi-ple/Checksum) tale da tollerare l'elevato BER tipicamente presente.
- Acknowledge alla ricezione entro il singolo slot, per un'immediata notifica di "failure".
- Allocazione di meccanismi di buffering selettivo a livello di singolo nodo wireless, in modo da tollerare un elevato numero di "ritrasmissioni" pendenti.
- Meccanismo di "acknowledge" end-to-end con gestione di sessione avanzata.
- Gestione della rete tale da evitare grafi aciclici e pacchetti dati spuri riciccolanti.

Dato che i vari livelli dei protocolli wireless in questione sono stati fin dall'inizio studiati allo scopo di massimizzarne l'affidabilità, non stupiscono livelli di integrità misurati nettamente superiori al 99.99%.

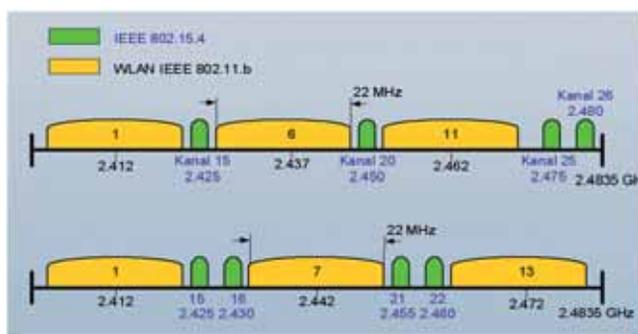
L'affidabilità di una rete Mesh wireless ben formata si colloca in effetti solitamente nella 3σ (99.7300204%) - 6σ (99.9999998%).

Capacità di coesistenza

Come "coesistenza" si intende la capacità di un generico sistema di comunicazione wireless di continuare ad operare in "sovrapposizione" ad altre reti wireless non coordinate (e.g. WiFi) senza causare, o soffrire, una drastica perdita di prestazioni.

Idealmente, le varie reti wireless "sovrapposte" dovrebbero essere in grado di spartirsi efficientemente ed equamente la banda di comunicazione disponibile; ovviamente, il comportamento "ideale" è impossibile senza "coordinamento", ma sono comunque adottabili tecniche per muoversi in questa direzione. L'analisi di coesistenza può essere molto complessa; la ridotta potenza e il basso "duty-cycle" delle reti wireless Mesh TDMA riducono però drasticamente la probabilità di interferenze sostanziali le reti WiFi.

Più in dettaglio, le reti wireless considerate adottano i seguenti accorgimenti volti a migliorare la coesistenza: Slot molto brevi e duty-cycle, sui 16 canali, tipicamente molto bassi; Tecnologia spread-spectrum a due livelli (DSSS + FHSS); Utilizzo contemporaneo di tutta la banda ISM (16 canali); Possibilità di evitare di utilizzare alcuni dei 16 canali nel caso questi siano allocati ad altre reti wireless coesistenti con funzionalità critiche (cfr figura).



Resistenza alle Interferenze

La tolleranza alle interferenze elettromagnetiche (EMC) è in larga misura equivalente ai problemi di coesistenza in precedenza citati. In realtà, il nodo wireless non è in grado di distinguere tra una riduzione della qualità del segnale causata dalla sovrapposizione di un'altra rete wireless da quella risultante da interferenze di altro tipo.

È interessante notare come, nella banda da 2,4 GHz, l'interferenza EMC causata da macchinari industriali sia spesso minima. Molto più grave può essere la presenza di un forno a microonde, specie se di bassa qualità e perciò non perfettamente schermato, nelle vicinanze di una rete wireless.

Le stesse tecniche già citate a proposito di coesistenza ed integrità contribuiscono a ridurre anche la sensibilità alle interferenze EMC. In aggiunta, si dovrebbe sempre evitare di lavorare al livello minimo di segnale permesso dalla sensibilità del dispositivo; un buon margine di sensibilità – anche a costo di una certa riduzione della distanza di comunicazione – permette di migliorare in modo sensibile la tolleranza alle interferenze.

I protocolli wireless considerati forniscono una misura della "qualità" del segnale al livello di ogni singolo "link" della rete Mesh; tale misura tiene conto sia dell'intensità segnale ricevuto che del BER del link, e permette di valutare il "margine di sicurezza" disponibile.

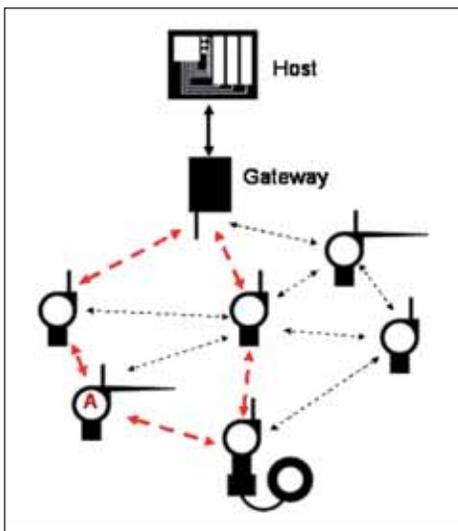
Tolleranza "guasti"

Come "guasto" intendiamo sia il guasto fisico di un nodo wireless sia la presenza *transitoria* di un'ostruzione che renda impossibile la comunicazione diretta tra due nodi wireless (o di una forte interferenza localizzata in un punto specifico della rete).

Una buona tolleranza a guasti di questo tipo è garantita dalla topologia stessa di una rete Mesh, e dal fatto che ogni nodo della rete può anche agire come router per gli altri nodi e non solo come "nodo finale" associato ad una funzione specifica.

I protocolli wireless in questione garantiscono la formazione di una rete Mesh con almeno due percorsi alternativi tra "nodo" e "nodo" (cfr figura); inoltre, è anche possibile una riorganizzazione dinamica della topologia di base della rete stessa.

La capacità di una rete Mesh di "bypassare" con una certa facilità problemi localizzati è in effetti uno dei maggiori punti di forza di questa topologia



Batterie primarie al litio

Le batterie al litio sono in questo momento una delle scelte preferenziali per alimentazione dei dispositivi wireless del tipo qui considerato. Vale perciò la pena di accennare brevemente

a prestazioni ed affidabilità con riferimento specifico a tali batterie. In particolare, ci riferiremo in seguito alle batterie primarie al litio a bassa scarica in tecnologia "lithium thionyl chloride" (3,6 V) in quanto di gran lunga le più adatte all'applicazione in questione.

Prestazioni

Le batterie primarie al litio garantiscono una capacità molto elevata (fino a 20 Ah per una cella di tipo D) ed una tensione – 3 V sotto carico – ideale per un'alimentazione diretta di componenti integrati "low-power".

La tecnologia auto-passivante di queste batterie riduce la corrente di autoscarica – a temperatura ambiente – a livelli quasi trascurabili; ad alte temperature, l'autoscarica aumenta leggermente ma è comunque compatibile con una durata applicativa e/o di immagazzinamento vicina ai 10 anni.

Le batterie sono infine caratterizzate per un funzionamento su una gamma di temperature industriale che – accentuando una certa riduzione di prestazioni – può estendersi da -40 °C fino a +80 °C.

Affidabilità

Le batterie al litio del tipo considerato possono ormai considerarsi altamente affidabili, sia per quanto riguarda la tecnologia di base che come livello qualitativo attualmente raggiunto.

Inoltre, tali batterie possono resistere a prove di caduta a di impatto senza danneggiarsi in modo rilevante e senza rilasciare sostanze chimiche pericolose.

Infine, le batterie "lithium thionyl chloride" sono adatte ad applicazioni in aree a rischio di esplosione (Zona I Atex o equivalenti) in quanto risultano intrinsecamente sicure (Exi) se inserite in un sistema elettronico di adeguata progettazione.

Unico aspetto potenzialmente negativo relativo a questo tipo di batterie riguarda la tendenza alla crescita della resistenza interna in caso di mancato utilizzo – o di utilizzo con correnti molto basse – per lunghi periodi di tempo; tale comportamento è più pronunciato ad alte temperature.

Se tale caratteristica delle batterie al Litio auto-passivanti non viene opportunamente considerata in fase di progetto, un picco elevato di corrente – quale può verificarsi in alcune fasi operative – può fare cadere la tensione operativa sotto il limite minimo tollerabile dal circuito alimentato, causando un reset spurio dello stesso.

Tale comportamento delle batterie al Litio e peraltro ormai ben caratterizzato (cfr diagramma, relativo a varie versioni di batteria), e tutti i dispositivi wireless di recente progettazione ne tengono presumibilmente conto. Sono inoltre possibili tecniche di depassivazione automatiche tali da minimizzare ulteriormente il problema. ■