



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in
INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

**Analisi e studio di fattibilità di
architetture di comunicazione
per reti di sensori operanti in
tecnologia IEEE 802.15.4/IEEE
802.15.4a**

Tesi di Laurea di

Vanni Bacci

Relatori:

Prof. Romano Fantacci

Prof. Enrico Del Re

Ing. Francesco Chiti

Ing. Simone Morosi

Ing. Zach Shelby

Anno Accademico 2004/2005

Ringraziamenti

In queste righe colgo l'occasione di ringraziare tutti coloro che mi hanno supportato e incoraggiato durante lo svolgimento di questo lavoro e nei miei anni di vita universitaria.

Ringrazio gli amici del Centre for Wireless Communication (CWC) di Oulu per avermi dato la possibilita' di svolgere questa meravigliosa esperienza in un'incredibile Finlandia.

Ringrazio inoltre l'Ing. Francesco Chiti e l'Ing. Simone Morosi dell'Universita' di Firenze per il loro prezioso aiuto nel momento del bisogno.

Ringrazio infine i miei genitori che mi hanno permesso di arrivare a questo traguardo e tutti i miei amici.

Vanni

Indice

Elenco delle figure	iv
Elenco delle tabelle	vii
1 Introduzione	1
1.1 Cos'è l'UWB?	1
1.2 Scopo della ricerca	4
1.3 Panoramica sulla tesi	4
2 Panoramica sull'UWB	6
2.1 Il livello fisico dell'UWB	7
2.1.1 Sistemi IR-UWB	8
2.1.2 Sistemi MC-UWB	12
2.2 Medium Access Control	16
2.2.1 Protocolli contention-free	17
2.2.2 Protocolli ad accesso casuale	21
3 MAC per sistemi UWB	27
3.1 IEEE Std 802.15.4 LDR	27
3.1.1 Panoramica generale	27
3.1.2 Panoramica funzionale	31

3.1.3	Descrizione funzionale	38
3.2	MAC LDR con Location/Tracking per tecnologia UWB	44
3.2.1	Panoramica generale	44
3.2.2	Panoramica funzionale	46
3.2.3	Descrizione funzionale	48
3.3	Protocollo MAC LDR per applicazioni Location/Tracking per tecnologia UWB	53
3.3.1	Panoramica generale	53
3.3.2	Panoramica funzionale	55
3.3.3	Descrizione funzionale	59
4	Analisi e Simulazione	62
4.1	Modello energetico per UWB MAC	62
4.1.1	Analisi energetica dei MAC	63
4.2	Simulazione	70
4.2.1	Introduzione al simulatore NS-2	70
4.2.2	Il modello NS-2 dell'IEEE Std 802.15.4	71
4.2.3	L'algoritmo Directed Diffusion	73
4.2.4	Descrizione della simulazione	74
5	Risultati	76
5.1	Risultati dell'analisi energetica	76
5.2	Risultati delle simulazioni	79
6	Conclusioni	91
6.1	Conclusioni	91
6.2	Sviluppi Futuri	93
	Bibliografia	94

Elenco delle figure

1.1	Maschera spettrale FCC per applicazioni UWB	3
2.1	Il modello di riferimento ISO-OSI	8
2.2	Spettro di un impulso Monociclo Gaussiano per segnali UWB	9
2.3	Impulso Gaussiano seno-modulato	10
2.4	Schemi di modulazione per l'IR-UWB	12
2.5	Diagramma a blocchi di un trasmettitore DS-SS	13
2.6	Diagramma a blocchi di un trasmettitore TH-SS	13
2.7	Spettro di un segnale MC-UWB basato sulla OFDM	14
2.8	Allocazione delle sottobande per la banda di frequenza 3.1-4.8 GHz	16
2.9	Topologie a stella e peer-to-peer	17
2.10	Struttura a frame della TDMA	18
2.11	Struttura a frame della FDMA	19
2.12	Struttura a frame della CDMA	20
2.13	Protocollo ALOHA puro	22
2.14	Protocollo ALOHA slotted	23
2.15	Throughput per ALOHA puro e slotted	23
2.16	Throughput per un sistema CSMA	25
2.17	Problemi del nodo nascosto (a) e nodo esposto (b)	26

3.1	Struttura del superframe	31
3.2	Struttura del superframe con GTS	32
3.3	Comunicazione (a) verso (b) da il coordinatore, rete con beacon	34
3.4	Comunicazione (a) verso (b) da il coordinatore, reti senza beacon	35
3.5	Struttura del frame di beacon	36
3.6	Struttura del frame dati	36
3.7	Struttura del frame di riscontro ACK	37
3.8	Struttura del frame di comando MAC	37
3.9	Struttura del superframe PULSERS	47
3.10	Struttura del frame di posizionamento del PULSERS	48
3.11	Struttura a cluster dell'UWEN	55
3.12	Struttura del superframe UWEN	57
3.13	Struttura del frame del sensore mobile dell'UWEN	58
3.14	Struttura del frame di beacon dell'UWEN	59
3.15	Struttura del frame dell'AP dell'UWEN	59
4.1	Modello energetico in trasmissione per il protocollo CSMA/CA.	63
4.2	Modello energetico in trasmissione per il protocollo ALOHA slotted.	67
4.3	Visione d'insieme semplificata del simulatore NS	71
4.4	Modello NS-2 dell'IEEE Std 802.15.4	72
4.5	Schema semplificato per l'algoritmo directed diffusion	73
5.1	Comparazione dell'energia dissipata media in trasmissione . .	77
5.2	Comparazione delle prestazioni per reti senza beacon a diffe- renti data rate, prima simulazione	81
5.3	Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 250kbps, prima simulazione	83

5.4	Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 1Mbps UWB, prima simulazione	84
5.5	Comparazione delle prestazioni per reti senza beacon a differenti data rate, seconda simulazione	87
5.6	Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 250kbps, seconda simulazione	88
5.7	Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 1Mbps UWB, seconda simulazione	89

Elenco delle tabelle

4.1	Parametri dei due ricetrasmittitori	75
-----	---	----

Acronimi e Abbreviazioni

ACK	Acknowledgment
AP	Access Point
BAN	Body Area Network
CA	Collision Avoidance
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CD	Collision Detection
CDMA	Code Division Multiple Access
CFP	Contention Free Period
CSMA	Carrier Sensing Multiple Access
CTS	Clear To Send
DCF	Distributed Coordinator Function
DLL	Data Link Layer
DS	Direct Sequence

DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
EIRP	Effective Isotropically Radiated Power
FCC	Federal Communications Commission
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFD	Full Function Device
FIFO	First In, First Out
GTS	Guaranteed Time Slot
HDR	High Data Rate
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Inactive Period
IR-UWB	Impulse Radio UWB
ISO	International Standard Organization
LDR	Low Data Rate
LDR-LT	LDR with Location/Tracking
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MFR	MAC Footer

MHR	MAC Header
MLME	MAC Layer Management Entity
MB-OFDM	MultiBand OFDM
MC-UWB	Multi-Carrier UWB
MPDU	MAC Protocol Data Units
MSDU	MAC Service Data Unit
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSI	Open System Interconnection
OWR	One Way Ranging
PAN	Personal Area Network
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PDA	Personal Digital Assistant
PHY	Physical Layer
PHR	PHY Header
PLME	Physical Layer Management Entity
PN	Pseudo-Noise
POS	Personal Operating Space
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PPM	Pulse Position Modulation

PSDU	PHY Service Data Unit
PULSERS	Pervasive Ultra-wideband Low Spectral Energy Radio System
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RNG	Ranging
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTS	Request To Send
SAP	Service Access Point
SHR	Synchronization Header
SS	Spread Spectrum
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference Of Arrival
TOA	Time Of Arrival
TWR	Two Way Ranging
TH	Time Hopping
UWB	Ultra-WideBand
UWEN	UWB Wireless Embedded Systems

VHDR Very High Data Rate

WPAN Wireless Personal Area Network

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Cos'è l'UWB?

Storicamente l'Ultra-WideBand (UWB) si riferisce alle tecniche di radio-comunicazione che disperdono un segnale su uno spettro di frequenze molto ampio con una densità di potenza spettrale estremamente ridotta (possono lavorare al livello del rumore).

Secondo l'enunciazione della Federal Communications Commission (FCC) [1] un dispositivo radio UWB è definito come un dispositivo con un'ampiezza di banda frazionale (rapporto fra la larghezza di banda assoluta del segnale e la sua frequenza centrale) maggiore di 0.20 o con una occupazione di banda di 500 MHz o più'.

Traducendo le suddette definizioni in formule matematiche

$$B_F = B/f_C = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L) > 0.2 \quad (1.1)$$

dove f_H è la frequenza superiore misurata a -10 dB e f_L è la frequenza inferiore anche essa misurata a -10 dB. La frequenza centrale è definita

come

$$f_C = (f_H - f_L)/2 \quad (1.2)$$

e, secondo l' FCC, la minima larghezza di banda richiesta per un dispositivo UWB e'

$$B = f_H - f_L > 500MHz. \quad (1.3)$$

Queste condizioni significano che i sistemi UWB con una frequenza centrale maggiore di 2.5 GHz hanno bisogno di una larghezza di banda a -10 dB di almeno 500 MHz mentre i sistemi che lavorano con una frequenza centrale inferiore a 2.5 GHz hanno bisogno di una larghezza di banda frazionale di almeno 0.20.

L'FCC il 14 Febbraio 2002 ha approvato una maschera spettrale per le frequenze consentite per il funzionamento dei dispositivi UWB [1]. E' evidente che la maggior parte dello spettro consentito risiede fra 3.1 e 10.6 GHz con un Effective Isotropically Radiated Power (EIRP) consentito di -41.3 dBm/MHz.

Questi vincoli possono essere soddisfatti con sistemi Impulse Radio UWB (IR-UWB) o con sistemi Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Anche i sistemi MultiBand OFDM (MB-OFDM) sono adatti per soddisfare le regolamentazioni della FCC. Questi sistemi saranno descritti con maggiore dettaglio nella Sezione 2.1.

Quindi, con gli appropriati standard tecnologici, i dispositivi UWB possono operare usando spettri occupati da servizi radio preesistenti senza causare interferenza. Inoltre, la notevole ampiezza della larghezza di banda e il

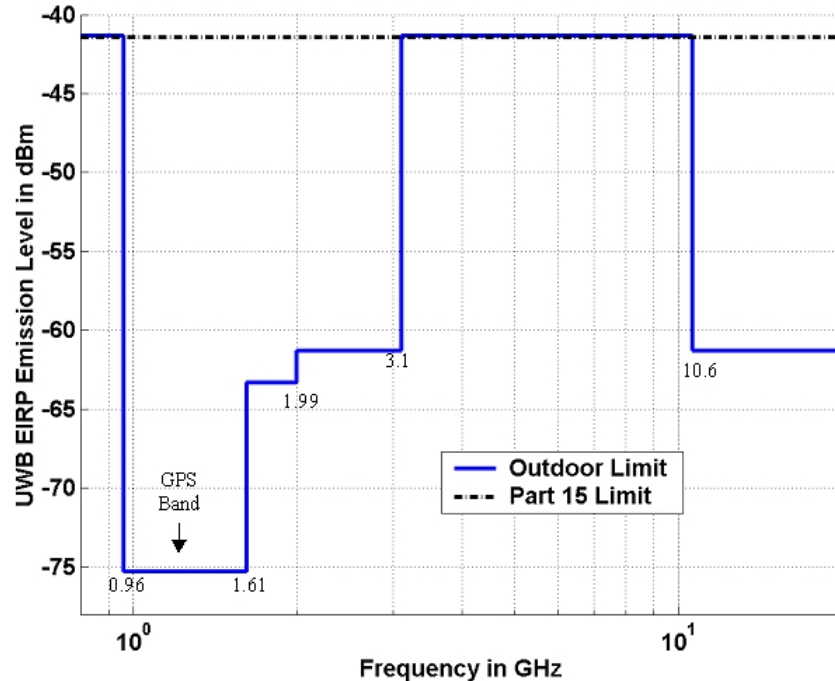


Figura 1.1: Maschera spettrale FCC per applicazioni UWB

potenziale basso costo per la realizzazione dei dispositivi basati sulla tecnologia UWB la rendono adatta ad una larga gamma di applicazioni, quali reti ad alta velocita' cosi' come reti di sensori a bassa velocita' e dispositivi Wireless Personal Area Network (WPAN). Una crescente richiesta di applicazioni risiede nel campo delle periferiche wireless per laptop, telefoni mobili e Personal Digital Assistant (PDA). Questo genere di applicazioni risultano attraenti per il tipo di alimentazione (a batteria, senza un'alimentatore esterno) e per la possibilita' di sincronizzare dati automaticamente senza un intervento esterno.

Nei sensori e nei dispositivi WPAN la batteria e' relativamente un componente ad alto costo, cosi' l'intero sistema deve essere sviluppato con un'attenzione particolare riguardo il consumo di potenza. Lo standard Institute

of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.15.4 describe un sistema Low Data Rate (LDR) veramente a basso costo con un consumo di potenza estremamente ridotto [2].

1.2 Scopo della ricerca

La ricerca e sviluppo di dispositivi economici e a bassa potenza, che possano integrarsi nei dispositivi di uso quotidiano e, nel caso di reti di sensori, possano fornire soluzioni innovative per applicazioni industriali, e' attualmente di grande interesse. Di conseguenza, lo scopo di questa ricerca e' analizzare quattro differenti protocolli Medium Access Control (MAC), UWB e non, usati nei dispositivi LDR dal punto di vista del consumo energetico. Il lavoro sara' svolto usando un modello di analisi energetica per MAC multi-hop [3].

Simulazioni e risultati saranno inoltre prodotti usando il simulatore NS-2 per analizzare le prestazioni dell'algoritmo di routing Directed Diffusion su dispositivi IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.4a e PULSERS nelle reti di sensori.

1.3 Panoramica sulla tesi

La tesi e' organizzata come segue.

Il *Capitolo 1* e' questo capitolo, contiene una breve descrizione dell'UWB e le finalita' della ricerca.

Il *Capitolo 2* descrivera' alcuni Physical Layer (PHY) usati nei dispositivi UWB e introdurra' il lettore ai piu' comuni MAC.

Il *Capitolo 3* mostrera' i tre MAC sotto esame fornendo una breve descrizione delle capacita' di ciascuno. Questi MAC saranno poi ripresi nello svolgimento

delle simulazioni e dell'analisi del prossimo capitolo.

Il *Capitolo 4* illustrerà il lavoro di analisi e il simulatore utilizzato con le adeguate impostazioni.

Il *Capitolo 5* metterà in evidenza i risultati dell'analisi e della simulazione effettuata nel precedente capitolo.

Il *Capitolo 6* fornirà infine le conclusioni emerse dall'analisi dei risultati prodotti nel capitolo precedente ed elencherà alcuni possibili sviluppi futuri.

La *Bibliografia* concluderà il documento fornendo informazioni aggiuntive sui testi di riferimento.

Capitolo 2

Panoramica sull'UWB

Alla fine degli anni '70 l'International Standard Organization (ISO), cercando di unificare le comunicazioni fra reti progettate da diversi produttori, sviluppo' un modello standardizzato chiamato Open System Interconnection (OSI) [4, pp.425-432].

Il modello divide le funzioni di un protocollo su una serie di livelli. Ciascun livello ha la proprieta' di potere usare solo le funzioni del livello sottostante e fornisce le proprie funzionalita' al livello sovrastante. Un sistema che implementa una modalita' di funzionamento del protocollo tramite una serie di questi livelli e' conosciuto come 'pila protocollare' o, piu' semplicemente, 'pila'. Le pile protocollari possono essere implementate sia in hardware che in software, oppure come combinazione di entrambi. Tipicamente, solo i livelli piu' bassi sono implementati in hardware, mentre i livelli piu' alti sono implementati in software.

Inoltre, ci sono anche degli standard per interfacciare i differenti livelli per farli comunicare con quelli sovrastanti o sottostanti. I comandi e le risposte che i livelli usano per comunicare attraverso l'interfaccia sono chiamate *primitive*. Ci sono quattro primitive:

- Richiesta,
- Indicazione,
- Risposta,
- Conferma.

Tutti i livelli usano queste quattro primitive per controllare ogni loro interazione attraverso le interfacce che li dividono. Con queste regole il modello permette il disegno di pile protocollari complesse ma altamente affidabili.

Lo standard di comunicazione IEEE 802 definisce solo i 2 livelli inferiori del modello di riferimento OSI: il livello fisico PHY e il Data Link Layer (DLL).

Al giorno d'oggi tutti i dispositivi di comunicazione seguono il modello OSI o con piccole differenze (*i.e.*, la pila protocollare semplificata a 5 livelli).

La Figura 2.1 mostra il modello OSI a 7 livelli.

2.1 Il livello fisico dell'UWB

Il livello PHY gestisce l'interazione fra il livello superiore e il mezzo trasmissivo ed e'incaricato di controllare il ricetrasmittitore radio, rivelare l'energia, la qualita' del collegamento, modulare e trasmettere/ricevere i pacchetti dei messaggi attraverso il mezzo trasmissivo.

Attualmente, ci sono due metodi principali per creare un segnale UWB. Il primo metodo funziona utilizzando impulsi di durata estremamente breve per trasportare l'informazione. Questo metodo e' chiamato Impulse Radio UWB (IR-UWB).

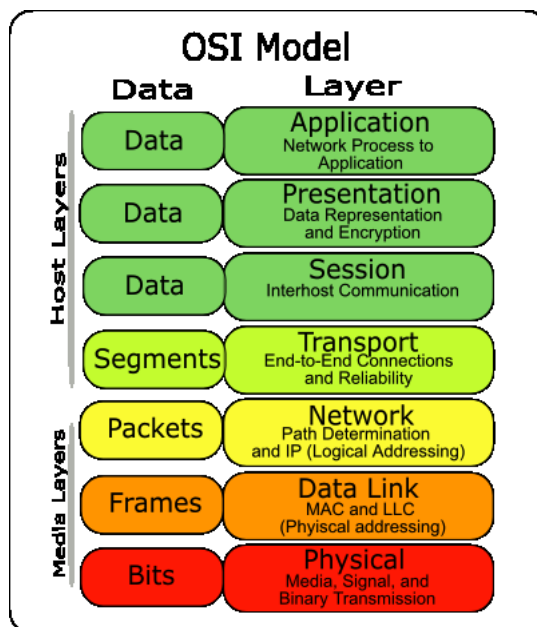


Figura 2.1: Il modello di riferimento ISO-OSI

Il secondo metodo impiega simultaneamente portanti multiple per trasmettere i dati ed e' chiamato Multi-Carrier UWB (MC-UWB).

Entrambi i metodi sono adatti per le comunicazioni UWB e la scelta di uno di essi per lo sviluppo dei dispositivi e' essenzialmente dipendente dall'applicazione a cui il dispositivo sara' destinato.

2.1.1 Sistemi IR-UWB

Un dispositivo IR-UWB funziona utilizzando impulsi di durata estremamente breve, generalmente impulsi Gaussiani, per trasportare l'informazione.

Il modello base per un treno di impulsi IR-UWB non modulato e'

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i p(t - iT_F) \quad (2.1)$$

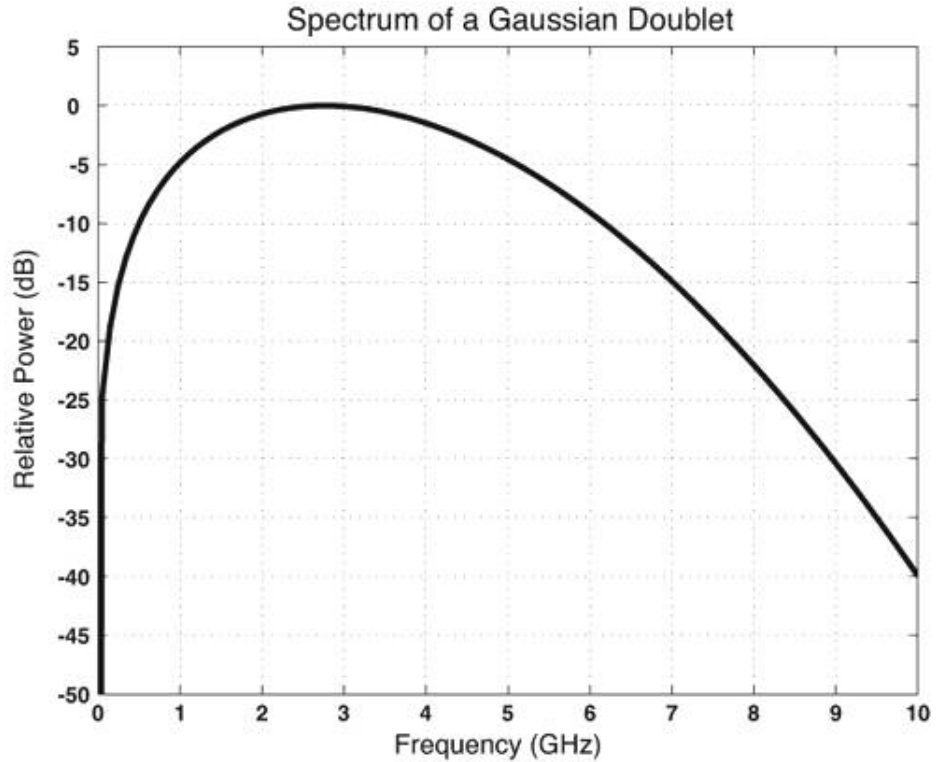


Figura 2.2: Spettro di un impulso Monociclo Gaussiano per segnali UWB

dove $A_i(t)$ e' l'ampiezza dell'impulso, $p(t)$ e' la forma dell'impulso con l'energia normalizzata e T_F e' la durata dell'impulso.

Un impulso Gaussiano e' descritto analiticamente come

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(t-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (2.2)$$

dove σ e' la deviazione standard dell'impulso Gaussiano in secondi e μ e' la posizione nel tempo del punto medio dell'impulso Gaussiano in secondi.

Un'altra forma utilizzata e' la derivata prima dell'impulso Gaussiano, questo perche' un'antenna UWB antenna puo' derivare l'impulso Gaussiano generato rispetto al tempo, portandoci alla seguente forma dell'impulso (assumendo

$\mu = 0$)

$$p(t) = \left(\frac{32k^6}{\pi} \right) t e^{-(kt)^2} \quad (2.3)$$

dove k e' una costante che determina la larghezza dell'impulso.

Sfortunatamente questi due impulsi non rientrano completamente nella maschera spettrale della FCC (banda 3.1-10.6 GHz), cosi' le precedenti forme d'impulso non possono essere usate per sistemi commerciali.

Una forma d'impulso piu' utile in questo senso e' l'impulso Gaussiano seno-modulato

$$p(t) = \left(\frac{8k}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{\sqrt{1 + e^{\frac{2\pi^2 f_C^2}{k}}}} e^{-(kt)^2 \cos(2\pi f_C t)} \quad (2.4)$$

dove f_C e' la desiderata frequenza centrale per l'impulso.

La Figura 2.3 mostra la forma dell'impulso ottenuto.

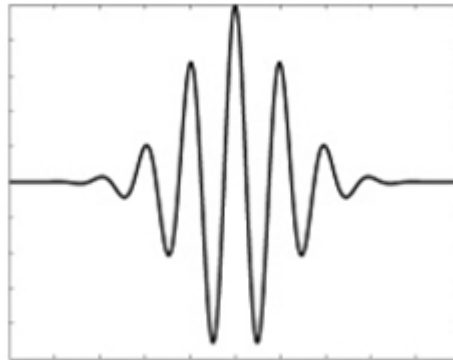


Figura 2.3: Impulso Gaussiano seno-modulato

L'IR-UWB permette svariati schemi di modulazione, includendo la Pulse Amplitude Modulation (PAM) e la Pulse Position Modulation (PPM).

Il primo modifica l'ampiezza dell'impulso secondo il flusso dei dati, analiticamente

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i(t)p(t - iT_F) \quad (2.5)$$

dove $A_i(t)$ rappresenta l'ampiezza dell' i -esimo impulso, il quale dipende dal dato $d_i(t)$ e dallo specifico schema di modulazione.

Il secondo sposta l'impulso leggermente prima leggermente dopo dalla sua posizione ideale in un treno d'impulsi regolarmente spaziatto. Analiticamente

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i(t)p(t - iT_F - \delta d_i(t)) \quad (2.6)$$

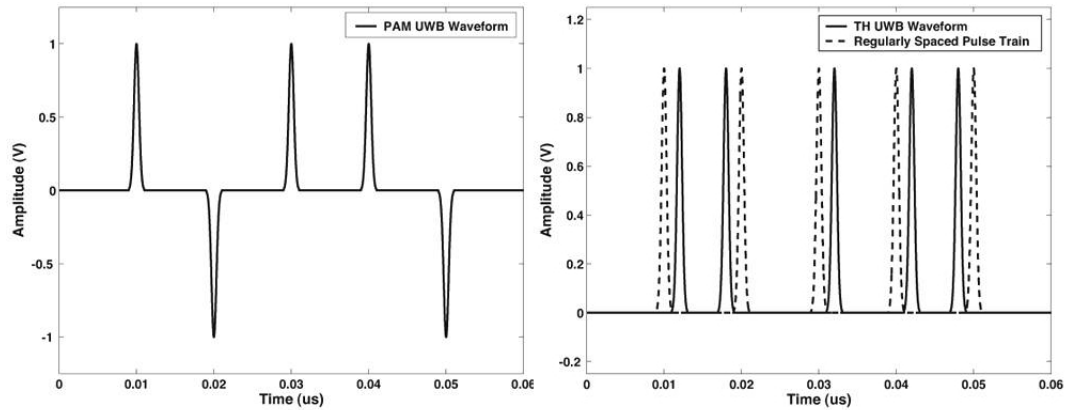
dove $d_i(t)$ e' lo schema di modulazione dell'informazione e d l'incremento di tempo base.

La Figura 2.4 mostra gli effetti di entrambi gli schemi di modulazione.

Dal momento che l'energia del segnale e' allargata su una banda di frequenze larga fino a qualche GHz, questi segnali potrebbero sovrapporsi a molti dispositivi preesistenti a banda stretta o altri dispositivi UWB che formano una piconet. Per evitare questa possibilita e' possibile usare in aggiunta una tecnica Spread Spectrum (SS) come i codici di 'spreading' Direct Sequence (DS) e Time Hopping (TH). Questi, oltre a fornire una certa immunita' verso l'interferenza proveniente da sistemi a banda stretta preesistenti a cui si sovrappone il sistema UWB, forniscono anche la possibilita' per molti utenti di accedere e condividere la banda disponibile.

Nel DS-SS l'informazione modulata che trasporta il segnale e' direttamente modulata da un segnale di codifica digitale a tempo e valore discreto.

La Figura 2.5 mostra un diagramma a blocchi di un trasmettitore DS-SS.



(a) Antipodal Pulse Amplitude Modulation: Positive Pulses Represent a +1 and Negative Pulses Represent a -1.

(b) Time Hop Modulation: Pulses Transmitted After Their Ideal Position Represent a +1 and Pulses Transmitted Prior to Their Ideal Position Represent a -1.

Figura 2.4: Schemi di modulazione per l'IR-UWB

Nel TH-SS il segnale che trasporta i dati e' trasmesso in rapide raffiche ad intervalli di tempo determinati dal codice assegnato a ciascun utente. L'asse dei tempi e' diviso in frames, e ciascun frame e' suddiviso in M slots temporali. Durante ciascun frame l'utente trasmettera in uno degli M slots temporali. In quale di questi M slots temporali e' trasmesso dipende in base al segnale di codifica associato all'utente. Dal momento che un utente trasmette tutti i suoi dati in una volta, invece che in M slots temporali, la frequenza necessaria per la sua trasmissione e' aumentata di un fattore M . Nella Figura 2.6 e' mostrato un diagramma a blocchi per un trasmettitore TH-SS.

2.1.2 Sistemi MC-UWB

I sistemi MC-UWB usano le tecniche OFDM per trasmettere l'informazione. La OFDM e' una tecnica di trasmissione basata sull'idea della Frequency

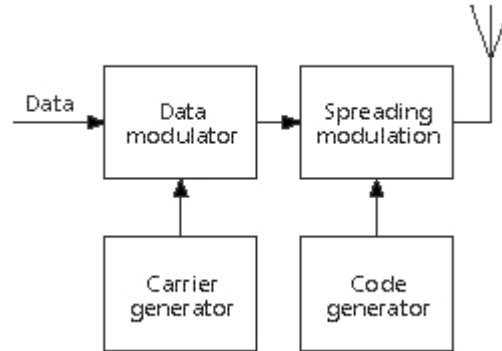


Figura 2.5: Diagramma a blocchi di un trasmettitore DS-SS

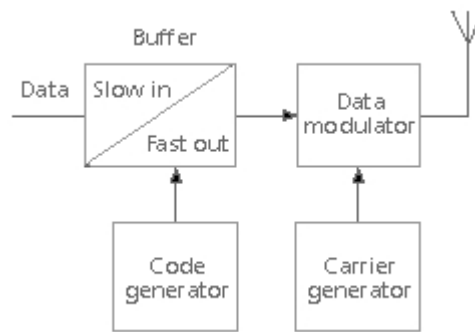


Figura 2.6: Diagramma a blocchi di un trasmettitore TH-SS

Division Multiplexing (FDM) dove differenti segnali provenienti da diversi utenti sono spediti su differenti frequenze. In questo caso il flusso dei dati e' spedito simultaneamente su molteplici portanti ortogonali che si sovrappongono parzialmente e modulate indipendentemente. L'OFDM ha svariate proprieta', quali un'alta efficienza spettrale, un'intrinseca capacita' di recupero dall'interferenza RF, robustezza verso multi-path, e l'abilita' di catturare efficientemente l'energia multi-path. Il segnale OFDM trasmesso $s(t)$ ha la

seguinte forma complessa in banda base

$$s(t) = A \sum_r \sum_{n=1}^N b_n^r p(t - rT_p) e^{j2\pi n f_0 (t - rT_p)} \quad (2.7)$$

dove N e' il numero di sottoportanti, b_n^r e' il simbolo che e' trasmesso durante l' r -esimo intervallo di trasmissione sull' n -esima sottoportante e A e' una costante che controlla la densita' spettrale di potenza trasmessa e determina l'energia per bit. La frequenza fondamentale e'

$$f_0 = \frac{1}{T_p}. \quad (2.8)$$

La Figura 2.7 mostra lo spettro di un segnale basato sulla OFDM.

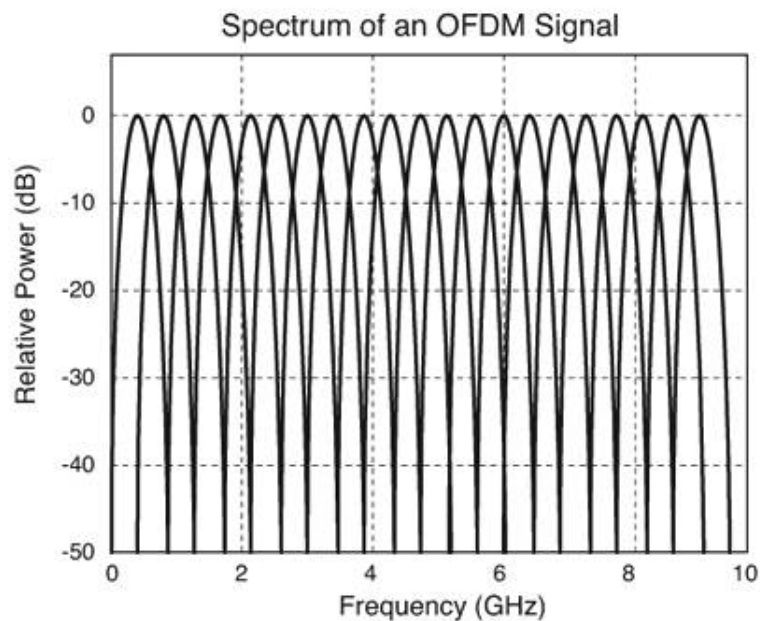


Figura 2.7: Spettro di un segnale MC-UWB basato sulla OFDM

Diversamente dalla OFDM, lo spettro della OFDM-UWB puo' avere spazi tra le sottoportanti.

La OFDM-UWB usa un treno d'impulsi codificati in frequenza come segnale formante. Il treno d'impulsi codificati in frequenza e' definito da

$$p(t) = \sum_{n=1}^N s(t - nT) e^{(-j2\pi c(n)\frac{t}{T_c})} \quad (2.9)$$

dove $s(t)$ e' l'impulso elementare con energia unitaria e durata $T_c < T$, e $p(t)$ ha durata $T_p = NT$. Ogni impulso e' modulato da una frequenza

$$f_n = \frac{c(n)}{T_c} \quad (2.10)$$

dove $c(n)$ e' una permutazione degli interi $1, 2, \dots, N$.

Dal momento che la FCC afferma che un segnale UWB deve occupare un minimo di 500 MHz nella banda a -10 dB, un sistema UWB puo' anche essere ottenuto dividendo l'intero spettro in diverse sottobande, la cui larghezza di banda di ciascuna e' 500 MHz, invece di utilizzare l'intera larghezza di banda per trasmettere l'informazione. Sottoponendo il simbolo ad interleaving attraverso le sottobande, il sistema UWB puo' ancora mantenere la stessa potenza trasmessa come se usasse l'intera banda. L'informazione su ciascuna delle sottobande puo' essere trasmessa usando sia le tecniche IR-UWB che le MC-UWB. Se la seconda tecnica e' scelta l'intero sistema e' denominato MB-OFDM.

La Figura 2.8 mostra l'allocazione delle sottobande per la banda di frequenza 3.1-4.8 GHz.

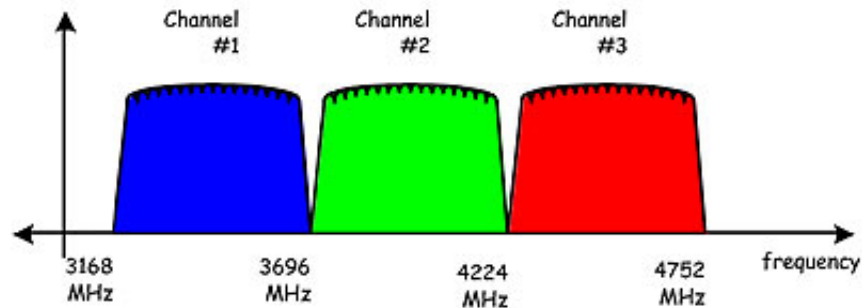


Figura 2.8: Allocazione delle sottobande per la banda di frequenza 3.1-4.8 GHz

2.2 Medium Access Control

Il sottolivello MAC, insieme al sottolivello Logical Link Control (LLC), formano il livello DLL nel modello ISO/OSI. Il livello MAC fornisce il controllo dell'accesso al mezzo trasmissivo su un canale condiviso e una consegna affidabile dei dati.

Per una rete wireless ci sono due topologie principali: la topologia a stella e la maglia peer-to-peer. Nel primo ciascun nodo è connesso con un coordinatore unico che opera come padrone (detto 'master') della rete, che spedisce la segnalazione (dette 'beacon') per la sincronizzazione dei dispositivi e la gestione del mantenimento dell'associazione alla rete. Invece, una topologia peer-to-peer permette a ciascun nodo di comunicare con ciascun altro nodo presente nel suo raggio di comunicazione e di ritrasmettere il messaggio ai nodi al di fuori del proprio raggio di trasmissione attraverso un'instradamento dei messaggi di tipo multi-hop.

Dal momento che è desiderabile un uso ottimale del mezzo per le trasmissioni wireless, una particolare attenzione sarà necessaria per scegliere il protocollo per la condivisione del mezzo trasmissivo perché molti dispositivi possono operare in bande ristrette non regolamentate condivise da altre tecnologie

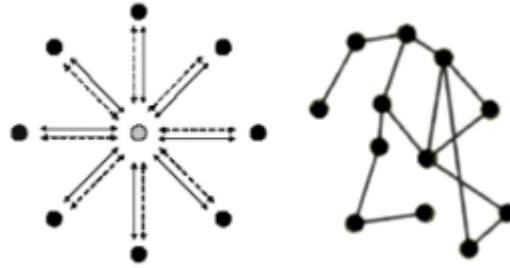


Figura 2.9: Topologie a stella e peer-to-peer

wireless.

Ci sono due principale categorie di protocolli di condivisione del mezzo trasmissivo, i protocolli liberi da contesa (detti 'contention-free protocols') e i protocolli a contesa (detti 'contention protocols'). I primi dividono il canale in piccole parti (*i.e.*, slots temporali, frequenze, codici) e allocano a ciascuna parte un codice assegnato, il secondo non divide il canale, lavora senza una coordinazione *a priori* fra i nodi e permette la presenza di collisioni ma il protocollo stesso sa come rilevarle e comportarsi in loro presenza. Esistono anche protocolli a slot ad-hoc impiegati per applicazioni specifiche, come reti di sensori e Body Area Network (BAN)s.

2.2.1 Protocolli contention-free

TDMA - Time Division Multiple Access

La Time Division Multiple Access (TDMA) e' una tecnica di trasmissione digitale che permette a un certo numero di utenti di accedere ad un singolo canale Radio Frequency (RF) senza causare interferenza allocando un unico slot temporale a ciascun utente sul canale. Gli utenti trasmettono in rapida successione, uno dopo l'altro, ciascuno usando il proprio slot temporale. Questo permette a svariati utenti di condividere lo stesso mezzo trasmissivo

(*i.e.*, collegamento radio) finché usano solamente lo slot che gli è stata assegnato. La Figura 2.10 mostra la struttura a frame della TDMA.

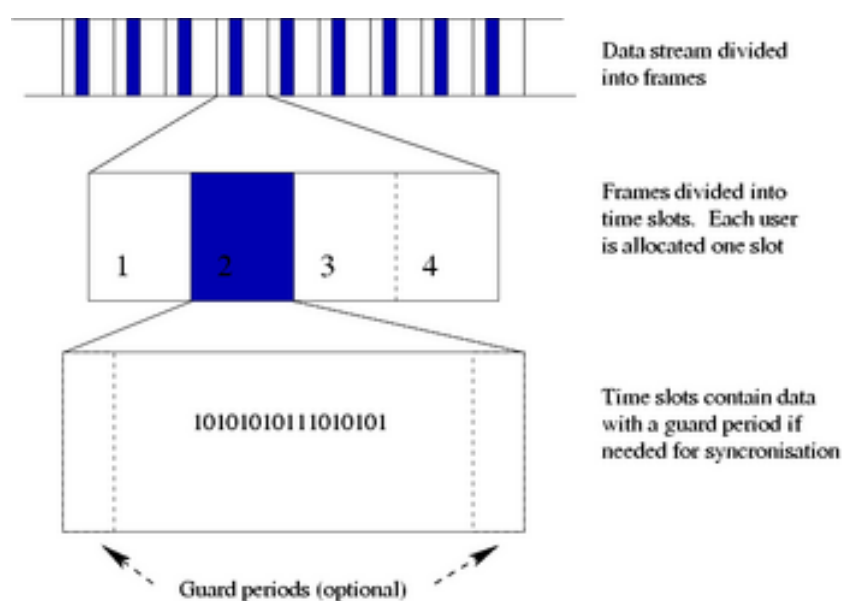


Figura 2.10: Struttura a frame della TDMA

Il flusso dei dati è diviso in frames, ciascun frame contiene un numero di slots temporali pari al numero di dispositivi trasmettenti.

Uno dei punti di forza principali della TDMA è che il ricetrasmittitore necessita solo di ascoltare o trasmettere durante i propri slots temporali e durante il beacon all'inizio di ciascun superframe, mentre per il resto del tempo può eseguire altre attività come la misurazione della qualità del canale o semplicemente configurarsi nello stato di riposo per risparmiare energia.

D'altra parte, uno svantaggio è che ciascuno slot temporale può necessitare di un tempo di guardia per permettere la sincronizzazione e questo limita la capacità potenziale del canale TDMA. È possibile anche creare interferenza ad una frequenza che è direttamente collegata alla durata dello slot temporale. L'utilizzo della TDMA non può prevenire il potenziale spreco di

risorse del canale quando molti dispositivi non trasmettono durante il loro slot temporale.

FDMA - Frequency Division Multiple Access

La Frequency Division Multiple Access (FDMA) e' una tecnica che suddivide la banda di frequenza allocata per la comunicazione in svariati canali, ciascuno di essi puo' trasportare dati trasmessi con tecniche analogiche o numeriche. Ciascun utente trasmette i dati utilizzando il proprio canale. Dal momento che ciascun utente ha la propria porzione di banda per tutto il tempo, la FDMA non necessita di sincronizzazione o controlli di temporizzazione, motivi che la rendono algoritmicamente semplice. Sebbene non ci siano due utenti che usano la stessa banda di frequenza nello stesso istante, sono comunque introdotti degli intervalli di frequenza, dette frequenze di guardia, fra i canali per minimizzare l'interferenza di canale adiacente. La Figura 2.11 mostra la struttura della tecnica FDMA.

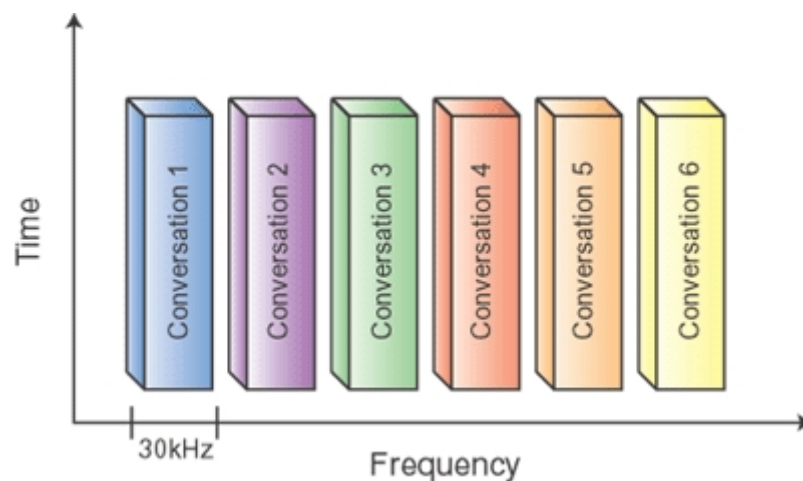


Figura 2.11: Struttura a frame della FDMA

CDMA - Code Division Multiple Access

Nella Code Division Multiple Access (CDMA) ciascun utente ha il proprio codice pseudo-casuale (chiamato anche codice Pseudo-Noise (PN) o 'spreading code') usato per allargare lo spettro in frequenza dei suoi dati su tutta la larghezza di banda del canale. In questo modo e' possibile che svariati dispositivi trasmettano usando la stessa frequenza nello stesso momento senza causare interferenza dannosa. I segnali con il desiderato spreading code e temporizzazione sono ricevuti, mentre i segnali con spreading code differenti (o con gli stessi spreading code ma con offset di temporizzazione diversi) appaiono come rumore di fondo ridotto dal guadagno del processo. La Figura 2.12 mostra la struttura della tecnica CDMA.

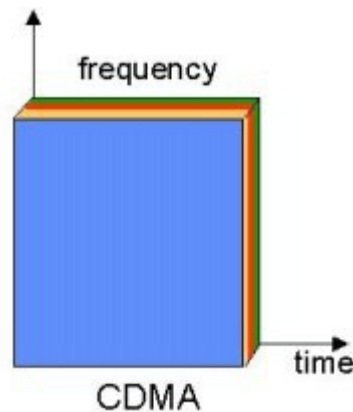


Figura 2.12: Struttura a frame della CDMA

Il principale vantaggio della CDMA rispetto alla TDMA e alla FDMA e' che, dal momento che i codici pseudo-casuali sono praticamente infiniti, permette un numero estremamente alto di comunicazioni simultanee.

D'altra parte, la CDMA non e' in grado di scartare segnali non voluti come fanno le tecniche TDMA e FDMA.

2.2.2 Protocolli ad accesso casuale

ALOHA puro

L'ALOHA puro [5], si riferisce a un semplice schema di comunicazioni in cui ciascuna sorgente nella rete spedisce i dati ogniqualvolta c'è un messaggio da spedire e poi ascolta il canale in attesa dell'Acknowledgment (ACK) che assicura che il messaggio è stato correttamente ricevuto. In questo caso, il prossimo messaggio viene trasmesso. Se, invece, il messaggio non riesce a raggiungere la destinazione, e quindi nessun ACK è stato ricevuto dalla sorgente durante un certo periodo di attesa (detto 'periodo di timeout'), questo viene spedito nuovamente dopo aver atteso un periodo di tempo casuale. Questo protocollo è stato originariamente sviluppato presso l'University of Hawaii per l'utilizzo nei sistemi di comunicazione satellitare nel Pacifico.

In un sistema di broadcast wireless o in un collegamento half-duplex a due vie, l'ALOHA puro funziona perfettamente. Ma quando la rete diventa più complessa, per esempio in sistemi che coinvolgono sorgenti e destinazioni multiple in cui i dati percorrono molte strade alla volta, cominciano a verificarsi problemi a causa delle collisioni. Tanto più il livello di comunicazione è elevato, tanto peggiore il problema delle collisioni diventa. Il risultato di questo è una degradazione dell'efficienza del sistema, perché ogniqualvolta due frame collidono, i dati contenuti in entrambi vengono persi. Sotto queste ipotesi il periodo di vulnerabilità, se T è il tempo di trasmissione per un pacchetto, è $2T$. Come mostrato in Figura 2.13 i primi tre tentativi di trasmissione di alcuni nodi nella rete sono tutti falliti. Solo il nodo B dopo aver atteso un tempo casuale riesce a trasmettere con successo i suoi dati.

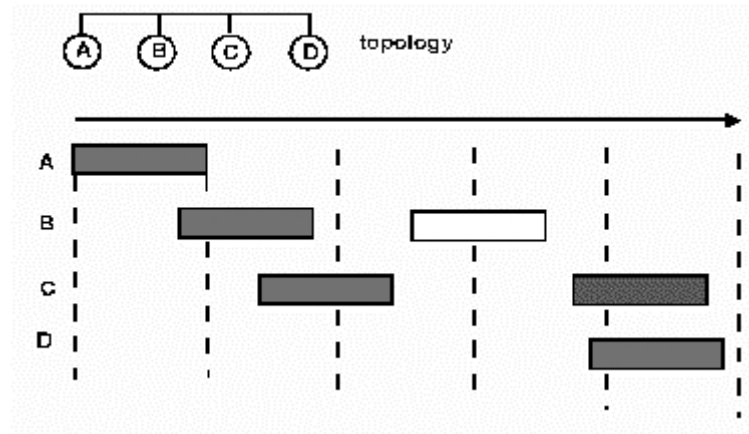


Figura 2.13: Protocollo ALOHA puro

La formula per stimare il throughput S per l'ALOHA puro e'

$$S = Ge^{-2G} \quad (2.11)$$

dove G e' il numero di trasmissioni tentate per unita' di tempo. Quindi, il massimo throughput raggiungibile e' 0.184 ottenuto quando $G = 0.5$.

ALOHA slotted

Facendo una piccola restrizione nella liberta' di trasmissione individuale dei dispositivi, il throughput del protocollo ALOHA puo' essere raddoppiato [6]. Assumendo la lunghezza dei pacchetti costante, il tempo di trasmissione e' limitato in slot temporali equivalenti alla durata di trasmissione di un singolo pacchetto. I dispositivi sono abilitati a trasmettere solo agli inizi di ciascuno slot. Quando un pacchetto collide, si sovrapporra' completamente invece che parzialmente. Quindi, ora, se T e' il tempo di trasmissione per un pacchetto, il periodo di vulnerabilita' e' solo T . La Figura 2.14 mostra come funziona lo ALOHA slotted.

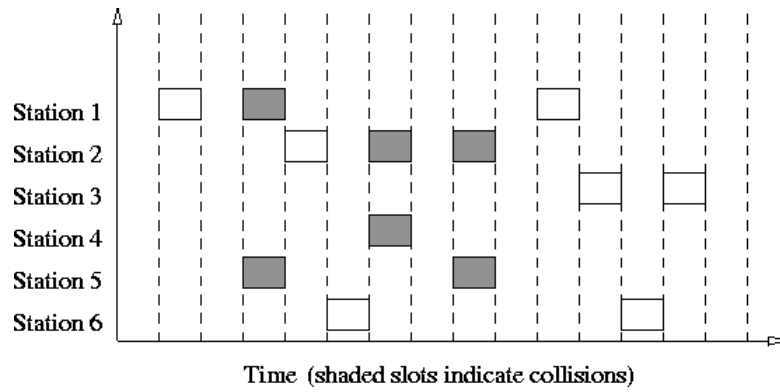


Figura 2.14: Protocollo ALOHA slotted

Questo metodo, conosciuto come ALOHA slotted, ha l'effetto di raddoppiare l'efficienza del protocollo ALOHA puro

$$S = Ge^{-G} \tag{2.12}$$

La Figura 2.15 mostra il grafico del throughput per un sistema ALOHA puro e per un sistema Slotted ALOHA.

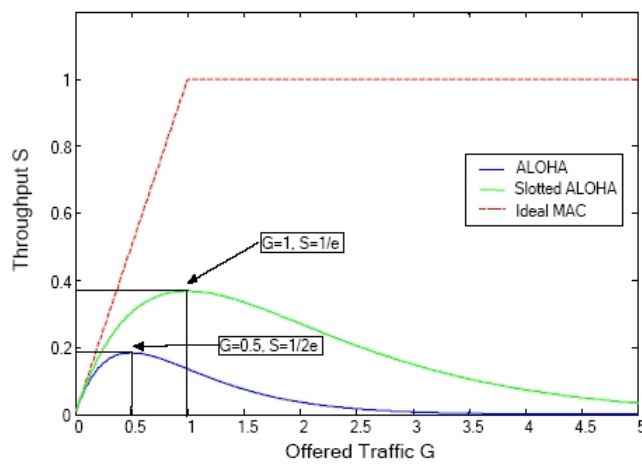


Figura 2.15: Throughput per ALOHA puro e slotted

CSMA - Carrier Sense Multiple Access

Dal momento che nelle reti con elevato carico l'utilizzo dei protocolli ALOHA non e' efficace a causa delle collisioni, un altro protocollo e' introdotto per raggiungere migliori prestazioni. L'idea principale e' di ascoltare il canale prima di trasmettere per evitare le collisioni. Questo metodo e' conosciuto come Carrier Sensing Multiple Access (CSMA) [7] ed e' attualmente impiegato assieme al meccanismo Collision Avoidance (CA) [8] nelle reti IEEE Std 802.11 Distributed Coordinator Function (DCF) [9].

Quando un terminale **A** ha dei pacchetti da trasmettere, prima di iniziare la trasmissione ascolta il canale. Se un altro terminale **B** sta gia' trasmettendo, il terminale **A** si accorgera' della trasmissione di **B** posponendo la propria trasmissione dopo un periodo di tempo casuale. Quando **A** rileva il canale senza trasmissioni in atto per un periodo di tempo predefinito, assume che il canale sia disponibile e comincia a trasmettere.

Sfortunatamente, le collisioni sono sempre possibili a causa del tempo di propagazione. Se il pacchetto emesso da **B** si propaga verso **A** dopo che la fase di test del canale si e' conclusa allora **A**, assumendo il canale libero, iniziera' a trasmettere i propri dati creando una collisione. Questo metodo conduce ad un throughput S uguale a

$$S = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}} \quad (2.13)$$

dove a e' il tempo di propagazione fra **A** e **B**. Poiche' il ritardo di propagazione e' differente per ciascuna coppia di terminali, il throughput e' valutato con il parametro a impostato al piu' grande ritardo all'interno della rete (normalizzato alla durata del pacchetto), ottenendo cosi' un limite inferiore

per le prestazioni del sistema. La Figura 2.16 mostra il throughput per un sistema CSMA in relazione a differenti valori del tempo di propagazione.

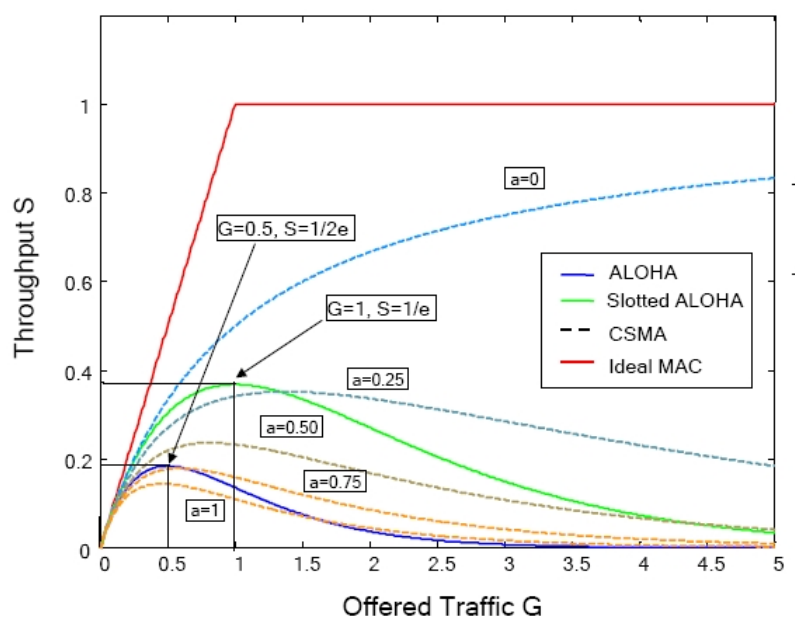


Figura 2.16: Throughput per un sistema CSMA

Per migliorare il throughput in un sistema cablato si utilizza una variazione dello standard CSMA, chiamata CSMA/CD. In questo caso i nodi che stanno trasmettendo sono in grado di accorgersi di una collisione in atto e fermano immediatamente la trasmissione, aspettando di ritrasmettere il dato per un periodo di tempo casuale prima di tentare nuovamente. Questo si traduce in un uso molto più efficiente del mezzo trasmissivo dal momento che non si spreca l'intero periodo di trasmissione di un frame.

Le prestazioni del CSMA possono significativamente essere ridotte in presenza di due fenomeni chiamati 'terminale nascosto' e 'terminale esposto'. Il primo accade quando un nodo **S** sta trasmettendo ad un altro nodo **D** e un terzo nodo **H**, che non può accorgersi della trasmissione del nodo **S** (*i.e.*, a causa della copertura radio limitata), inizia la propria trasmissione creando

una collisione nel nodo **D**.

Il secondo si verifica quando la trasmissione del nodo **S1** verso **D1** sovrappone un altro nodo **S2** che, rilevando il canale occupato, ritarda la propria trasmissione anche se vuole trasmettere ad un quarto nodo **D2** non raggiungibile dal primo nodo, quindi la trasmissione non può essere attivata senza creare alcuna collisione.

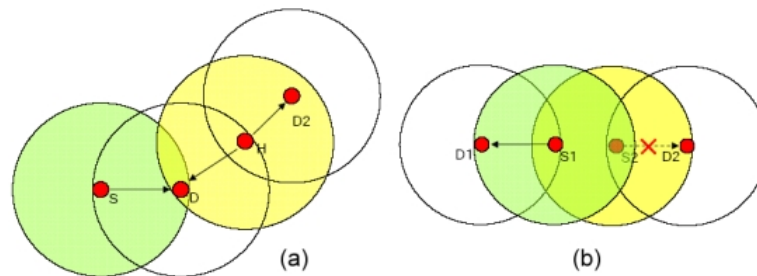


Figura 2.17: Problemi del nodo nascosto (a) e nodo esposto (b)

La Figura 2.17 mostra i problemi del nodo nascosto e del nodo esposto.

Un meccanismo per risolvere il problema del terminale nascosto è utilizzato nei protocolli CSMA/CA dove un nodo trasmittente cerca di evitare le collisioni trasmettendo un breve segnale, Request To Send (RTS), per indicare le sue intenzioni di trasmettere e poi aspetta di ricevere il segnale di risposta, Clear To Send (CTS), dal nodo di destinazione. Quando gli altri nodi vedono il segnale RTS, aspettano per un tempo lungo abbastanza per questa trasmissione prima di tentare di spedire alcun frame. Le collisioni sono comunque possibili e non sono rilevate, quindi valgono le stesse considerazioni per il CSMA puro.

Capitolo 3

MAC per sistemi UWB

3.1 IEEE Std 802.15.4 LDR

3.1.1 Panoramica generale

L'IEEE 802.15 Working Group ha definito tre classi di WPAN che sono diversificate attraverso il data rate, il consumo della batteria e la qualità del servizio QoS. La WPAN ad alto data rate (IEEE Std 802.15.3TM) è adatta per applicazioni multimediali che richiedono un QoS estremamente elevato. Le WPAN a data rate medio (IEEE Std 802.15.1TM/Bluetooth[®]) sono destinate ad applicazioni wireless sostitutive ai cavi per telefonia mobile e PDA con un QoS adatto per applicazioni vocali. L'ultima classe di WPAN (IEEE Std 802.15.4TM) [10] si propone di realizzare applicazioni sensibili al consumo energetico e con requisiti di basso costo non inquadrate nelle altre WPAN e che hanno la necessità di un Quality of Service (QoS) abbastanza flessibile.

L'architettura IEEE Std 802.15.4 segue il modello di riferimento ISO-OSI, così un dispositivo LDR-WPAN comprende un livello PHY, che include il

ricetrasmittitore RF assieme ai meccanismi di controllo a basso livello, e un sottolivello MAC che fornisce l'accesso al canale fisico per tutti i tipi di trasferimento. Lo standard non fornisce alcun tipo di specifica per i livelli superiori, come il livello di rete, che provvede alla configurazione e l'instadamento dei messaggi, e il livello di applicazione, che provvede all'esecuzione delle funzioni che deve svolgere il dispositivo.

Livello PHY

Il livello PHY fornisce due servizi: il servizio dati PHY e il servizio gestionale PHY che si interfacciano al Physical Layer Management Entity (PLME). Il servizio dati PHY permette la trasmissione e la ricezione dei PHY Protocol Data Unit (PPDU) attraverso il canale radio fisico.

La radio opererà in una delle seguenti bande libere da licenza secondo i requisiti regolatori:

- 868-868.6 MHz per un servizio a 20kb/s DSSS (*e.g.*, Europa),
- 902-928 MHz per un servizio a 40kb/s DSSS (*e.g.*, America del Nord)
oppure
- 2400-2482.5 MHz per il servizio più veloce a 250kb/s DSSS (su scala mondiale).

La banda 2400-2482.5 MHz può essere la prima scelta per molte applicazioni IEEE 802.15.4, a causa della sua disponibilità a livello mondiale, specialmente in quelle che hanno a che vedere con viaggi fra regioni a differenti regolamentazioni. D'altra parte, le altre bande possono essere usate come un'alternativa quando l'uso della banda a 2.4 GHz è sconsigliata, a causa della presenza di molti altri servizi operanti in quella banda.

L'IEEE Std 802.15.4 specifica anche un totale di 27 canali a cavallo delle tre bande di frequenza. I canali sono numerati da 0 a 26, un canale e' assegnato alla banda a 860 MHz, 10 canali nella banda a 915 MHz e 16 canali nella banda a 2.4 GHz.

Al momento attuale l'IEEE 802.15 Low Rate Alternative PHY Task Group (TG4a) per WPAN ha definito un progetto per lo sviluppo di un livello PHY alternativo basato su UWB per l'IEEE Std 802.15.4. Il principale interesse e' fornire alle comunicazioni la capacita' di tracciamento e localizzazione ad alta precisione (accuratezza inferiore a 1 metro), un elevato throughput aggregato e un basso consumo energetico; cosi' come aggiungere scalabilita' ai data rate, incrementare il raggio di trasmissione e ridurre i consumi ed i costi.

Livello MAC

Il livello MAC fornisce due servizi: il servizio dati MAC e il servizio gestionale MAC che si interfacciano al MAC Layer Management Entity (MLME) Service Access Point (SAP) (conosciuto come MLME-SAP). Il servizio dati MAC abilita la trasmissione e la ricezione del MAC Protocol Data Units (MPDU) attraverso il servizio dati PHY.

Le caratteristiche del sottolivello MAC sono la gestione del beacon, l'accesso al canale, la gestione dei Guaranteed Time Slot (GTS), la convalida dei frame, la consegna dei frame convalidati, l'associazione e la dissociazione alla rete. In aggiunta, il livello MAC fornisce la possibilita' di implementare meccanismi di sicurezza appropriati per l'applicazione.

Per permettere l'implementazione di dispositivi estremamente semplici

che richiedono costi estremamente bassi e risorse hardware minime, l'IEEE 802.15.4 definisce due tipi di dispositivi, i dispositivi Full Function Device (FFD) ed i dispositivi Reduced Function Device (RFD). Quelli FFD contengono il set completo dei servizi MAC e permettono al dispositivo di operare come coordinatore di rete o semplicemente come nodo della rete. Quelli RFD contengono un set ridotto dei servizi MAC e un dispositivo RFD puo' solo operare come nodo della rete che comunica unicamente con altri dispositivi FFD e non puo' inoltrare messaggi.

Una rete IEEE 802.15.4 puo' essere una delle seguenti due topologie. La prima e' la topologia a stella (vedere la Sezione 2.2) ed e' formata intorno a un dispositivo FFD che lavora come coordinatore della PAN e agisce come punto centrale con una collezione di altri dispositivi FFD o RFD come nodi terminali. Una topologia a stella puo' essere con o senza beacon, secondo le specifiche della Personal Area Network (PAN). La seconda topologia abilita le comunicazioni peer-to-peer senza il coinvolgimento diretto del coordinatore di rete che e' sempre comunque necessario per creare e mantenere la rete. Dal momento che i dispositivi RFD non possono inoltrare messaggi e quindi possono creare solo singole connessioni verso dispositivi FFD, un dispositivo RFD in una rete peer-to-peer deve essere posizionato solo come terminale periferico.

Senza curarsi del tipo di rete in cui e' impiegato, ciascun dispositivo di rete utilizza il protocollo CSMA-CA per accedere al canale. Fanno eccezione la trasmissione del beacon, la trasmissione nei GTS e i messaggi ACK di riscontro, ciascuno dei quali e' trasmesso senza il processo CSMA-CA.

3.1.2 Panoramica funzionale

Questa sezione fornisce una breve panoramica delle funzioni generali di una LDR-WPAN e include le informazioni riguardanti la struttura del superframe, il modello del trasferimento dei dati e la struttura dei frame dell'IEEE Std 802.15.4.

Struttura del superframe

L'IEEE Std 802.15.4 permette l'uso opzionale di una struttura a superframe. Il formato del superframe è definito dal coordinatore di rete ed è delimitato dai messaggi di beacon trasmessi dai coordinatori ad un intervallo di tempi programmabile. Il superframe è diviso in 16 slot equispaziati e il beacon è trasmesso nel primo slot di ciascun superframe. I beacon sono usati per sincronizzare i dispositivi della rete, identificare la PAN e descrivere la struttura del superframe. Ogni nodo che desidera comunicare durante il Contention Access Period (CAP) fra due beacon consecutivi dovrà competere con gli altri nodi utilizzando una versione slotted del meccanismo CSMA-CA. Tutte le transazioni dovranno essere completate entro la trasmissione del beacon successivo. La Figura 3.1 mostra la struttura base del superframe.

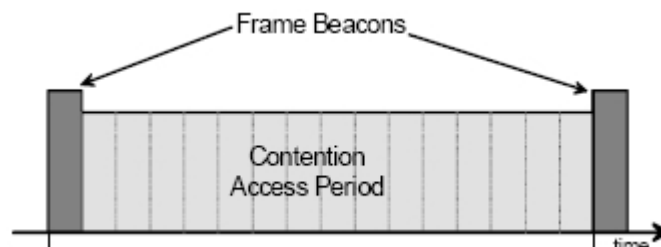


Figura 3.1: Struttura del superframe

In aggiunta, per applicazioni a bassa latenza o per applicazioni che richie-

dono una certa disponibilita' di banda, il coordinatore della PAN puo' dedicargli porzioni della parte attiva del superframe. Queste porzioni sono chiamate Guaranteed Time Slot (GTS). I GTS formano il Contention Free Period (CFP), che appare sempre alla fine della parte attiva del superframe iniziando immediatamente lo slot finale del CAP, come mostrato in Figura 3.2. Il coordinatore della PAN puo' allocare fino a sette di questi GTS e un GTS puo' occupare piu' di un periodo di slot. In ogni caso dovra' rimanere una sufficiente porzione del CAP per consentire l'accesso conteso agli altri dispositivi della rete o per nuovi dispositivi che desiderano unirsi alla rete. Tutte le transazioni a contesa devono essere completate prima dell'inizio del CFP. Inoltre ciascun dispositivo che trasmette in un GTS dovra' assicurarsi che la sua transazione sia completata prima dell'inizio del prossimo GTS o entro la fine del CFP corrente.

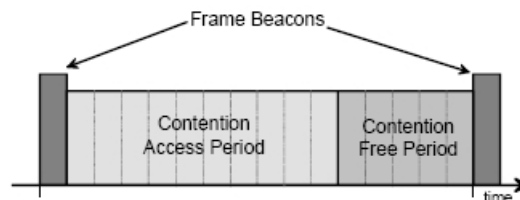


Figura 3.2: Struttura del superframe con GTS

Modelli per il trasferimento dei dati

Il modello per il trasferimento dei dati IEEE Std 802.15.4 dipende dalla topologia di rete in uso. Nelle reti a stella lo scambio di comunicazioni avviene sempre tra il coordinatore della PAN e un nodo della rete mentre nella modalita' peer-to-peer, un dispositivo puo' comunicare con ciascun altro nella sua prossimita'.

Nella topologia a stella ci possono essere due tipi di modelli per il trasferimento dei dati a seconda che la rete funzioni con il beacon o meno.

Per una rete funzionante con il beacon, se un dispositivo vuole trasmettere qualche dato al coordinatore, dovrà prima ricevere il beacon per sincronizzarsi con la struttura del superframe. Nel momento appropriato, il dispositivo trasmetterà il suo frame dati, usando il metodo CSMA-CA slotted, al coordinatore. Poi il coordinatore risconterà la corretta ricezione dei dati trasmettendo un opzionale frame di riscontro.

Se il coordinatore vuole trasmettere i dati ad un dispositivo in una rete funzionante con il beacon, dovrà indicare all'interno del beacon che ci sono alcuni messaggi pendenti. I dispositivi periodicamente ascolteranno il beacon e, se un messaggio è pendente, trasmetteranno il comando MAC richiedendo il messaggio, utilizzando il metodo CSMA-CA slotted. Il coordinatore risconterà la corretta ricezione della richiesta del messaggio e trasmetterà un opzionale frame di riscontro. Il messaggio pendente sarà quindi spedito utilizzando il metodo CSMA-CA slotted. Il dispositivo risconterà la corretta ricezione del messaggio utilizzando un frame di riscontro. La Figura 3.3 riassume il modello di trasmissione per una rete funzionante con il beacon.

Per una rete senza beacon, se un dispositivo vuole trasmettere qualche dato al coordinatore, semplicemente trasmette il suo frame dati usando la tecnica CSMA-CA pura, al coordinatore. Il coordinatore riscontra la corretta ricezione dei dati trasmettendo un opzionale frame di riscontro.

Se il coordinatore vuole trasferire dei dati ad un dispositivo in una rete senza beacon, immagazzina il dato in attesa che il dispositivo appropriato lo contatti e gli richieda dei dati. Un dispositivo può contattare il coordinatore per

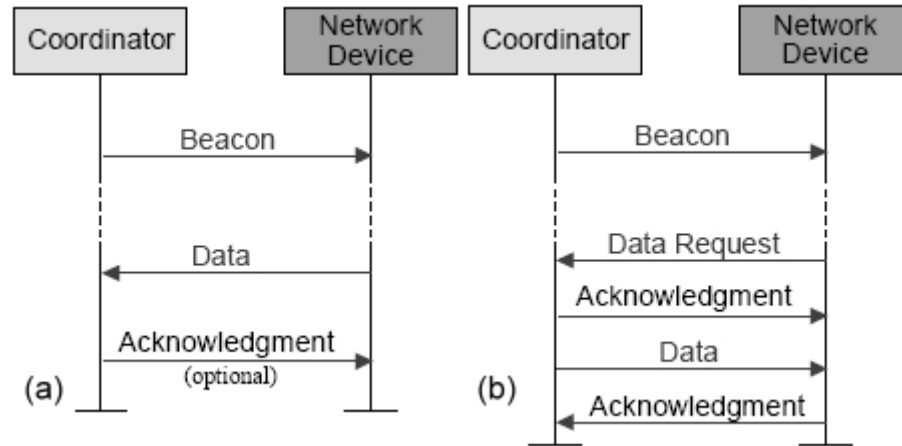


Figura 3.3: Comunicazione (a) verso (b) da il coordinatore, rete con beacon

richiedere dati trasmettendo un comando MAC di richiesta dati usando sempre la tecnica CSMA-CA pura, dopo ogni intervallo di tempo prestabilito. Il coordinatore riscontra la corretta ricezione del dato richiesto trasmettendo un frame di riscontro. Se il dato è pendente, il coordinatore trasmette il suo frame dati, sempre usando la tecnica CSMA-CA pura, al dispositivo. Se non ci sono dati pendenti, il coordinatore trasmette un frame dati a payload nullo per indicare che non ci sono dati pendenti. Il dispositivo riscontra la corretta ricezione del frame trasmettendo un frame di riscontro. La Figura 3.4 riassume il modello di trasmissione per reti senza beacon.

Per le topologie peer-to-peer la strategia di trasferimento dati è governata dallo specifico livello di rete che gestisce la rete wireless. Per fare questo efficacemente, il dispositivo che desidera comunicare necessiterà sia di ricevere costantemente che sincronizzarsi con ciascun altro nodo della rete. Nel primo caso, il dispositivo può semplicemente trasmettere i suoi dati utilizzando la tecnica CSMA-CA pura. Nel secondo caso, altre misurazioni necessitano di essere effettuate per ottenere la sincronizzazione. Tali misurazioni vanno oltre le intenzioni dello standard IEEE Std 802.15.4.

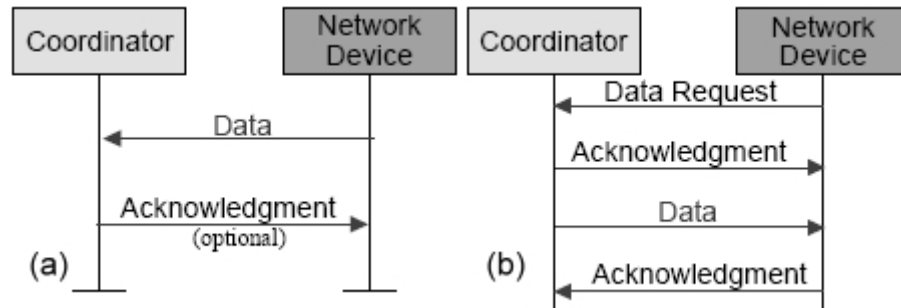


Figura 3.4: Comunicazione (a) verso (b) da il coordinatore, reti senza beacon

Struttura dei frame

Lo standard IEEE Std 802.15.4 definisce quattro strutture, ciascuna pensata come PPDU:

- Un frame di beacon, usato dal coordinatore per trasmettere i beacons
- Un frame dati, usato per tutti i trasferimenti di dati
- Un frame di riscontro, usato per riscontrare i frame correttamente ricevuti
- Un frame di comando MAC, usato per trasmettere comandi ai MAC degli altri nodi

Ciascun PPDU è costruito con un Synchronization Header (SHR), un PHY Header (PHR), e un PHY Service Data Unit (PSDU), composto dal MAC Protocol Data Units (MPDU) come struttura dati al servizio del livello MAC. L'MPDU è costruito con un MAC Header (MHR), un MAC Footer (MFR) e un MAC Service Data Unit (MSDU) ad eccezione del frame di riscontro che non contiene alcun MSDU.

Il frame di beacon viene creato nel livello MAC e si interfaccia al livello PHY. Solo il coordinatore della PAN puo' trasmettere i frame di beacon in una rete che utilizza i beacon. Ha molteplici usi, fra i quali la delimitazione del superframe, i segnali di sincronizzazione per i frame e la supervisione dell'associazione, cosi' come essere un servizio per tutti i livelli superiori. La Figura 3.5 mostra la composizione del frame di beacon.

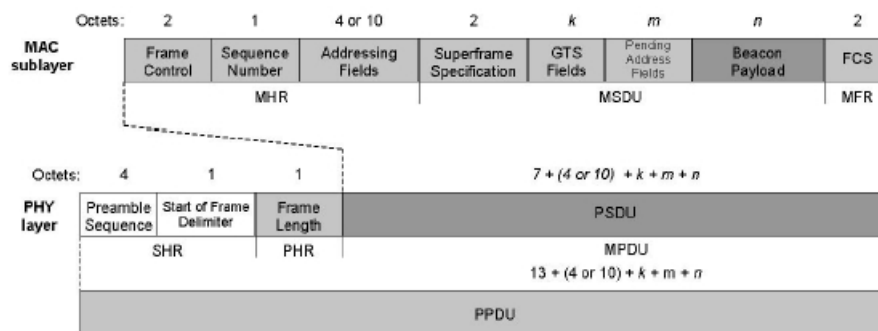


Figura 3.5: Struttura del frame di beacon

Il frame dati e' disponibile a tutti i dispositivi della rete, indipendentemente dalla topologia impiegata. Fornisce il payload principale dei dati come servizio a tutti i livelli superiori. La Figura 3.6 mostra la composizione del frame dati.

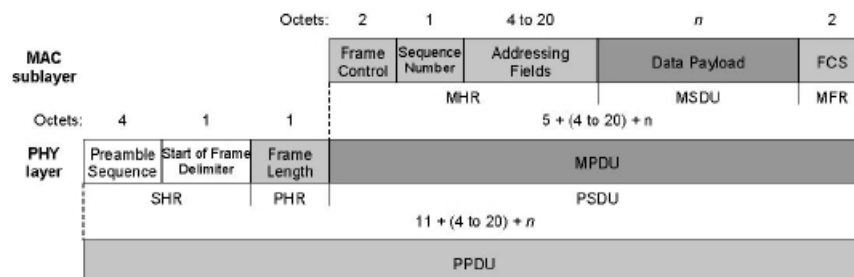


Figura 3.6: Struttura del frame dati

Il frame di riscontro e' anche esso disponibile a tutti i nodi della rete, indipendentemente dalla topologia impiegata. Non contiene alcun payload MAC e fornisce solo il riscontro per la corretta ricezione dei dati come servizio ai livelli superiori per un controllo end-to-end dei messaggi. La Figura 3.7 mostra la composizione del frame di riscontro.

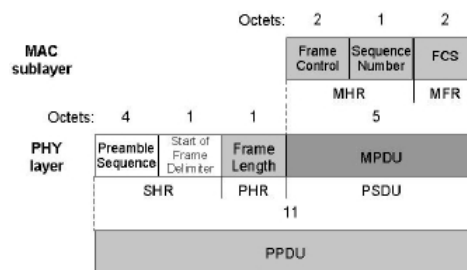


Figura 3.7: Struttura del frame di riscontro ACK

Il frame di comando MAC e' anche esso disponibile a tutti i nodi della rete, indipendentemente dalla topologia impiegata. Fornisce il payload principale di supervisione come servizio al livello MAC. La Figura 3.8 mostra la composizione del frame di comando MAC.

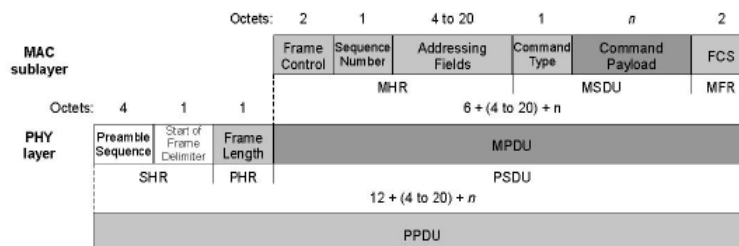


Figura 3.8: Struttura del frame di comando MAC

3.1.3 Descrizione funzionale

Questa sezione fornisce una descrizione delle funzionalità MAC. Descrive il meccanismo che permette ai dispositivi di associarsi o dissociarsi da una PAN, la procedura di associazione, la sincronizzazione con il coordinatore e l'uso dei GTS.

Avvio e mantenimento di una PAN

Il primo passo da effettuare per avviare una PAN è una scansione del canale. Ci sono quattro tipi di scansione sul canale. Tutti i dispositivi dovranno essere capaci di effettuare una scansione passiva e orfana su una lista specificata di canali. Inoltre, un dispositivo dovrà essere capace di effettuare le scansioni attive ed Energy Detection (ED). Queste sono come segue:

Scansione ED Permette ad un dispositivo FFD di ottenere una misura dell'energia di picco su ciascun canale richiesto. Questo può essere utilizzato da un potenziale coordinatore di una PAN per selezionare un canale in cui operare prima di avviare una nuova PAN. Durante uno scan ED, il livello MAC dovrà scartare tutti i frame ricevuti dal servizio dati PHY.

Scansione Attiva Permette ad un dispositivo FFD di localizzare ogni coordinatore che trasmette beacon entro il proprio Personal Operating Space (POS). Questo può essere utilizzato da un potenziale coordinatore per selezionare un identificativo della propria PAN prima di avviare una nuova PAN oppure può essere usato da un dispositivo prima di associarsi. Durante una scansione attiva, il livello MAC dovrà scarta-

re tutti i frame ricevuti dal servizio dati PHY che non siano frame di beacon.

Scansione Passiva Una scansione passiva, come quella attiva, permette di localizzare ogni coordinatore che trasmette beacon entro il proprio POS. Il comando di richiesta del beacon, invece, non viene trasmessa. Questo tipo di scansione puo' essere usata da un dispositivo prima di associarsi. Durante una scansione passiva, il livello MAC dovra' scartare tutti i frame ricevuti dal servizio dati PHY che non siano frame di beacon.

Scansione Orfana Una scansione orfana permette ad un dispositivo di tentare il riallineamento con il proprio coordinatore a seguito di una perdita di sincronizzazione. Durante una scansione orfana, il livello MAC dovra' scartare tutti i frame ricevuti dal servizio dati PHY che non siano comandi di riallineamento MAC del coordinatore.

Una PAN dovra' essere avviata da un dispositivo FFD solo dopo che e' stata completata una scansione attiva e sia stato selezionato un identificativo della PAN adatto PAN (PAN ID). In alcune situazioni puo' verificarsi che due PAN esistano nello stesso POS con lo stesso identificativo della PAN. Se questo si verificasse, il coordinatore e i suoi dispositivi dovranno avviare una procedura di risoluzione del conflitto. In questo caso il coordinatore dovra' effettuare una scansione attiva e scegliere un identificativo valido, dovra' poi trasmettere in broadcast il comando di riallineamento contenente il nuovo identificativo.

Quando un dispositivo si accorge di una situazione di conflittualita' a causa di un identificativo comune a piu' PAN, dovra' generare un comando di conflitto PAN ID e spedirlo al coordinatore della propria PAN. Se il comando

e' ricevuto correttamente, il coordinatore dovra' spedire un frame di riscontro per confermare la ricezione. Il coordinatore dovra' poi avviare una procedura di risoluzione del conflitto come descritto precedentemente.

Dopo che e' stato selezionato un PAN ID valido, il coordinatore e' abilitato alla trasmissione dei frame di beacon per permettere agli altri dispositivi di scoprire il coordinatore.

Associazione e dissociazione

A seguito di una corretta procedura di scansione attiva o passiva, un dispositivo di rete puo' inoltrare una richiesta di associazione al coordinatore trovato, che puo' accettare o rifiutare la richiesta dipendentemente dalle capacita' e dalle specifiche del software che controlla il coordinatore. Se la richiesta di associazione e' ricevuta correttamente, il coordinatore dovra' spedire un frame di riscontro per confermare la ricezione. Il riscontro alla richiesta di associazione non significa che il dispositivo e' associato, la risposta alla richiesta sara' spedita nel beacon o in un frame di comando a seconda del tipo di rete. Nella ricezione del comando di risposta il dispositivo dovra' spedire un frame di riscontro per confermare la corretta ricezione. Se il campo di associazione del comando indica che la richiesta di associazione ha avuto successo, il dispositivo dovra' memorizzare l'indirizzo del coordinatore a cui e' associato.

Quando un coordinatore vuole rimuovere dalla PAN un dispositivo, dovra' spedire il comando di notifica della dissociazione a quel dispositivo usando la trasmissione indiretta, ovvero aggiungendo il comando alla lista delle transazioni pendenti ed essere prelevato a discrezione del dispositivo usando il comando di richiesta dati. Se il dispositivo riceve correttamente il coman-

do di dissociazione dovrà confermarlo con un frame di riscontro. Anche se il riscontro non sarà ricevuto il coordinatore considererà il dispositivo dissociato.

Se un dispositivo associato vuole uscire dalla PAN, dovrà spedire un comando di notifica della dissociazione al proprio coordinatore. Se il comando di dissociazione è ricevuto correttamente dal coordinatore, questo dovrà confermarlo con un frame di riscontro. Anche se il riscontro non sarà ricevuto il dispositivo si considererà rimosso dalla PAN.

Un dispositivo associato dovrà dissociare se stesso rimuovendo tutti i propri riferimenti alla PAN. Un coordinatore dovrà rimuovere un dispositivo rimuovendo tutti i propri riferimenti a quel dispositivo.

Sincronizzazione

Per una PAN che supporta i beacon, la sincronizzazione è effettuata ricevendo e decodificando il frame di beacon, altrimenti la sincronizzazione è effettuata attraverso una richiesta al coordinatore per richiedere dati. Tutti i dispositivi che operano in una PAN con beacon dovranno acquisire la sincronizzazione con il beacon per potere rilevare messaggi pendenti o per seguire correttamente il beacon. Se un frame di beacon è ricevuto, il dispositivo dovrà verificare che il frame di beacon provenga dal coordinatore a cui è associato, altrimenti dovrà scartarlo.

Nelle PAN senza beacon ciascun dispositivo dovrà interrogare il coordinatore per richiedere i propri messaggi pendenti.

Se il livello superiore successivo al MAC riceve comunicazioni di fallimenti ripetuti a seguito delle proprie richieste di trasmissione dati, può concludere di essere rimasto orfano. Se questo accade, può iniziare una procedura di riallineamento per gli orfani spedendo una notifica al coordinatore che cerche-

ra' i dispositivi orfani nella sua lista di dispositivi e, se la ricerca ha successo, spedisce un comando di riallineamento ai dispositivi orfani. Altrimenti il dispositivo orfano puo' resettare il livello MAC ed iniziare una procedura di associazione.

Gestione dei GTS

Un GTS permette ad un dispositivo di operare nel canale dentro una porzione del superframe che e' dedicata esclusivamente a quel dispositivo. Un GTS puo' essere allocato solo dal coordinatore della PAN e puo' essere usato solo per le comunicazioni fra il coordinatore e il dispositivo. Un singolo GTS si puo' estendere su piu' slot del superframe. Il coordinatore puo' allocare fino a sette GTS contemporanei, ammesso che vi sia spazio sufficiente nel superframe. I GTS possono essere allocati in ordine di richiesta e tutti i GTS devono essere posizionati contigualmente alla fine del superframe e dopo il CAP. Ogni GTS puo' essere deallocato quando il GTS non e' piu' necessario (*i.e.*, a causa dell'inattivita' del dispositivo durante i propri GTS), e puo' essere deallocato in ogni momento a discrezione del coordinatore o dal dispositivo che lo aveva originariamente richiesto. Un dispositivo a cui e' stato allocato un GTS puo' anche operare nel CAP.

Un dispositivo per richiedere un nuovo GTS dovra' spedire il comando di richiesta per il GTS al coordinatore e continuera' a seguire i beacon per leggere il campo che descrive la struttura dei GTS che dovra' essere ricevuto entro un determinato periodo di tempo, se questo non accade prima del timeout i livelli superiori verranno avvertiti del fallimento. Se il comando di richiesta dei GTS e' ricevuto correttamente, il coordinatore dovra' spedire un frame di riscontro per confermare la ricezione. Alla ricezione della richiesta,

il coordinatore dovrà prima verificare la disponibilità nel superframe corrente, basandosi sulla lunghezza rimanente del CAP e la lunghezza del GTS desiderata e poi impostare l'appropriato descrittore dei GTS nel beacon.

Quando un dispositivo riceve un descrittore GTS valido che indica l'avvenuta allocazione del GTS, quel dispositivo può trasmettere nel proprio GTS senza utilizzare il protocollo CSMA-CA.

Se una richiesta di rimozione del GTS è iniziata da un dispositivo, questo dovrà spedire un comando di richiesta GTS al coordinatore indicando la richiesta di rimozione del proprio GTS. Da quel punto in poi il dispositivo non utilizzerà più i propri GTS. Se il comando è ricevuto con successo il coordinatore rimuoverà i GTS e spedisce un frame di riscontro per confermare la ricezione della richiesta. Se la richiesta di rimozione non è ricevuta correttamente dal coordinatore, quest'ultimo determinerà che il dispositivo ha smesso di usare i propri GTS e li rimuoverà automaticamente.

Se una procedura di rimozione dei GTS è iniziata dal coordinatore, rimuoverà i GTS e aggiungerà il descrittore dei GTS nel frame di beacon indicando i GTS rimossi. Alla ricezione del beacon contenente il descrittore GTS indicante una rimozione di alcuni GTS, il dispositivo dovrà immediatamente bloccare l'utilizzo dei propri GTS rimossi.

La rimozione di alcuni GTS può causare una frammentazione del superframe. In questo caso il coordinatore dovrà assicurarsi che ciascuno spazio vuoto nel CFP, causato dalla rimozione dei GTS, sia rimosso per massimizzare la lunghezza del CAP.

3.2 MAC LDR con Location/Tracking per tecnologia UWB

3.2.1 Panoramica generale

PULSERS e' l'acronimo del progetto Pervasive Ultra-wideband Low Spectral Energy Radio System (PULSERS) e il suo scopo principale e' di studiare, progettare e sviluppare un nuovo sistema di comunicazione basato sull'UWB [11]. Una PAN funzionante con la tecnologia PULSERS puo' lavorare a Very High Data Rate (VHDR), High Data Rate (HDR), LDR e LDR with Location/Tracking (LDR-LT), quindi i sistemi basati sulla tecnologia PULSERS possono coprire un ampio spettro di applicazioni, dallo streaming video ad alta qualita' allo sviluppo di dispositivi a consumo estremamente ridotto e a basso costo per reti sensori.

L'architettura del PULSERS segue il modello di riferimento ISO-OSI e il suo approccio e' quello di riutilizzare il piu' possibile lo standard IEEE Std 802.15.4 per ridurre l'improduttivita' conseguente alla progettazione di un protocollo completamente nuovo, e concentrarsi sugli aspetti chiave descritti sopra [12]. Le principali differenze dallo standard di riferimento sono le seguenti:

- Supporto per le comunicazioni peer-to-peer, poiche' l'802.15.4 richiede la mediazione dal coordinatore per questo.
- Slot temporali dedicati alle procedure di allocazione e localizzazione.
- Semplificazione del processo di associazione e transazioni della rete per ridurre la complessita' realizzativa.

Livello PHY

La caratteristica chiave del livello fisico del PULSERS LDR-LT e' quello di supportare la localizzazione assieme ad un supporto minimale all'inoltro dei messaggi proveniente da altri dispositivi.

Il formato dei frame e le loro definizioni sono prese direttamente dall'IEEE Std 802.15.4 con qualche modifica nella dimensione dei campi per ottimizzare il throughput e il ritardo end-to-end.

La radio opera in un canale a frequenza singola a 3.6 GHz come frequenza centrale geometrica con una larghezza di banda di 1 GHz. L'escursione del data rate per un dispositivo LDR varia da 1 kbps a 1 Mbps, con un valore medio di 100 kbps. Per i dispositivi LDR-LT varia da 1 kbps a 100 kbps, con un valore medio di 10 kbps.

Il livello PHY non e' capace di consegnare alcun Received Signal Strength Indicator (RSSI) e indicazioni sull'energia rilevata e sulla qualita' del canale ai livelli superiori. Quindi il Clear Channel Assessment (CCA) per verificare se il canale e' occupato o meno non e' supportato.

Il caso di accesso multiplo in piconet simultaneamente operanti e' supportato, il modulatore supporta l'uso dei codici di spreading PN, *e.g.*, codici a polarita' e/o TH. Questi codici PN sono differenti fra le piconet per mitigare le interferenze e migliorare le prestazioni, e sono quindi necessarie procedure per individuare/ottenere/condividere tali codici.

Livello MAC

Dal momento che il PULSERS segue strettamente lo standard IEEE Std 802.15.4 per ottenere dispositivi a basso costo e complessita', anche le funzionalita' del livello MAC del PULSERS sono la gestione del beacon, l'accesso

al canale, la gestione dei GTS, la validazione dei frame, il riscontro alla consegna dei frame e la gestione delle associazioni e dissociazioni. In aggiunta, il livello MAC del PULSERS fornisce un meccanismo perfezionato per i sistemi di localizzazione e posizionamento. E' anche fornito il supporto per dispositivi FFD e RFD.

Negli scenari LDR [13], l'elevata larghezza di banda adottata per la trasmissione si traduce in rari impulsi estremamente brevi, e quindi in bassa probabilita' di collisioni fra impulsi emessi da differenti terminali. Sotto queste ipotesi, tutti i dispositivi possono usare il protocollo ALOHA slotted per accedere al canale. Questo si traduce in bassa complessita', e quindi bassi costi, e permette l'adattamento fra differenti livelli PHY senza particolari problemi, a causa dell'assenza di funzioni specifiche del livello fisico come l'ascolto delle portanti.

3.2.2 Panoramica funzionale

Questa sezione fornisce una breve panoramica sulla struttura del superframe, i modelli di trasferimento dei dati e la struttura dei frame del PULSERS.

Struttura del superframe

Il coordinatore della PAN delimita il proprio tempo di canale usando una struttura a superframe, essa stessa delimitata dalla trasmissione dei beacon. Il periodo attivo e inattivo sono mantenuti dallo standard IEEE Std 802.15.4, mentre il periodo inattivo permette al coordinatore di entrare nello stato di riposo.

Per migliorare il QoS per servizi real-time a le prestazioni del posizionamento sono state introdotte alcune modifiche nella struttura del superframe

dell'IEEE Std 802.15.4. Come mostrato in Figura 3.9, due slot alla fine del CFP sono adesso riservati per scopi di richiesta dei GTS e posizionamento.

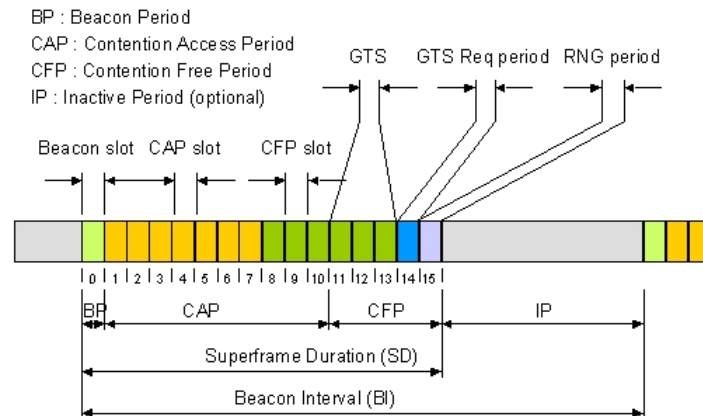


Figura 3.9: Struttura del superframe PULSERS

Il primo slot del superframe è dedicato al beacon. Solo il coordinatore può spedire beacon ed è ricevuto da tutti i dispositivi della rete. Poi segue il CAP con lo scopo principale di permettere l'associazione. Ciascun dispositivo che vuole comunicare durante il CAP dovrà usare il protocollo ALOHA slotted. In caso di collisioni ciascun dispositivo coinvolto nella collisione dovrà attendere per un intervallo di durata casuale prima di tentare la ritrasmissione. Il CFP inizia immediatamente dopo l'ultimo slot del CAP. Un dispositivo è abilitato a trasmettere durante uno slot del CFP secondo la tabella di allocazione degli slot trasmessa dal coordinatore durante il beacon precedente. È permesso un solo frame per slot. Nell'opzionale periodo inattivo il livello MAC richiede al livello fisico di portare la radio in stato di riposo. Il livello MAC può richiedere al livello PHY di riabilitare la radio poco prima della fine del periodo inattivo o in ogni momento seguente. Quando il dispositivo disabilita la propria radio per più di un GTS, è propria responsabilità accertarsi se i precedenti GTS sono ancora validi o meno.

Modelli per il trasferimento dei dati

Nel PULSERS la trasmissione indiretta, basata sull'uso dei messaggi pendenti, non è supportata. Quindi, se un dispositivo non coordinatore vuole spedire dati al coordinatore o ad un altro dispositivo, dovrà attendere un'indicazione del coordinatore nel frame di beacon indicante che un GTS è garantito per quel dispositivo. Il destinatario dovrà riscontrare la corretta ricezione dei dati se il mittente lo richiede impostando l'apposito sottocampo.

Struttura dei frame

La struttura dei frame del PULSERS segue le linee guida dell'IEEE Std 802.15.4 con l'aggiunta del frame di posizionamento. La Figura 3.10 mostra la struttura di questo nuovo frame.

Octets	2	1	4 or 20	n > TBD	2
Ranging MPDU	Frame Control	Sequence Number	Address Info	Ranging Payload	FCS
		MHR		MSDU	MFR

Figura 3.10: Struttura del frame di posizionamento del PULSERS

3.2.3 Descrizione funzionale

Questa sezione fornisce una descrizione delle funzionalità del MC. Descrive il meccanismo che permette al dispositivo di unirsi o lasciare una PAN, la procedura di associazione, la sincronizzazione con il coordinatore, la procedura di localizzazione e l'uso dei GTS.

Avvio e mantenimento di una PAN

Allo stato attuale del progetto e' supportato solo un canale, quindi ai dispositivi non e' richiesto di effettuare scansioni passive e scansioni orfane. Un conflitto di PAN ID non puo' avvenire dal momento che e' supportata solo una PAN, quindi ciascun nodo utilizza sempre lo stesso identificativo. Un dispositivo FFD, impostato come coordinatore dai livelli superiori, avvia la PAN dopo che e' stato attivato ed inizia a trasmettere i frame di beacon.

Associazione e dissociazione

Una volta attivato, un dispositivo puo' ascoltare i beacon trasmessi dal coordinatore quando questo e' richiesto dal livello superiore. Quando il livello MAC di un dispositivo non associato riceve un frame di beacon, spedisce una primitiva di tipo 'conferma' al livello superiore. Allo stesso tempo dovra' impostare il PAN ID e l'indirizzo del coordinatore secondo quanto specificato nel frame di beacon. Quando il livello superiore risponde con una primitiva di tipo 'richiesta', il livello MAC dovra' iniziare la procedura di associazione spedendo il comando di richiesta associazione al coordinatore con il proprio indirizzo nel campo appropriato. Se il comando di richiesta e' ricevuto correttamente, il coordinatore deve accettare l'associazione ed assegnare con indirizzo breve al dispositivo in accordo all'indirizzo indicato nel comando di richiesta associazione. Il coordinatore mantiene il collegamento fra indirizzo lungo e indirizzo breve in un'apposita tabella. Un comando di risposta alla richiesta di associazione dovra' quindi essere mandato al dispositivo come conferma dell'associazione e per comunicargli l'indirizzo breve assegnatogli. Dopo di questo il livello MAC del dispositivo dovra' mandare una primitiva di tipo 'conferma' al livello superiore per comunicargli il successo della procedura di associazione.

Allo stato attuale del progetto la procedura di dissociazione non e' prevista.

Sincronizzazione

Un dispositivo puo' sincronizzarsi ricevendo e decodificando i frame di beacon spediti dal coordinatore. Ogni dispositivo acceso cerchera' di ascoltare il beacon e cerchera' di associarsi alla PAN esistente.

Per acquisire la sincronizzazione con il beacon, un dispositivo dovra cercarlo per un numero di simboli predefinito. Se non e' stato ricevuto nessun frame di beacon entro questo periodo di tempo, il numero di beacon mancati dovra' essere aumentato di uno, quindi il livello MAC ripete la ricerca. La sincronizzazione e' persa se il numero di beacon mancati raggiunge una costante predefinita. In questo caso il livello MAC notifica al livello superiore che la procedura e' fallita usando una primitiva di tipo 'indicazione'.

Se un frame di beacon valido e' ricevuto, il dispositivo dovra decodificare il frame di beacon e estrarre le informazioni pertinenti. A questo punto, il dispositivo e' considerato sincronizzato con il coordinatore. Quindi il livello MAC spedisce una primitiva di notifica beacon , con le informazioni contenute nel frame di beacon, al livello superiore. La primitiva porta con se' anche una valutazione della qualita' del link e il tempo in cui il frame di beacon e' stato ricevuto.

Localizzazione e posizionamento

Nel PULSERS alla fine di ogni superframe ci sono alcuni GTS riservati alla procedura di posizionamento, la porzione occupata da questi slot e' chiamata periodo di Ranging (RNG). Il numero di questi slot dipende dall'algoritmo usato dal meccanismo di posizionamento. Ci sono due principali algoritmi:

- Time Of Arrival/Two Way Ranging (TOA/TWR), che necessitano solo di due (rispettivamente, tre) GTS adiacenti nel periodo di RNG per un posizionamento di tipo peer-to-peer in due distinti nodi asincroni (fissi o mobili) senza (rispettivamente, con) correzione della deriva.
- Time Difference Of Arrival/One Way Ranging (TDOA/OWR), che necessitano solo di un GTS nel periodo di RNG per il posizionamento di un nodo mobile relativo ad almeno tre nodi di riferimento sincroni.

Il PULSERS adotta l'algoritmo TOA che e' ovviamente il protocollo predefinito in una rete distribuita e rimuove i vincoli della sincronizzazione.

Il modo TOA/TWR coinvolge due nodi distinti in una classica transazione di tipo peer-to-peer. Un particolare nodo incaricato all'inizializzazione della transazione di posizionamento trasmette un pacchetto di richiesta ad un altro nodo, che stima il TOA della richiesta e poi spedisce la risposta sotto forma di ACK al mittente, dopo un intervallo predefinito dal protocollo e misurato dal proprio clock. Quindi, l'iniziatore misura con il suo clock il tempo trascorso dalla ricezione della risposta all'istante in cui e' stata fatta la richiesta. Infine, affidandosi alle proprie misurazioni e sul ritardo teorico di risposta, l'iniziatore calcola la distanza relativa dall'altro nodo. Un miglioramento per questo schema base consiste nello spedire dei pacchetti aggiuntivi (tipicamente nello slot adiacente) per stimare la differenza relativa di clock fra i due nodi.

Gestione dei GTS

Un dispositivo deve trasmettere dati utilizzando un'allocazione garantita di tipo GTS. Essa e' richiesta da un dispositivo al coordinatore che puo' accettare o meno la richiesta di allocazione.

Il coordinatore mantiene un minimo per la lunghezza del CAP, almeno due slot, per permettere il processo di associazione. Il primo slot del CAP è usato per trasmettere la richiesta di associazione da un dispositivo al coordinatore. Negli slot del CAP rimanenti il coordinatore spedisce i riscontri per confermare la ricezione dei frame.

Quando un dispositivo ha bisogno di allocare per trasmettere dati usando i GTS, manda una richiesta al coordinatore. Queste richieste sono analizzate dal coordinatore usando uno schema di tipo First In, First Out (FIFO). In questo modo, quando il coordinatore riceve uno di questi frame, dovrà prima verificare se il numero di slot richiesti è disponibile nel superframe corrente, in base alla lunghezza rimanente del CFP. Poi verifica se il massimo numero di GTS è stato raggiunto o meno. Se tutte queste condizioni sono valide il coordinatore decide di allocare i GTS. Se il nodo che viene allocato richiede l'uso dei riscontri per la consegna il coordinatore dovrà raddoppiare il numero degli slot allocati, dal momento che i dati trasmessi in ogni slot necessitano della trasmissione del riscontro nel prossimo slot dello stesso GTS.

Quando un GTS è allocato con successo, il coordinatore include il descrittore GTS nel beacon ed aggiorna il campo di specifica GTS secondo le nuove caratteristiche. Per ogni GTS allocato, un dispositivo deve essere in grado di memorizzare il proprio slot di partenza, la sua lunghezza e l'indirizzo del destinatario se il dispositivo è il mittente o l'indirizzo del mittente se quel dispositivo dovrà ricevere il suo flusso dati.

Quando un GTS è allocato ad un nodo per la trasmissione, allora è usato un contatore per calcolare la scadenza del GTS. Se il trasmettitore non spedisce dati durante i propri GTS questo contatore è aumentato di

un'unità', quando li spedisce il contatore e' riportato a zero. Quando il contatore raggiunge il suo valore massimo il GTS e' rimosso.

Per richiedere una rimozione dei propri GTS un dispositivo dovra' spedire un comando di richiesta GTS al coordinatore impostando il campo appropriato a zero. Se questo frame e' ricevuto correttamente il coordinatore dovra' spedire un frame di riscontro come conferma dell'avvenuta ricezione. Il coordinatore quindi rimuove i relativi GTS.

3.3 Protocollo MAC LDR per applicazioni Location/Tracking per tecnologia UWB

3.3.1 Panoramica generale

Il progetto UWB Wireless Embedded Systems (UWEN) [14] mira a sviluppare un sistema capace di offrire comunicazioni a basso rate con capacita' di localizzazione e inseguimento per applicazioni all'aperto. Il sistema e' pensato come supporto delle attivita' ricreative all'aperto come lo sci di fondo, l'atletica e la maratona. L'idea include lo sviluppo di dispositivi piccoli e a bassa potenza che possono essere indossati dall'utente. In un'ambiente con poche infrastrutture dedicate, l'utente e' in grado di inviare la propria posizione e prestazioni con collegamenti peer-to-peer a dei nodi fissi nella rete. I dispositivi che non sono direttamente nel raggio di copertura dei nodi fissi possono spedire le proprie informazioni attraverso nodi intermedi che le ritrasmettono grazie alle tecniche multi-hop.

Livello PHY

La radio dell'UWEN utilizza la tecnologia IR-UWB per produrre un segnale a banda estremamente larga fino a diversi gigahertz [15]. Per permettere la separazione degli utenti i dati sono anche codificati utilizzando la tecnica Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS).

La banda a -10 dB e' 4.16 GHz e va da un minimo di 1.03 GHz a un massimo di 5.19 GHz. Dal momento che la potenza in trasmissione e' limitata dalla regolamentazione FCC, per ottenere un segnale con sufficiente energia gli impulsi trasmessi devono essere ritrasmessi alcune volte. Quindi ogni bit trasmesso e' definito da un treno d'impulsi.

Livello MAC

Il protocollo MAC per il progetto UWEN e' basato sulla TDMA per offrire ai dispositivi mobili un accesso garantito ai punti fissi della rete.

La rete fissa e' organizzata in gruppi, detti 'cluster'. Ogni cluster contiene un numero predefinito di Access Point (AP). Lo scopo di questa divisione e' di fornire ai sensori mobili un'area la piu' estesa possibile rispetto ad un singolo AP. Questo fornisce una notevole diminuzione delle richieste di associazione ed occupazioni del canale. Inoltre, gli AP hanno una potenza variabile in trasmissione e in questo modo e' possibile coprire l'area con un minimo numero di spazi e sovrapposizioni fra differenti AP, come mostrato in Figura 3.11. Nella figura e' anche evidente che una trasmissione alternata dei beacon permette di coprire un'area piu' estesa.

Sebbene il livello fisico dei sensori e degli AP sia lo stesso, ci sono due MAC fondamentalmente differenti. Questo a causa della necessita' di avere un protocollo MAC estremamente semplice e a basso costo nei sensori, per favorire un'alta penetrazione a livello commerciale.

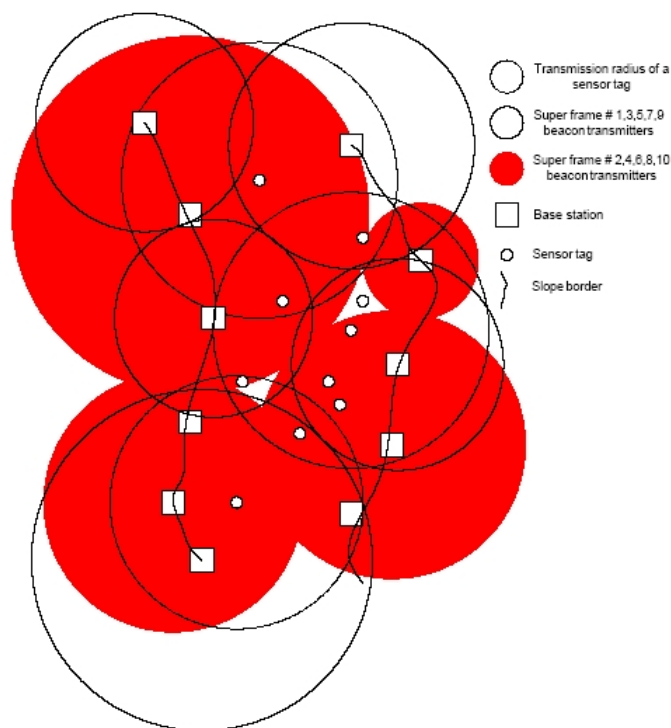


Figura 3.11: Struttura a cluster dell'UWB

Tutti gli AP sono connessi ad un server di posizionamento che ha il compito di elaborare i dati provenienti dagli AP, calcolare la posizione, inseguire i dispositivi e presentare i risultati.

3.3.2 Panoramica funzionale

Questa sezione fornisce una breve panoramica riguardo la struttura del superframe, il modello di trasferimento dei dati e la struttura dei frame dell'UWB.

Struttura del superframe

Il sistema è basato sulla TDMA. Il formato del superframe è definito dal coordinatore delle rete ed è delimitato dai frame di beacon spediti dal coordinatore ad intervalli di tempo programmabili. Ci sono due principali periodi nel superframe, un periodo ad accesso casuale ed un periodo ad accesso riservato. Entrambi i periodi sono divisi in slot. Ci sono due tipi di slot consecutivi, gli slot di uplink e quelli di downlink. I primi sono usati dai dispositivi per spedire i dati ai loro referenti (AP o nodo intermedio) mentre sta ascoltando, il secondo è usato dal referente per comunicare con gli altri dispositivi mentre loro stanno ascoltando. Così ciascun dispositivo usa la propria coppia di slot per comunicare col referente. Quando un dispositivo entra nella rete inizia un processo di registrazione. Il dispositivo rileva l'inizio del superframe cercando il beacon e seleziona casualmente uno slot durante il periodo di registrazione nel suo periodo di comunicazione. Lo slot è selezionato casualmente fra n possibili scelte per cercare di evitare collisioni con gli altri nuovi dispositivi che si vogliono associare. Nel periodo di comunicazione del referente (in questo caso un AP), il referente risponde nello stesso slot del periodo di registrazione. La risposta avverrà nel superframe successivo a quello della richiesta. L'informazione trasportata in questa risposta è rappresentata dalla nuova posizione dello slot da utilizzare finché il dispositivo resterà dentro la rete di cluster. I bit che compongono uno slot time possono essere utilizzati sia per l'algoritmo di posizionamento che per la comunicazione fra dispositivo ed AP. Per definizione se un dispositivo non ha alcun dato da trasmettere dovrà comunque trasmettere uno speciale frame di posizionamento all'inizio dei propri slot di uplink.

Per gestire la struttura a cluster è definito un *cluster frame* come una sequenza di dieci superframe identici. La Figura 3.12 mostra la struttura del

cluster frame e di un singolo superframe.

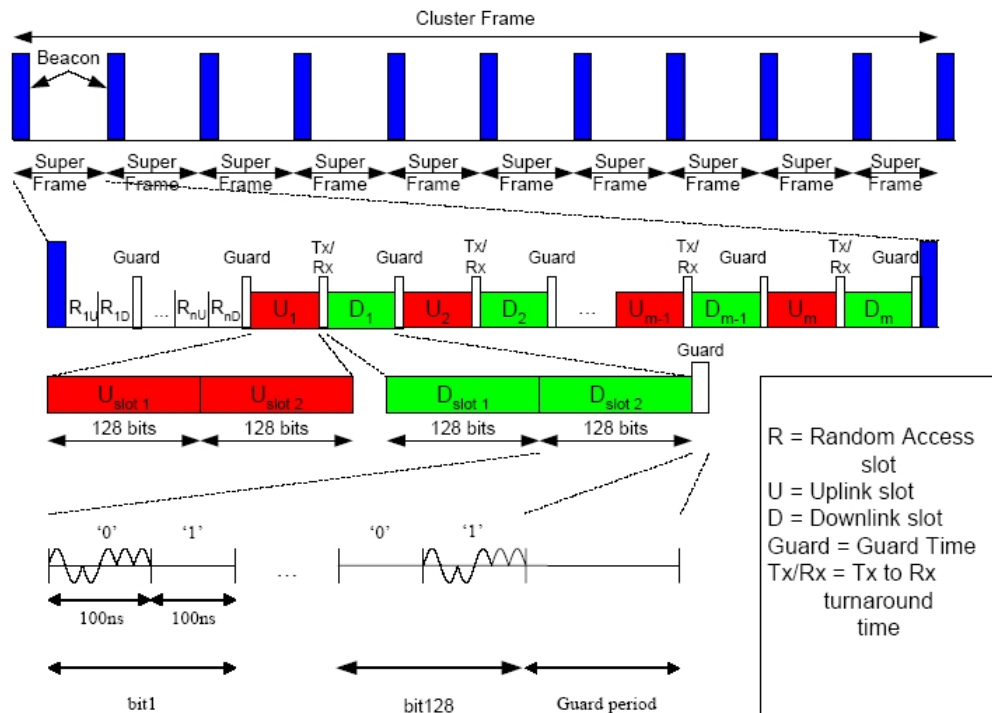


Figura 3.12: Struttura del superframe UWEN

Trasferimento dei dati

Un dispositivo che entra nella rete, dal momento che e' una rete con beacon, dovra' prima sincronizzarsi ascoltando il beacon, poi dovra' iniziare un processo di associazione usando gli slot ad accesso casuale nel superframe per ottenere almeno un paio di slot di uplink/downlink nel periodo a slot riservati. Questi slot riservati sono associati al dispositivo per tutta la permanenze del dispositivo nella rete. Quando un dispositivo vuole comunicare con il proprio referente dovra' usare i propri uplink slot per spedire i dati,

così come il referente dovrà usare i relativi slot di downlink per spedire i dati al dispositivo. Per definizione, quando un dispositivo non ha niente da trasmettere dovrà comunque trasmettere un frame di posizionamento.

Struttura dei frame

Ci sono tre tipi di frame, il frame del sensore, il frame di beacon e il frame dell'AP.

Il frame del sensore viene creato dal sensore stesso e la sua struttura è mostrata in Figura 3.13. Il più importante campo è il campo 'Type' ed è usato per indicare all'AP se il frame è un frame di posizionamento, un frame dati, un frame di inoltro o un frame di comando. Un frame dati include automaticamente un frame di posizionamento che è semplicemente un frame senza dati.

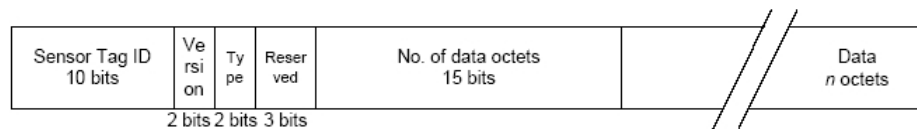


Figura 3.13: Struttura del frame del sensore mobile dell'UWB

Il frame di beacon è periodicamente spedito dal coordinatore in accordo con la struttura del superframe. Contiene numerose informazioni utili come l'identificazione del cluster, la gestione degli slot e i dati opzionali da trasmettere ai dispositivi. La Figura 3.14 mostra la struttura del frame di beacon.

Il frame dell'AP è usato quando un cluster ha qualche comando o dato da spedire ai sensori mobili. In questo caso un qualsiasi AP all'interno del cluster può essere usato allo scopo usando lo slot di downlink che immediatamente segue allo slot di uplink del sensore. Per questa ragione ne l'indirizzo del mit-

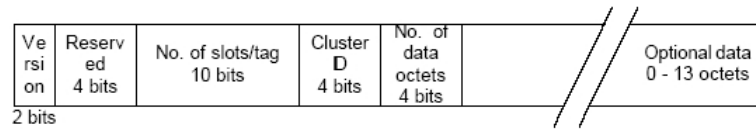


Figura 3.14: Struttura del frame di beacon dell'UWEN

tente ne l'indirizzo del destinatario sono utilizzati nel frame di AP, perché la sorgente può essere qualsiasi AP nel cluster e la destinazione è implicitamente ricavata dalla posizione dello slot di downlink. La Figura 3.15 mostra la struttura del frame dell'AP.

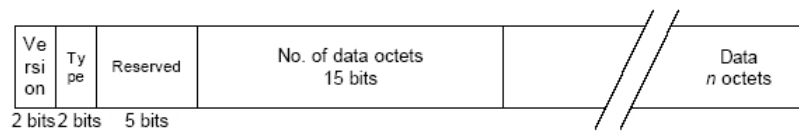


Figura 3.15: Struttura del frame dell'AP dell'UWEN

3.3.3 Descrizione funzionale

Questa sezione fornisce una descrizione delle funzionalità del MAC. Descrive la procedura di associazione e l'uso degli slot prenotati.

Associazione e dissociazione

Questa procedura dovrà iniziare quando un dispositivo cambia o entra in un nuovo cluster. Il processo inizia con una selezione casuale dello slot di uplink da parte del dispositivo nel periodo ad accesso casuale e spedisce una richiesta di associazione. Se l'AP che riceve la richiesta è un membro del vecchio cluster allora la richiesta di associazione dovrà essere scartata.

Altrimenti, se l'AP ricevente è un membro del nuovo cluster, l'AP dovrà iniziare la procedura di associazione. Dopo aver registrato la posizione dello slot di uplink in cui il dispositivo ha mandato la richiesta, la richiesta può essere inoltrata al server di registrazione. Il server controllerà il numero di dispositivi allocati in quel cluster per verificare se c'è spazio per un nuovo dispositivo e, in caso di successo, alterare la propria tabella delle associazioni e spedire gli aggiornamenti a tutti gli AP e dispositivi nel cluster vecchio e in quello nuovo. Ora, se l'AP che riceve gli aggiornamenti trova che l'identificativo di quel dispositivo è già presente nella sua cache, questo significa che l'AP appartiene al vecchio cluster e quindi il dispositivo può essere rimosso dalla cache e da ora in avanti tutti i pacchetti da lui provenienti dovranno essere scartati. Altrimenti, se l'AP non ha l'identificativo del dispositivo nella sua cache, significa che l'AP appartiene al nuovo cluster e quindi dovrà essere aggiunto alla propria cache e rispondere alla richiesta di associazione nell'appropriato slot di downlink.

Uso degli slot riservati

Ci sono quattro tipi di slot: slot di uplink ad accesso casuale, slot di downlink ad accesso casuale, slot di uplink riservati e slot di downlink riservati. Gli slot di uplink ad accesso casuale possono essere usati solo per la procedura di associazione e la preparazione di una comunicazione multi-hop. Gli slot di downlink ad accesso casuale sono usati solo dagli AP per le comunicazioni riguardanti l'associazione e altre informazioni generali. Gli slot di uplink riservati possono essere usati solo dai sensori che sono già stati associati o, in certi casi, da sensori che stanno inoltrando informazioni con la tecnica multi-hop. Gli slot di downlink riservati possono essere usati solo dagli AP per ogni tipo di comunicazione con il sensor che possiede quegli slot. Il dispositi-

vo avra' questi slot per tutto il tempo in cui rimarra' all'interno del cluster, quindi anche se non ha niente da trasmettere dovra' trasmettere i frame di posizionamento all'inizio dei propri slot di uplink. Quando un dispositivo si associa ad un cluster, l'AP assegnera' un certo numero di slot riservati in base alla condizione della rete. L'AP puo' anche aumentare e decrementare dinamicamente il numero di slot riservati assegnati per ogni dispositivo. Il dispositivo non puo' richiedere un numero maggiore di slot riservati a meno che stia inoltrando le informazioni di qualche altro dispositivo.

Capitolo 4

Analisi e Simulazione

4.1 Modello energetico per UWB MAC

Lo scopo di questa sezione e' di mostrare come il modello di analisi energetico per MAC multi-hop [3] possa essere usato per studiare il MAC dei dispositivi IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.4a, PULSERS e UWEN.

Il modello assume che il processo di arrivi dei dati sia di tipo di Poisson e il numero dei nodi nella rete sia tendente all'infinito, pertanto le funzioni di probabilita' coinvolte sono esponenziali. Il modello mira a stimare l'energia consumata in una rete durante la trasmissione dei dati tenendo in considerazione i tempi di contesa medi, tempi di backoff medi e le possibili collisioni dei frame. La stima del consumo energetico e' effettuata andando a valutare le probabilita' di transizione da uno stato del protocollo MAC ad un altro stato e il relativo tempo speso nella trasmissione, ricezione, attesa e riposo. Gli stati stessi sono transitori e, con probabilita' note, per arrivare al nuovo stato viene scelto un percorso fra tutti (in certi casi lo stesso del precedente).

4.1.1 Analisi energetica dei MAC

Il modello per il consumo energetico del MAC impiegato nei dispositivi IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.4a e' mostrato in Figura 4.1.

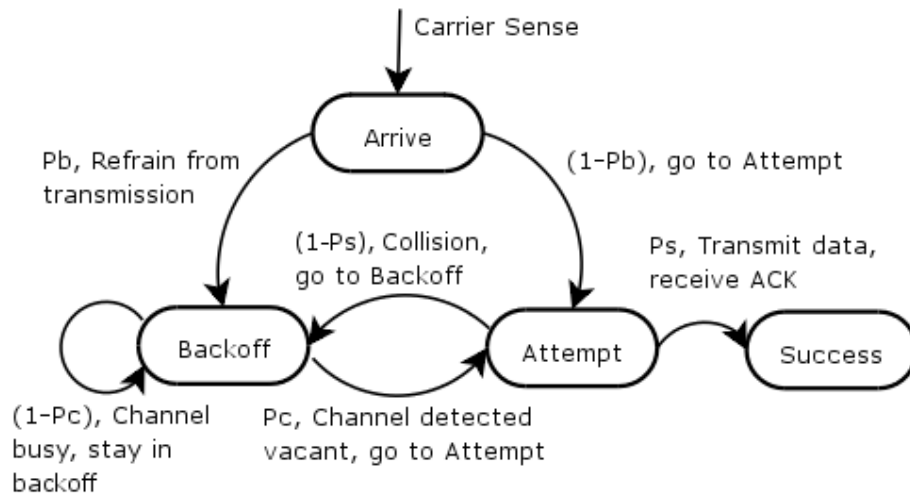


Figura 4.1: Modello energetico in trasmissione per il protocollo CSMA/CA.

Ci sono quattro differenti stati : *Arrive*, *Backoff*, *Attempt* e *Success*. Lo stato di arrivo e' il punto di accesso al sistema per un nodo con nuovi dati da trasmettere e, in caso di protocollo CSMA-CA, un ascolto del canale e' sempre effettuato prima di arrivare allo stato *Arrive* che consuma un'energia pari a E_{Arrive} Joules. La Figura 4.1 porta ad un sistema di equazioni che se risolto fornisce il consumo medio di energia in trasmissione. Sia E_{TX} uguale al consumo atteso di energia per un nodo con nuovi dati da trasmettere dallo stato *Arrive* fino a quando raggiunge lo stato *Success* che rappresenta l'avvenuta trasmissione. Sia $E(A)$ uguale al consumo d'energia medio per ogni visita allo stato *Attempt*, che rappresenta lo stato in cui si trasmette senza sapere l'esito finale, e sia $E(B)$ uguale al consumo energetico per ogni visita allo stato *Backoff*, ovvero lo stato in cui si attende un intervallo di

tempo prima di ascoltare il canale e ritentare la trasmissione. Per ogni arrivo a ciascuno stato si consuma dell'energia. Questa energia consumata e' relativa ai periodi spesi a trasmettere e ricevere o durante particolari stati della radio. Ci sono delle probabilita' connesse ad ogni arrivo ad uno stato collegate alla probabilita' esponenziale di scegliere quel percorso. La somma di tutte le probabilita' relative ad uno stato e' sempre 1. Per raggiungere lo stato *Success* che e' il punto finale del trasferimento dati, tutte le possibili transizioni dallo stato *Arrive* allo stato *Success* devono essere calcolate. Il consumo energetico medio dal momento in cui un pacchetto arriva dal livello superiore al momento della ricezione di un frame ACK ha la seguente forma generale

$$E_{TX} = E_{Arrive} + P_{prob_1}E(A) + (1 - P_{prob_1})E(B), \quad (4.1)$$

$$E(A) = P_{prob_2}E_{Success} + (1 - P_{prob_2})E(B), \quad (4.2)$$

$$E(B) = P_{prob_3}E(A) + (1 - P_{prob_3})E(B), \quad (4.3)$$

dove $P_{prob_{\{1,2,3\}}}$ sono le probabilita' relative all'arrivo ad un certo stato, E_{Arrive} e' il consumo energetico per l'ascolto del canale arrivando allo stato *Arrive* e $E_{Success}$ e' il consumo energetico atteso arrivando allo stato *Success* dallo stato *Attempt*.

Per il protocollo CSMA-CA, sostituendo le probabilita', tempi e modi del ricevitore esplicitamente, la Eq. 4.1 si traduce in

$$E_{TX} = T_{CS}M_{RX} + (1 - P_b)E(A) + (1 - P_b)T_{RT}M_{TX} + P_bE(B) + P_bN_1M_{RX}.$$

(4.4)

Nella Eq. 4.4 la notazione e':

- M_{TX} e' il consumo di potenza in trasmissione della radio ed e' collegato al tempo speso nel giungere ad uno stato. Analogamente, M_{RX} e' il consumo di potenza in ricezione.
- T_{CS} e' il tempo impiegato per l'ascolto del canale.
- T_{RT} e' il tempo richiesto per cambiare lo stato della radio da ricezione a trasmissione.
- P_b e' la probabilita' di trovare il canale occupato durante l'ascolto.
- N_1 tiene conto della finestra di backoff e del numero di slot trascorsi prima che sia tentato un altro ascolto del canale.

Analogamente, e' possibile fare la stessa analisi per gli stati *Backoff* e *Attempt* dallo stato *Arrive*. Rispettivamente, per $E(A)$:

$$E(A) = P_S T_{PKT} M_{TX} + P_S \psi M_{RX} + (1 - P_S) E(B) + (1 - P_S) T_{PKT} M_{TX} + (1 - P_S) T_o M_{RX} \quad (4.5)$$

dove

- T_{PKT} e' il tempo richiesto per trasmettere l'intero pacchetto, dati di preambolo inclusi.
- ψ e' il tempo richiesto per trasmettere l'intero pacchetto e per ricevere l'appropriato frame ACK di riscontro, tenendo conto del tempo di propagazione.

- T_o e' il tempo di timeout, ovvero il massimo tempo accettabile dopo la corretta spedizione di un dato per ricevere il frame ACK di riscontro.
- P_S e' la probabilita' collegata all'assenza di collisioni.

And for $E(B)$:

$$E(B) = (1 - P_C)N_2M_{RX} + (1 - P_C)E(B) + P_C E(A) + P_C T_{RT}M_{TX} \quad (4.6)$$

dove

- N_2 e' il tempo trascorso nello stato *Backoff*.
- P_C e' la probabilita' di non trovare nessuna trasmissione.

Sostituendo l'Eq. 4.5 nell'Eq. 4.6 e quindi sostituendo il risultato nell'Eq. 4.5, $E(A)$ ed $E(B)$ possono essere scritte come

$$E(A) = \delta + (1 - P_S)(\omega + P_C\delta)(P_C P_S)^{-1} \quad (4.7)$$

e

$$E(B) = (\omega + P_C\delta)(P_C P_S)^{-1} \quad (4.8)$$

dove ω rappresenta la transizione del modello energetico dallo stato *Backoff* allo stato *Attempt* o nuovamente allo stato *Backoff* e δ rappresenta la transizione del modello energetico dallo stato *Attempt* allo stato *Backoff* o allo stato *Success*. La loro forma esplicita e'

$$\omega = (1 - P_C)N_2M_{RX} + P_C T_{RT}M_{TX} \quad (4.9)$$

e

$$\delta = P_S(T_{PKT}M_{TX} + \psi M_{RX}) + (1 - P_S)(T_{PKT}M_{TX} + T_o M_{RX}). \quad (4.10)$$

Usando l'Eq. 4.7 e l'Eq. 4.8 nell'Eq. 4.4 e' finalmente possibile ottenere il consumo energetico durante la trasmissione.

In questi calcoli non abbiamo modellizzato lo stato di backoff tramite una catena di Markov ma usato i valori medi in funzione di G , dove G e' il traffico medio offerto al canale.

Il protocollo MAC usato nei dispositivi PULSERS e' l'ALOHA slotted e il modello di consumo energetico e' ottenuto partendo dalla Figura 4.1 considerando che in questo caso $P_C = 1$, $P_b = 0$ e dallo stato *Backoff* c'e' una transizione diretta allo stato *Success*. La Figura 4.2 mostra il modello relativo al protocollo ALOHA slotted.

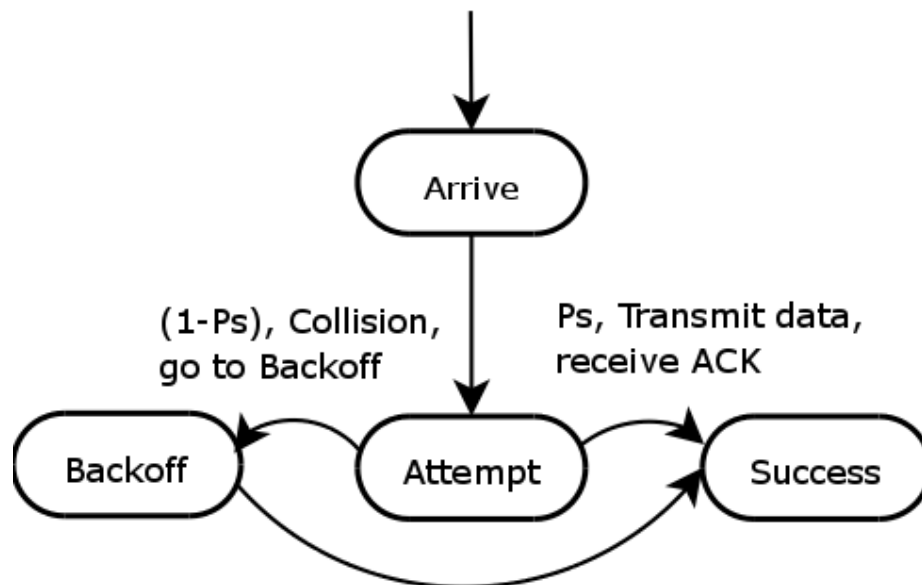


Figura 4.2: Modello energetico in trasmissione per il protocollo ALOHA slotted.

Quindi, il sistema di equazioni 4.1 puo' essere scritto come

$$E_{TX} = E(A), \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} E(A) = & P_S M_{TX} T_{PKT} + P_S \psi M_{RX} + (1 - P_S) E(B) + (1 - P_S) T_{PKT} M_{TX} + \\ & + (1 - P_S) T_o M_{RX}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$E(B) = E(A), \quad (4.13)$$

e, usando la sostituzione

$$E_{TX} = [P_S M_{TX} T_{PKT} + P_S \psi M_{RX} + (1 - P_S) T_{PKT} M_{TX} + (1 - P_S) T_o M_{RX}] P_S^{-1} \quad (4.14)$$

che fornisce il consumo energetico in trasmissione E_{TX} .

L'UWEN usa un protocollo TDMA per accedere al mezzo trasmissivo, di conseguenza un approccio differente deve essere considerato per calcolare il consumo di energia in trasmissione. La struttura del superframe mostrata in Fig. 3.12 suggerisce il giusto approccio. Il dispositivo, oltre a consumare energia durante i propri slot di comunicazione uplink, consuma energia ascoltando il superframe mentre aspetta il suo turno per trasmettere e anche

cambiando lo stato del ricevitore dagli stati di riposo, ricezione e trasmissione. Considerando quindi la struttura del superframe possiamo scrivere la seguente equazione

$$\begin{aligned}
 E_{TX} = & (T_{SR} + T_B)M_{RX} + (T_{RS} + T_R)M_{SL} + (T_{ST} + 2T_S)M_{TX} + \\
 & + (T_{TR} + 2T_S)M_{RX} + (T_{RS} + (((CUS - 1) + (CDS - 1))SS)/BR) + \\
 & + NGT_G)M_{SL}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

dove

- M_{RX} , M_{TX} e M_{SL} sono rispettivamente il consumo di potenza durante gli stati di ricezione, trasmissione e riposo.
- T_{SR} , T_{ST} , T_{RS} e T_{TR} sono i tempi impiegati per cambiare lo stato della radio.
- T_R , T_T , T_S e T_G sono rispettivamente i tempi impiegati durante la ricezione, la trasmissione, il riposo e il tempo dedicato agli slot di guardia in un superframe.
- CUS , CDS e NG sono rispettivamente gli slot di comunicazione uplink e downlink e il numero di periodi di guardia in un superframe.
- BR e' il bitrate misurato in bps.
- SS e' la grandezza di uno slot misurato in bit.

L'Eq. 4.15 fornisce il consumo energetico in trasmissione E_{TX} per i dispositivi UWEN.

4.2 Simulazione

Questa sezione spiega come si e' usato il simulatore per la nostra analisi. Mostrera' una breve introduzione al simulatore NS-2, una descrizione del modello IEEE 802.15.4 impiegato, un'introduzione sull'algoritmo d'instradamento Directed Diffusion e come le simulazioni sono state svolte per la nostra analisi.

4.2.1 Introduzione al simulatore NS-2

Il simulatore NS-2 e' la seconda versione di NS (acronimo di Network Simulator), un simulatore ad eventi discreti orientato alla ricerca sui collegamenti di rete. NS-2 fornisce supporto per le simulazioni di reti funzionanti con protocolli TCP, routing e multicast sia wireless (locale e satellitare) che cablate.

NS-2 e' basato su due linguaggi: un simulatore object-oriented, scritto in C++, e un interprete OTcl (una estensione object-oriented del Tcl), usato per eseguire gli script di comando dell'utente. NS-2 ha una vasta collezione di reti e protocolli. Ci sono 2 gerarchie di classi: la gerarchia compilata C++ e quella interpretata OTcl, con una corrispondenza univoca fra di essi. La gerarchia compilata C++ permette di ottenere efficienza nella simulazione e tempi di esecuzione della simulazione piu' veloci ed e' molto utile per definire nei dettagli i modelli dei protocolli. Con lo script OTcl scritto dall'utente e' possibile definire la particolare topologia, i protocolli specifici, le applicazioni che vogliamo simulare e la forma dell'output che vogliamo dal simulatore. L'Tcl puo' utilizzare gli oggetti compilati in C++ attraverso un collegamento OTcl che crea una corrispondenza fra oggetti OTcl e oggetti C++.

La Figura 4.3 mostra una visione d'insieme semplificata del simulatore NS-

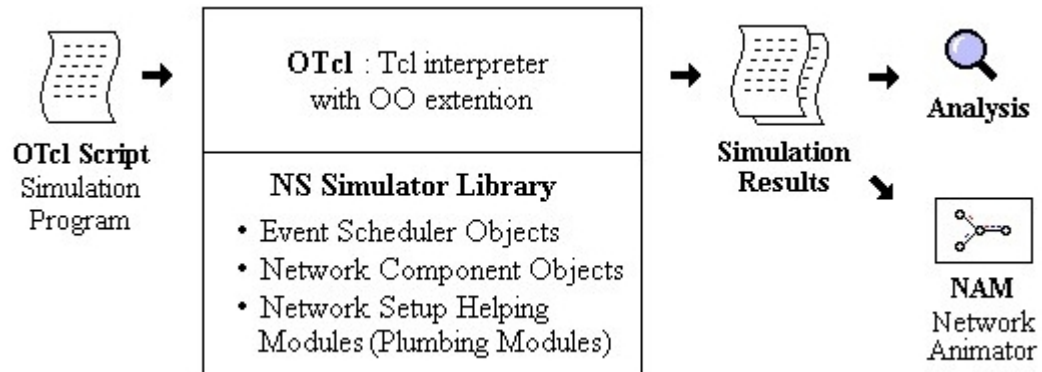


Figura 4.3: Visione d'insieme semplificata del simulatore NS

2. Come mostrato nella figura l'utente fornisce lo script OTcl in ingresso al simulatore definendo la topologia della rete e le applicazioni coinvolte nel simulatore. Quindi, dopo aver processato lo script, il simulatore fornisce in uscita il risultati che possono essere analizzati con i propri strumenti di analisi.

4.2.2 Il modello NS-2 dell'IEEE Std 802.15.4

Il modello NS-2 dell'IEEE Std 802.15.4 [16] sviluppato al Joint Lab of Samsung and the City University of New York ricalca le specifiche dello standard IEEE P802.15.4/D18. La Figura 4.4 evidenzia i moduli delle funzioni nel simulatore.

Il *Wireless Scenario Definition* seleziona il protocollo di routing, definisce la topologia della rete e pianifica gli eventi come l'inizializzazione del coordinatore della PAN, dei dispositivi e l'avvio/termine delle applicazioni. Definisce il modello di propagazione radio, il modello dell'antenna, il tipo di coda utilizzata, il tipo di traffico, il modello degli errori sul collegamento, il collegamento fra nodi, la struttura del superframe nelle reti con beacon, il raggio

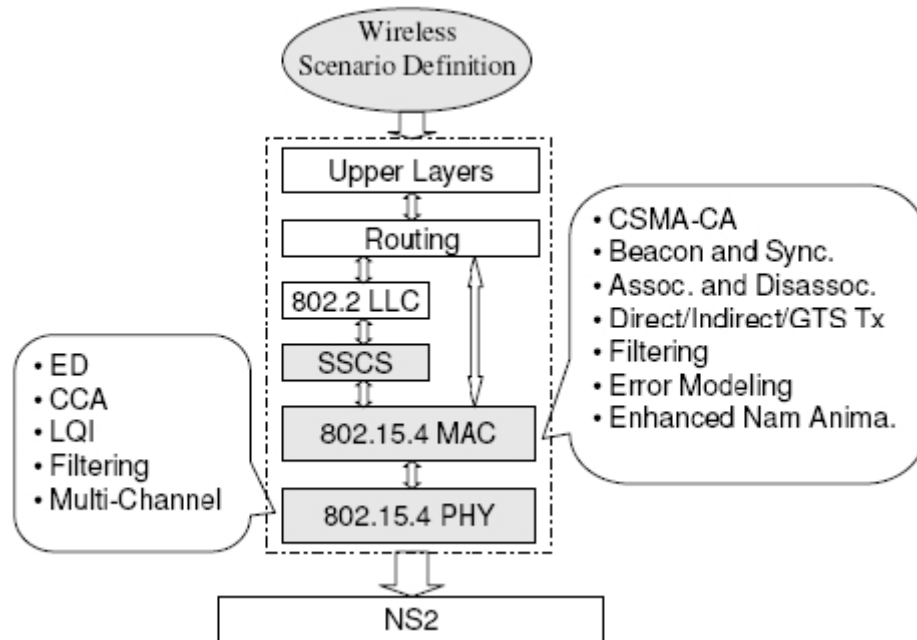


Figura 4.4: Modello NS-2 dell'IEEE Std 802.15.4

di copertura dei dispositivi e i parametri di configurazione per l'output grafico.

IL *Service Specific Convergence Sublayer (SSCS)* e' l'interfaccia fra il MAC 802.15.4 e i livelli superiori. Fornisce un punto di accesso a tutte le primitive MAC, ma puo' anche essere usato come contenitore per altre operazioni. E' un modulo specifico per l'implementazione in uso e le sue funzioni devono essere ritagliate opportunamente secondo l'applicazione utilizzata.

Il livello PHY 802.15.4 implementa tutte le 14 primitive PHY.

Il livello MAC 802.15.4 e' il modulo principale ed implementa tutte le 35 primitive del livello MAC.

4.2.3 L'algoritmo Directed Diffusion

L'algoritmo Directed Diffusion e' una paradigma di comunicazione per reti di sensori wireless [17] ed e' significativamente differente dalle comunicazioni basate su Inactive Period (IP) dove i nodi sono identificati dai loro terminali e la comunicazione fra nodi e' fatta su strati di servizi di consegna end-to-end all'interno della rete.

L'algoritmo directed diffusion e' data-centrico e consiste di svariati elementi [18]. I dati sono designati usando una coppia del tipo *(attributo, valore)*. Il compito di rilevazione che i sensori dovranno eseguire viene disseminato in tutta la rete dal nodo ricevitore come interesse per il tipo di dati designato. Questa disseminazione imposta dei valori di gradiente nella rete: tali valori servono per riportare gli eventi (i.e., dati che corrispondono agli interessi) al nodo di raccolta. Gli eventi fluiscono verso il nodo ricevitore attraverso percorsi multipli. La rete sceglie di rinforzarne uno o un piccolo gruppo per favorire e migliorare la ricezione degli eventi. La Figura 4.5 mostra questi elementi.

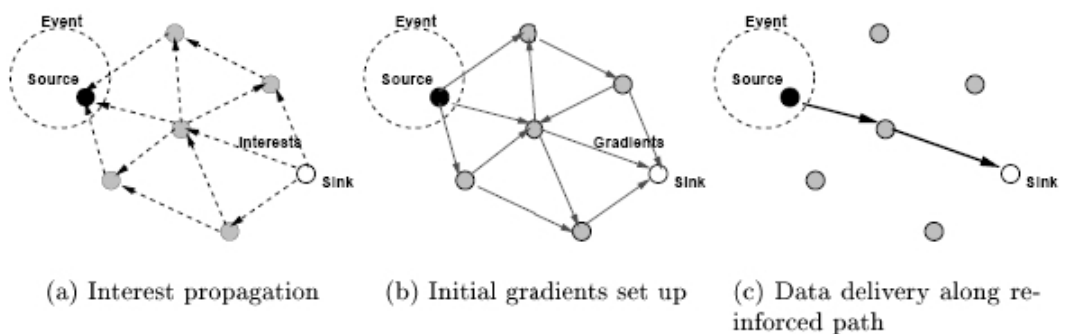


Figura 4.5: Schema semplificato per l'algoritmo directed diffusion

E' stato dimostrato che questo paradigma e' particolarmente adatto per reti

di sensori dal momento che ha un'alta efficienza energetica comparata ad altri sistemi (*i.e.*: flooding e multicast) e mostra prestazioni molto buone.

4.2.4 Descrizione della simulazione

Il lavoro di simulazione è stato effettuato configurando ciascun nodo rispettivamente come un dispositivo IEEE 802.15.4, IEEE 802.15.4a e PULSERS. Per ogni tipo di dispositivo la rete è stata impostata prima con un numero fisso di sorgenti e ricevitori aumentando progressivamente la grandezza della rete a parità di densità di nodi per verificare quanto la grandezza della rete possa incidere sulle prestazioni della rete stessa. In questa simulazione sono state utilizzate 5 sorgenti e 1 ricevitore incrementando il numero dei nodi presenti nella rete da 10 a 50, in passi da 10. Poi, la rete è stata impostata con un numero fisso di nodi aumentando il numero di sorgenti per verificare quanto le prestazioni sono colpite da un maggiore numero di sensori attivi. In questa simulazione la dimensione della rete è stata fissata a 20 nodi incrementando le sorgenti da 4 a 16, in passi da 3. Le reti sono state create casualmente con un generatore di topologie posizionando i nodi dentro un'area le cui dimensioni sono state scelte in modo da avere sempre la stessa densità di nodi, indipendentemente dal loro numero. Ciascun nodo usa l'algoritmo di directed diffusion, gli interessi sono generati periodicamente ogni 5 secondi e le sorgenti generano 2 eventi al secondo. Sia gli eventi che interessi sono modellati con pacchetti di 111 byte.

Il modello energetico dell'IEEE 802.15.4 è stato impostato per lavorare come un Chipcon CC2420 i cui parametri possono essere trovati in Tabella 4.1. L'IEEE 802.15.4a è stato invece modellizzato utilizzando i parametri del circuito integrato ASIC, sviluppato dal Centre for Wireless Communication (CWC), che realizza la radio UWB i cui parametri sono elencati nella stessa

tabella.

L'obiettivo della simulazione e' comparare i due dispositivi a differenti

Parametri	CC2420	UWB IC
Idle Power	0.2mW	0.2mW
Rx Power	50mW	80mW
Tx Power	50mW	20mW
Sleep Power	0.001mW	0.0001mW
Transition Power	0.2mW	0.2mW
Transition Time	0.001s	0.001s

Tabella 4.1: Parametri dei due ricetrasmittitori

data rate misurando i parametri tipici che hanno rilevanza all'interno di una rete di sensori, come il tempo di consegna medio, il rapporto fra pacchetti generati e pacchetti consegnati e l'energia dissipata media per trasmettere con successo un pacchetto. Quest'ultimo parametro e' particolarmente utile per analizzare lo sforzo effettuato dalla rete per consegnare con successo un pacchetto.

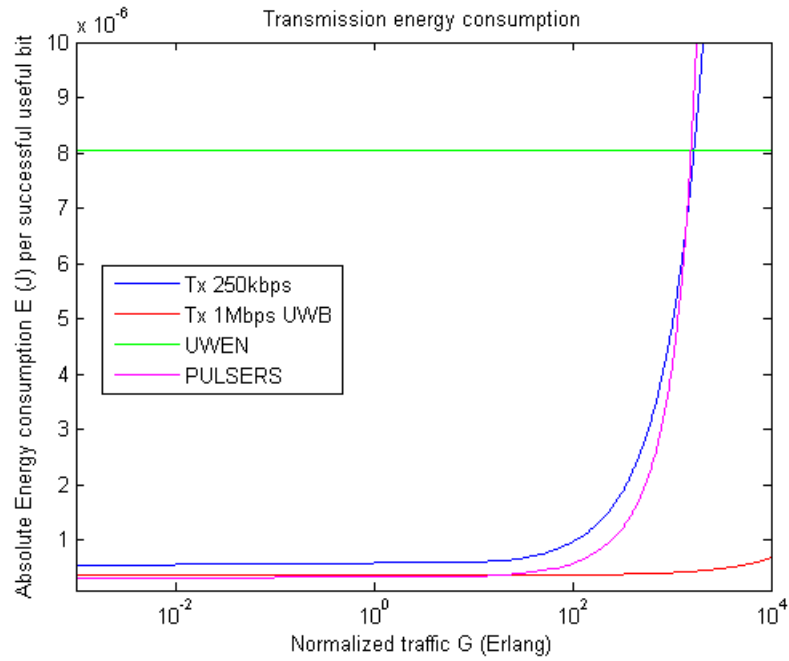
Capitolo 5

Risultati

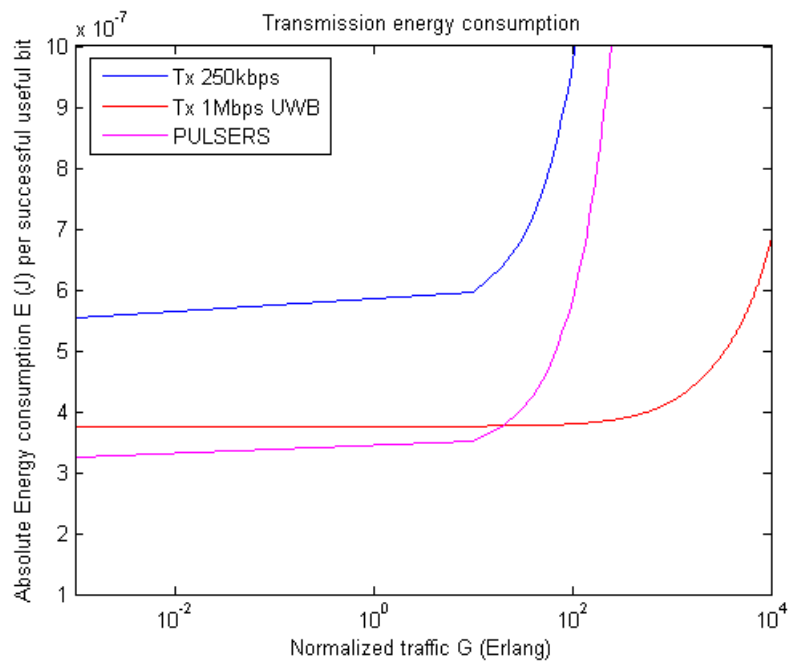
5.1 Risultati dell'analisi energetica

Questa sezione illustrerà i risultati ottenuti utilizzando il modello per l'analisi energetica vista nel capitolo precedente sui protocolli MAC introdotti nel Capitolo 3. Si ricorda che l'analisi è stata svolta sui MAC dei dispositivi IEEE 802.15.4 con un data rate di 250kbps, IEEE 802.15.4a a 1Mbps in tecnologia IR-UWB, PULSERS a 1Mbps in tecnologia IR-UWB ed UWEN a 5Mbps in tecnologia IR-UWB.

La Figura 5.1 mostra l'energia media dissipata in trasmissione per bit ricevuto con successo ottenuta in funzione del traffico normalizzato G . Per traffico normalizzato s'intende che il traffico offerto (in Erlang) è normalizzato alla capacità del canale. Così, se $G = 0$ significa assenza completa di traffico, $G = 1$ è un traffico pari alla capacità del canale. Per $G > 1$ s'intende che il traffico generato dalla rete (comprensiva di tutti i nodi) è superiore alla capacità del canale di un fattore G , causando una forte contesa del canale. Come è noto, essendo l'Erlang il rapporto fra traffico offerto alla rete e capacità della rete, è un'unità di misura adimensionale. Tale caratteristica è



(a) Energia dissipata media in trasmissione nei MAC analizzati



(b) Dettaglio dell'energia dissipata media in trasmissione

Figura 5.1: Comparazione dell'energia dissipata media in trasmissione

ben visibile nella Figura 5.1(a) dove si evidenzia che i protocolli ad accesso casuale si mantengono pressoché costanti per valori di G compresi nell'intervallo $[0 - 100]$ per poi divergere per valori di G superiori a 100. Questo significa che per un traffico offerto alla rete che supera di 100 volte la capacità del canale le collisioni e gli algoritmi di contesa del canale portano in congestione l'intera rete. Da notare che il sistema UWEN, essendo basato su TDMA, è completamente indipendente da G in quanto ciascun nodo trasmette nel proprio slot senza alcuna contesa. Questo sistema però porta ad una peggiore efficienza energetica e questo è ben visibile in Figura 5.1(a). Nella Figura 5.1(b) è invece mostrato un dettaglio di Figura 5.1(a) per meglio visualizzare e commentare le prestazioni dei tre MAC ad accesso a contesa. Appare subito evidente il risparmio energetico ottenuto utilizzando i sistemi UWB piuttosto che il sistema utilizzato dai dispositivi IEEE 802.15.4. Tale guadagno è giustificabile a causa della minore potenza in ricezione e durante lo stato di riposo. Un'altro dato da notare è la differenza del punto in cui i dispositivi entrano in congestione. Nei dispositivi IEEE 802.15.4a è molto ritardato rispetto ai dispositivi PULSERS che utilizzano una tecnica di accesso ALOHA slotted: quest'ultimi entrano, come previsto, in crisi per traffici molto inferiori. Nonostante utilizzi lo stesso algoritmo di accesso dell'IEEE 802.15.4a, l'IEEE 802.15.4 ha anche esso una zona di saturazione molto inferiore a quest'ultimo. Tale fenomeno è da imputarsi proprio al maggiore bitrate che permette di spedire i dati con una maggiore velocità impegnando quindi il canale per meno tempo, riducendo di conseguenza le collisioni.

5.2 Risultati delle simulazioni

Questa sezione illustrerà i risultati ottenuti attraverso le simulazioni effettuate con la procedura illustrata nel Capitolo precedente. La simulazione è stata svolta sui dispositivi IEEE 802.15.4 con un data rate a 40kbps e 250kbps, IEEE 802.15.4a a 1Mbps in tecnologia IR-UWB e PULSERS a 1Mbps in tecnologia IR-UWB.

Le Figure 5.2 mostrano i risultati relativi alla comparazione delle prestazioni per reti senza beacon a differenti data rate. Si tratta di una rete con un numero costante di sorgenti e ricevitori ma con un numero di nodi variabile. L'area occupata dalla rete è stata dimensionata in modo tale da far rimanere la densità dei nodi costanti. In questo modo è possibile valutare quanto le prestazioni siano affette dalla dimensione della rete. Gli eventi generati hanno una dimensione di 111 byte, ci si pone quindi nel caso di una rete che genera eventi di grandi dimensioni.

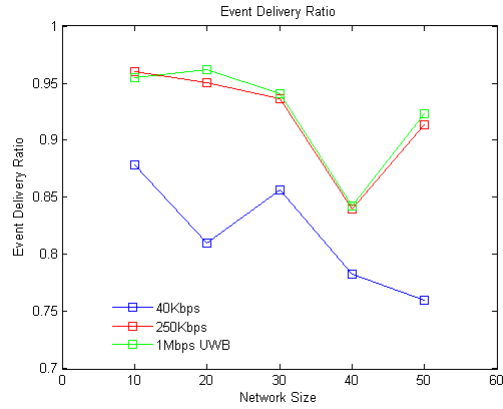
La Figura 5.2(a) mostra i valori dell'Event Delivery Ratio (EDR) ottenuti. L'EDR è il rapporto fra il numero totale di eventi generato dalla rete e il numero totale di eventi correttamente ricevuti. Questo parametro dà un'indicazione sull'affidabilità della rete dal punto di vista della consegna degli eventi ed è tanto più affidabile quanto più l'EDR si avvicina all'unità. È subito visibile che i dispositivi funzionanti a 40 kbps mostrano un EDR molto inferiore a quelli funzionanti a 250 kbps e a 1 Mbps, che invece ottengono prestazioni molto simili. Questo è da imputarsi proprio al basso valore del data rate e dalla dimensione dell'evento infatti, nelle condizioni di traffico sostenuto, i dispositivi funzionanti a 40 kbps non riescono a spedire con velocità i propri eventi, creando colli di bottiglia e causando molti packet-loss. La non regolarità dei grafici è causata dalle collisioni avvenute durante la fase di rinforzo dei gradienti dell'algoritmo d'instradamento di-

rected diffusion. Infatti i nodi sorgenti, dopo aver ricevuto gli interessi dal nodo ricevente, diffondono nella rete dei messaggi che servono a ricostruire il percorso piu' breve verso il nodo ricevente. Qualora si verificassero collisioni nella fase iniziale della diffusione, bloccando i primi messaggi di rinforzo e quindi bloccando la possibilita' che questi si diffondano nella rete creando un percorso di ritorno, si avrebbe che gli eventi generati dalle sorgenti si troverebbero orfani del percorso di ritorno e quindi andrebbero persi. Per poterli ricevere nuovamente sara' quindi necessario attendere la nuova fase di trasmissione degli interessi da parte del nodo ricevente.

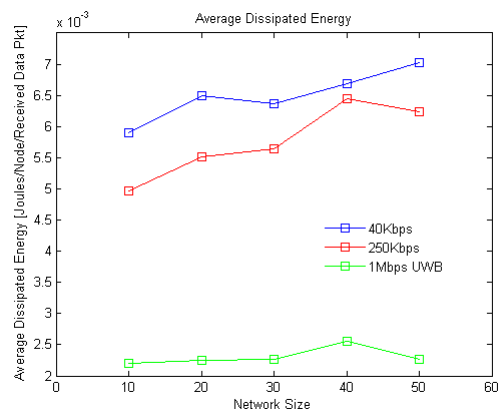
La Figura 5.2(b) mostra invece l'energia media dissipata per spedire con successo un pacchetto. Questo parametro da un'idea su quanto si sforzi la rete per consegnare un evento. Il sistema UWB consuma notevolmente meno dei sistemi di trasmissione classici, questo grazie ad un minor consumo di energia durante la fase di trasmissione e riposo.

Infine, in Figura 5.2(b) e' mostrato il tempo medio impiegato da un evento generato da una sorgente per arrivare al nodo ricevente. E' evidente il notevole ritardo nella consegna degli eventi nella rete funzionante a 40 kbps, con picchi di ritardo causati dalla congestione della rete, rispetto agli altri dispositivi. Notevole anche la bassa latenza mostrata dai dispositivi UWB che, grazie alla loro velocita' di trasmissione, evitano congestioni e garantiscono una maggiore fluidita' nella consegna.

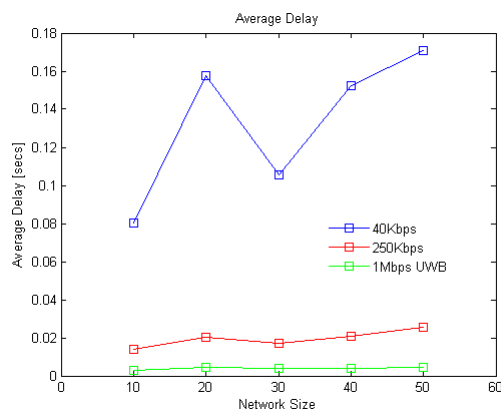
Le Figure 5.3 mostrano i risultati relativi alla comparazione dei dispositivi IEEE 802.15.4 funzionanti a 250 kbps in reti con e senza beacon. In Figura 5.3(a) si vede che, ignorando le solite irregolarita' dovute all'algoritmo di directed diffusion, i grafici creano un punto d'inversione per una rete con 30 nodi. Prima di tale punto il funzionamento senza beacon ottiene prestazioni migliori di quello con beacon, mentre per valori superiori il funzionamento



(a) Comparazione dell'Event Delivery Ratio



(b) Comparazione dell'energia dissipata media



(c) Comparazione dei tempi di latenza

Figura 5.2: Comparazione delle prestazioni per reti senza beacon a differenti data rate, prima simulazione

con beacon prende il sopravvento e garantisce un EDR migliore. Questo è dovuto al fatto che in reti con elevato numero di nodi la trasmissione ordinata durante i superframe garantisce un miglior funzionamento della rete stessa rispetto al caso di trasmissione asincrona che crea maggiori collisioni e packet-loss.

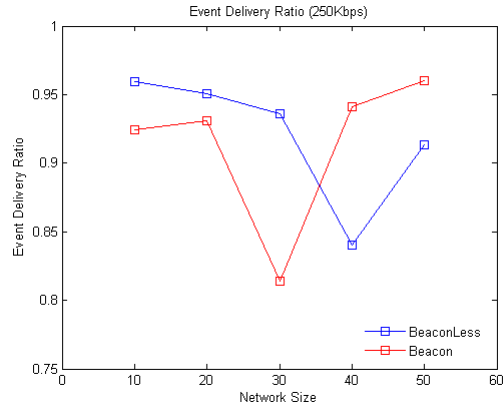
Nella Figura 5.3(b) sono invece evidenziati i valori dell'energia media dissipata per evento ricevuto. La trasmissione con beacon è, come previsto, sensibilmente più dispendiosa in termini energetici dell'analoga trasmissione senza beacon. Da notare i picchi dei grafici che evidenziano avvenute nella rete a 30 nodi per la rete con beacon e, in misura meno marcata, a 40 per la rete senza beacon. Questo ci dà ancora una volta la conferma della bontà di questo indicatore per il rilevamento di problemi nella rete.

Per quanto riguarda invece la latenza media nella consegna degli eventi, in Figura 5.3(c) si vede che il funzionamento con beacon mostra una maggiore latenza proprio a causa della suddivisione in slot dell'asse temporale.

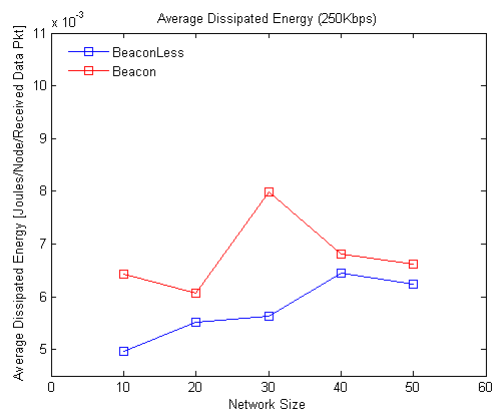
Infine, in Figura 5.4 vengono mostrate le stesse comparazioni riferite però ai dispositivi IEEE 802.15.4a ad 1 Mbps UWB. Anche in questo caso si nota dalla Figura 5.4(a) la presenza di un punto d'inversione intorno ai 30 nodi. I valori di EDR, come anticipato dalle Figure 5.2(a) e 5.3(a), si mantengono intorno al 95%.

Analogamente al caso precedente, in Figura 5.4(b) sono mostrati i valori dell'energia media dissipata per evento ricevuto e, come previsto, i valori relativi alla rete con beacon sono superiori a quella senza. Da notare, rispetto al caso precedente, che i valori di energia dissipata in entrambi i casi sono notevolmente inferiori grazie all'impiego della tecnologia UWB.

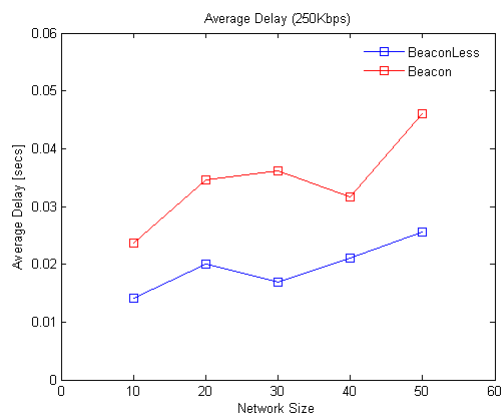
Nella Figura 5.4(c) viene invece mostrato il ritardo medio di consegna degli eventi. In questo caso è evidente il notevole risparmio di tempo rispetto



(a) Comparazione dell'Event Delivery Ratio

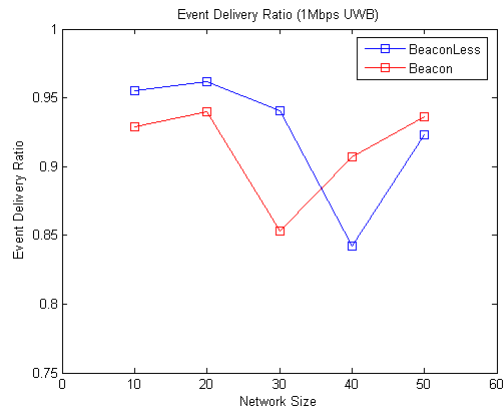


(b) Comparazione dell'energia dissipata media

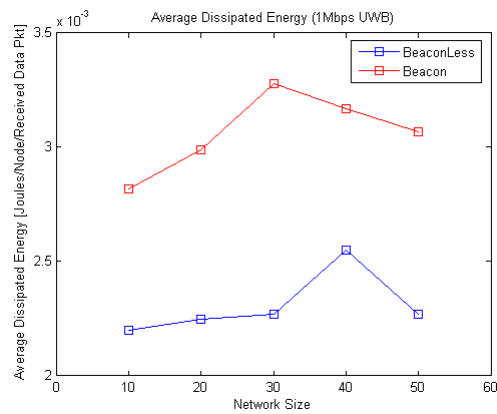


(c) Comparazione dei tempi di latenza

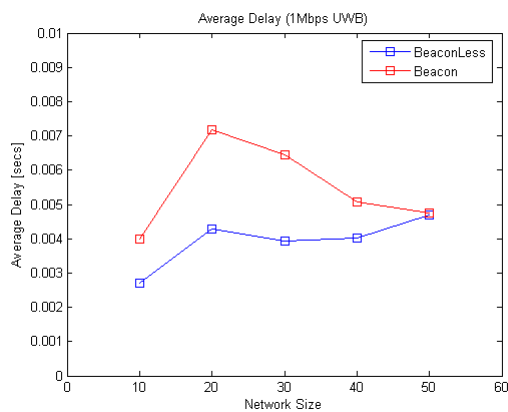
Figura 5.3: Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 250kbps, prima simulazione



(a) Comparazione dell'Event Delivery Ratio



(b) Comparazione dell'energia dissipata media



(c) Comparazione dei tempi di latenza

Figura 5.4: Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 1Mbps UWB, prima simulazione

al caso precedente che ammonta a quasi un ordine di grandezza. Questo e' ovviamente dovuto all'elevato data rate utilizzato che permette di spedire velocemente gli eventi e minimizzare le code.

Passando ad analizzare il comportamento della rete avendo un numero fisso di nodi e un numero crescente di sorgenti, possiamo subito vedere il comportamento, in reti senza beacon, dei dispositivi funzionanti a 40 kbps, 250 kbps e 1 Mbps nella Figura 5.5. Queste simulazioni ci permettono di valutare le prestazioni di una rete quando e' sottoposta ad un crescente carico di lavoro a causa del numero elevato di eventi generato dalle sorgenti.

Piu' precisamente in Figura 5.5(a) sono mostrati gli EDR per i tre dispositivi. Come previsto, i dispositivi a 40 kbps non riescono a sostenere il crescente carico di lavoro e portano in congestione la rete causando numerosi eventi persi. Differentemente si comportano i dispositivi a 250 kbps e 1 Mbps UWB che mantengono le stesse prestazioni che declinano aumentando il carico della rete.

In Figura 5.5(b) sono mostrate l'energie medie dissipate per evento ricevuto. E' interessante notare l'andamento divergente del grafico relativo ai dispositivi a 40 kbps. Piu' la rete e' congestionata e piu' il grafico dell'energia dissipata media diverge. Questo fornisce un'indicazione del comportamento previsto anche per le curve relative ai dispositivi a 250 kbps e 1 Mbps UWB se la rete fosse caricata ulteriormente.

Nella Figura 5.5(c) sono mostrati i ritardi medi di consegna di un evento. I dispositivi a 250 kbps e 1 Mbps UWB mostrano un andamento dei ritardi lineare, che indicano una buona capacita' di gestione della rete anche ad elevati carichi. Differentemente i dispositivi a 40 kbps hanno un andamento divergente che mette in evidenza l'incapacita' di gestire l'elevato traffico ge-

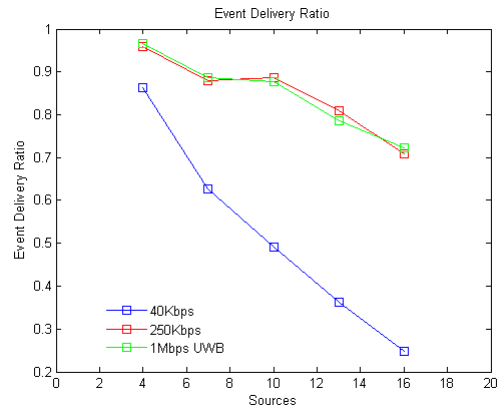
nerato, come già evidenziato in Figura 5.5(a).

La Figura 5.6 racchiude i risultati della comparazione dei dispositivi IEEE 802.15.4 funzionanti a 250 kbps in reti con e senza beacon. In Figura 5.6(a) sono raffigurati gli EDR per i suddetti dispositivi, si può notare un comportamento simile fra rete con e senza beacon. Questo significa che la suddivisione in slot temporali non comporta un miglioramento delle prestazioni della rete quando il traffico aumenta a differenza di quanto accadeva nel caso di traffico fisso ma con numero di nodi crescente. Ciò è dovuto ad un traffico troppo elevato che non viene gestito efficacemente neanche attraverso una suddivisione in slot temporali.

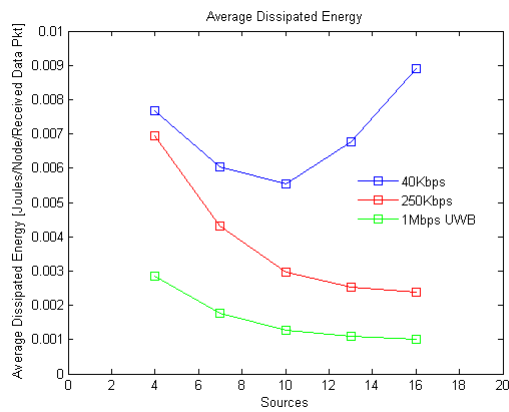
Nella Figura 5.6(b) sono invece mostrate l'energia medie dissipate per evento ricevuto. La figura mostra dei risultati in linea con quanto visto in precedenza. Ad analoghe conclusioni si giunge osservando la Figura 5.6(c) che mostra il ritardo medio di consegna di un evento. Come previsto la rete con beacon presenta un ritardo maggiore a causa della suddivisione in superframe.

Per concludere, la Figura 5.7 mostra i risultati delle simulazioni per dispositivi IEEE 802.15.4a a 1 Mbps UWB in rete con e senza beacon. I valori di EDR, mostrati in Figura 5.7(a), si mantengono sui valori già anticipati nelle Figure 5.5(a) e 5.6(a). Per quanto riguarda l'energia dissipata media per evento ricevuto, dalla Figura 5.7(b) si nota che anche in questo caso l'energia risparmiata grazie all'utilizzo della tecnologia UWB, sia per il caso con beacon che nel caso senza. Infine, in Figura 5.7(c) è mostrato il ritardo di consegna medio di un evento. Anche in questo caso il risparmio di tempo ottenuto utilizzando la tecnologia UWB è evidente.

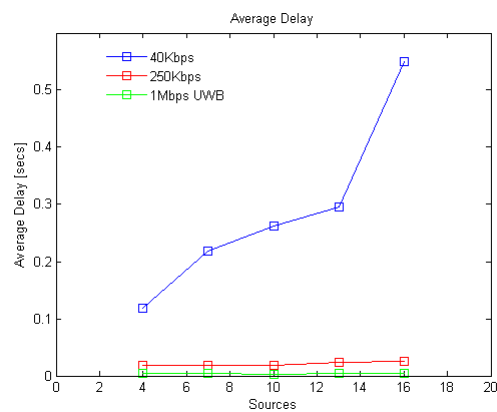
Un discorso a parte necessita di essere fatto per le simulazioni riguardanti i dispositivi PULSERS. Dopo aver adattato il livello MAC dell'IEEE 802.15.4



(a) Comparazione dell'Event Delivery Ratio

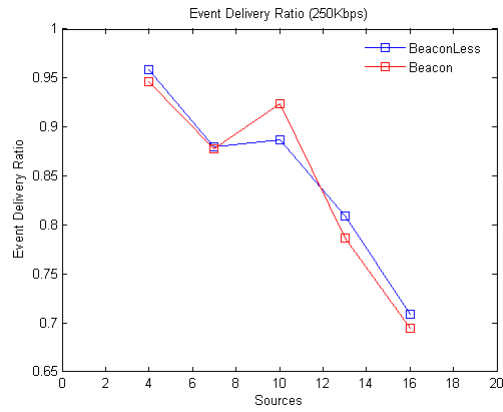


(b) Comparazione dell'energia dissipata media

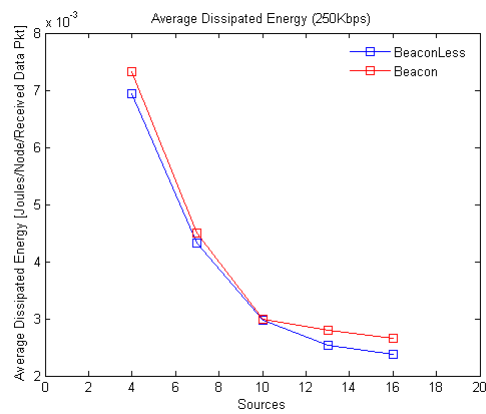


(c) Comparazione dei tempi di latenza

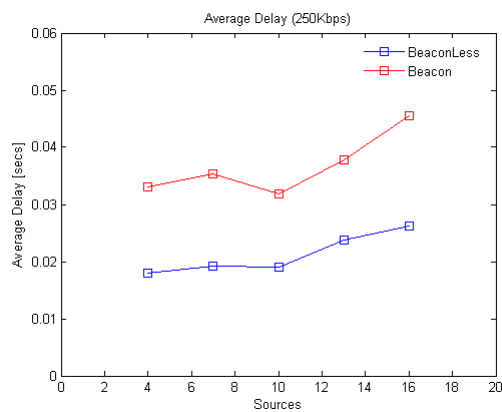
Figura 5.5: Comparazione delle prestazioni per reti senza beacon a differenti data rate, seconda simulazione



(a) Comparazione dell'Event Delivery Ratio

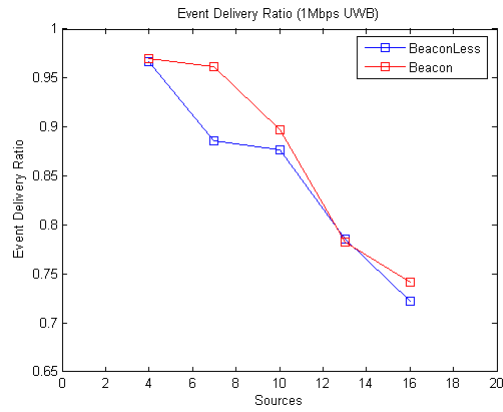


(b) Comparazione dell'energia dissipata media

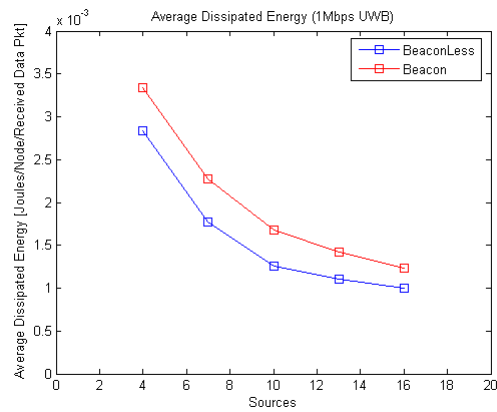


(c) Comparazione dei tempi di latenza

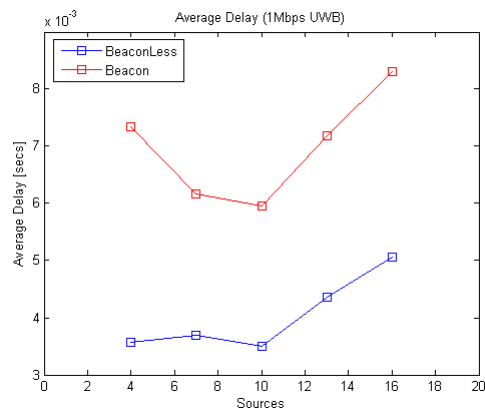
Figura 5.6: Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 250kbps, seconda simulazione



(a) Comparazione dell'Event Delivery Ratio



(b) Dettaglio dell'energia dissipata media in trasmissione



(c) Comparazione dei tempi di latenza

Figura 5.7: Comparazione delle prestazioni per reti con e senza beacon a 1Mbps UWB, seconda simulazione

secondo le specifiche attuali del PULSERS sono stati evidenziati notevoli problemi durante l'inizializzazione della rete, soprattutto durante la fase di associazione che ha compromesso irrimediabilmente l'esito delle simulazioni. La presenza di un numero limitato di slot nel superframe per l'associazione dei dispositivi e per l'invio dei comandi ha fatto in modo che in una rete anche di modeste dimensioni la contesa di questi slot impedisse l'avvio della rete stessa. Per questo nessun risultato riguardante i dispositivi PULSERS e' stato fornito.

Capitolo 6

Conclusioni

6.1 Conclusioni

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, nella Sezione 5.1, i sistemi UWB garantiscono un notevole risparmio energetico rispetto ai dispositivi tradizionali. Questo li rende particolarmente idonei per essere utilizzati in applicazioni embedded, anche grazie alla particolare semplicità realizzativa che garantisce la produzione di dispositivi a basso costo. In particolare, il prototipo dell'IEEE 802.15.4a si presta molto bene anche ad applicazioni soggette ad elevati traffici, quali ampie reti di sensori o applicazioni wireless per PDA e notebook, garantendo una maggiore autonomia della batteria che è considerata un elemento critico in ambienti mobili. Il sistema PULSERS a causa del protocollo di accesso ALOHA slotted, fornisce peggiori prestazioni all'aumentare del traffico ma in semplici applicazioni di tipo 'cable replacement' può essere un ottimo sostituto a minor consumo degli attuali IEEE 802.15.4 e Bluetooth. Per quanto riguarda i dispositivi UWEN, il maggior consumo energetico può essere tollerato considerando il tipo applicazioni che andranno a ricoprire. Si tratta infatti di dispositivi ad uso giornaliero, spesso

di poche ore, che andranno distrutti dopo l'uso. In questo caso e' il fattore economico ad essere determinante, i dispositivi ad infrastruttura fissa e tecnologia TDMA garantiscono costi di mantenimento minori e quindi ad una minore incidenza sul costo del prodotto finale (*i.e.*, dispositivi integrati negli skipass con solo un lieve aumento dei costi).

Passando alla valutazione dei risultati delle simulazioni, visibili nella Sezione 5.2, le reti di sensori con algoritmo d'instradamento directed diffusion mostrano buone prestazioni e l'utilizzo di data rate moderati fornisce una maggiore garanzia di funzionamento a seguito di un'aumento, anche elevato, del traffico generato dalla rete. E' comunque visibile il notevole vantaggio dei dispositivi UWB che, grazie alla loro tecnologia e l'elevato data rate, forniscono minori latenze nella consegna degli eventi e una minore energia consumata. Per quanto riguarda la tecnologia PULSERS, le simulazioni non hanno fornito risultati soddisfacenti che, come spiegato nel capitolo precedente, sono attribuibili alla struttura attuale del superframe che garantisce un numero limitato di slot per le procedure di associazione e per l'utilizzo dei comandi MAC.

Quindi, in definitiva, la tecnologia basata sulla tecnologia UWB attualmente si prospetta come una promettente soluzione per dispositivi mobili, reti di sensori e tutte quelle applicazioni che necessitano un risparmio energetico. La possibilita' di ottenere un maggiore data rate, mantenendo comunque un minore consumo energetico, la rendono adatta anche ad applicazioni mobili in cui il tempo di latenza rappresenta un fattore critico. Inoltre, la tecnologia IR-UWB LDR, trasmettendo brevi impulsi molto distanti fra loro, presenta un notevole vantaggio rispetto alla tecnologia SS permettendo di ottenere minori collisioni e quindi protocolli di accesso piu' semplici.

6.2 Sviluppi Futuri

Il sistema PULSERS, a seguito dell'analisi effettuata, necessita di una revisione della struttura del superframe per ottenere una migliore gestione degli slot del periodo a contesa CAP. Questo, per esempio, puo' essere ottenuto attraverso una gestione dinamica della lunghezza del CAP che lo adatta alle necessita' correnti.

Un nuovo studio puo' essere effettuato rendendo il sistema utilizzato per le simulazioni di tipo 'cross-layer', permettendo al MAC dei dispositivi di variare il duty-cycle del superframe a seconda del traffico generato dai livelli superiori. Questo dovrebbe comportare una migliore gestione del superframe al variare del traffico permettendo di ottenere migliori prestazioni globali.

Bibliografia

- [1] Federal Communications Commission (FCC), *First Report and Order*. ET Docket 98-153, FCC 02-48, Adopted: February 14, 2002 Released: April 22, 2002.
- [2] J. A. Gutierrez, E. H. J. Callaway, and R. L. J. Barret, *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*, 1st ed. IEEE Press, November 2003.
- [3] J. Haapola, Z. Shelby, C. Pomalaza-Rez, and P. Mhnen, *Multi-hop Medium Access Control for WSNs: An Energy Analysis Model*. Center for Wireless Communication (CWC), University of Oulu, 2005.
- [4] H. Zimmermann, *OSI reference model—The ISO model for Open System Interconnection*. IEEE Trans.Commun., April 1980, vol. COM-28, no. 4, pp. 425–432.
- [5] N. Abramson, “The ALOHA system – another alternative for computer communications,” in *Fall Joint Computer Conference*, vol. 37. Montvale, NJ, 1970, pp. 281–285.
- [6] L. Roberts, *ALOHA packet system with and without slots and capture*. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 1975, vol. 5 Issue: 2, pp. 28–42.

-
- [7] L. Kleinrock and F. A. Tobagi, *Packet Switching in Radio Channels: Part I—Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics*. IEEE Transaction on Communications, December 1975, vol. 23 Issue: 12, pp. 1400–1416.
- [8] P. Karn, “Maca – a new channel access method for packet radio,” in *9th ARRL Computing Networking Conference*, September 1990, pp. 134–140.
- [9] IEEE Std 802.15.11, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. IEEE Press, 1999.
- [10] IEEE Std 802.15.4-2003, *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) - Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE Press, 2003.
- [11] Pulsers Working Group, *Definition of UWB scenarios*. PHI, THA, TEL, ROB, ACO, RLB, UAT, CDS, 2004.
- [12] —, *Deriverable D53.2: MAC and Networking Algorithms Specifications, Operating Code Specifications, test S/W specifications (MAC debug) [LDR-LT]*. STM, CEA, THA, 2005.
- [13] —, *Deriverable D51.2a: Definition of new concepts/architectures for UWB MAC and networking [LDR-LT], initial version*. CEA, CRM, MIT, ROB, STM, THA, UOR, UOU, 2004.
- [14] I. Opperman, Z. Shelby, J. Haapola, A. Rabbachin, and K. Yu, *Revised UWEN system concept*. CWC, 2004.
- [15] L. Stoica, I. Opperman, Z. Shelby, and M. Huttunen, *UWEN Transceiver Architecture*. CWC, 2004.

-
- [16] J. Zheng and M. J. Lee, *A Comprehensive Performance Study of IEEE Std 802.15.4*. IEEE Press Book, 2004.
- [17] D. E. J. H. Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan and F. Silva, *Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking*. ACM/IEEE Transactions on Networking, 2002, vol. 11 (1), pp. 2–16.
- [18] R. G. Chalermek Intanagonwiwat and D. Estrin, *Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks*. In Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCOM 2000), August 2000.