

RFID

Fondamenti di una tecnologia silenziosamente pervasiva



PARTE IV

CODIFICHE E MODULAZIONI NEI SISTEMI RFID



di Paolo Talone, Giuseppe Russo

Fondazione Ugo Bordoni

Si tratta di una parte dedicata ad approfondimenti tecnologici, che presuppone conoscenze di base nelle tecnologie impiegate per la trasmissione radio. Vengono pertanto illustrati alcuni aspetti tecnici della radiocomunicazione tra TAG e Reader:

- *Codifica dei dati, ovvero il modo di generare un segnale binario a partire dai dati che il dispositivo (TAG o Reader) ha in memoria. Vengono trattate anche tecniche che sfruttano la codifica per ottenere trasferimento di potenza o particolari effetti nelle modulazioni del segnale radio.*
- *Tecniche di modulazione dei segnali radio, con particolare riguardo a sistemi rivolti a TAG passivi che richiedono accortezze particolari. Vengono anche forniti cenni sulla struttura dei ricevitori.*
- *Tecniche di interrogazione del Reader e tecniche di risposta dei TAG (Protocolli anti collisione). Vengono anche trattati metodi di sincronizzazione tra interrogazioni e risposte, specie nei casi in cui molti TAG e diversi Reader condividono la medesima distanza operativa.*

IV.1 CODIFICA DEI DATI

Nel TAG e nel Reader, i dati da trasmettere devono essere codificati in modo da generare un segnale unipolare binario che verrà usato per la modulazione. Esistono numerosissime tecniche di codifica, ognuna con caratteristiche differenti relativamente all'occupazione spettrale in banda base, alla complessità di co-decodifica, alla difficoltà di ricostruire la temporizzazione in ricezione, alla sensibilità ai disturbi (che determinano errori di trasmissione) e all'energia trasferita. Questi costituiscono infatti i parametri chiave nella selezione delle tecniche più convenienti per l'uso nei sistemi RFID.

In particolare, i sistemi basati su TAG passivi impongono vincoli piuttosto stringenti sulla scelta della metodologia di codifica. La indisponibilità di sorgenti di temporizzazione ad elevata precisione a bordo del TAG, i vincoli sulla larghezza di banda e, soprattutto, la necessità di massimizzare il trasferimento di potenza per l'alimentazione del TAG, rendono la codifica dei dati un'operazione critica per molte applicazioni RFID.

Nella trasmissione Reader=>TAG deve essere massimizzata l'energia nel segnale, per fornire la maggior energia possibile al TAG.

Nella trasmissione TAG=>Reader deve essere minimizzata l'energia nel segnale, per la scarsità di energia disponibile. D'altro canto l'ampiezza del segnale deve essere tale da consentirne la rilevazione da parte del Reader.

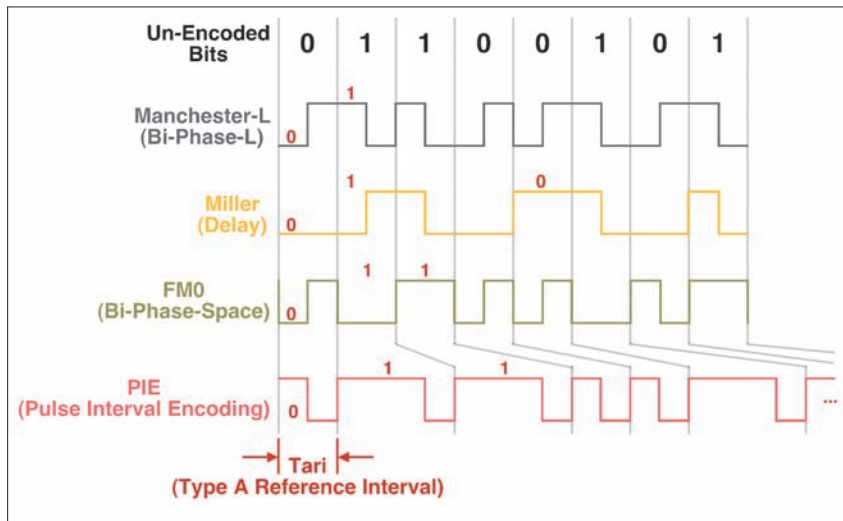
In genere si utilizzano codifiche basate sulla durata degli impulsi (PIE - Pulse Interval Encoding) oppure basate sulle transizioni (Manchester, Miller, FM0).

I metodi di codifica denominati Manchester (Bi-Phase-L) e Pulse Interval Encoding (PIE) sono quelli più utilizzati nelle comunicazioni dai Reader verso i TAG massimizzando l'energia del segnale.

Una caratteristica importante di questi metodi di codifica è che, essendo basati sulle transizioni, forniscono una sequenza codificata "auto-temporizzata". Tale caratteristica consente di ridurre drasticamente, nei TAG passivi, la circuiteria necessaria per la sincronizzazione.

I metodi denominati Miller ed FM0 invece risultano più idonei all'impiego nella comunicazione dai TAG passivi verso i Reader, minimizzando

Figura IV.1
I sistemi RFID utilizzano una varietà di tecniche di codifica. Caratteristiche fondamentali da valutare sono la complessità di sincronizzazione e l'intensità della componente a frequenza zero [7]



l'energia del segnale, soprattutto per la loro proprietà di possedere la componente spettrale a frequenza zero nulla.

Nei metodi di codifica è definita la durata temporale minima dell'impulso. Tale intervallo temporale è denominato TARI (ISO/IEC 18000-6 Type A Reference Interval).

IV.1.1 CODIFICA MANCHESTER

Nella codifica Manchester ogni bit viene segnalato da una transizione come illustrato nella Figura IV.1. Proprio per tale caratteristica la codifica Manchester è considerata una codifica auto-temporizzata, in quanto la struttura del segnale codificato consente un'accurata sincronizzazione del flusso dati in ricezione.

La codifica Manchester fornisce un modo semplice per codificare sequenze binarie arbitrarie senza mai avere lunghi periodi di tempo privi di transizioni di segnale, il che permette di prevenire la perdita della sincronizzazione del clock, oppure errori di bit causati da derive del livello di base del segnale ricevuto. Assicura infatti che la componente a frequenza zero del segnale codificato sia zero.

La codifica di ogni bit occupa un intervallo di tempo predefinito

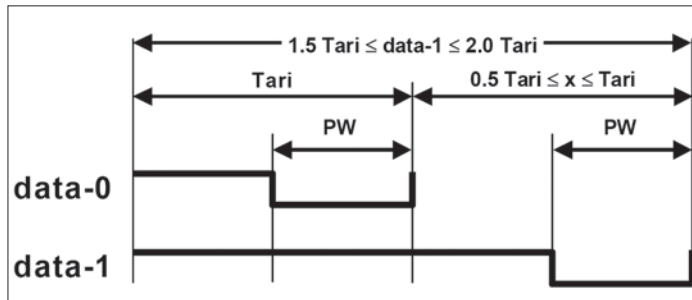
“time slot”. Questo time slot è diviso in due metà, chiamate mezzo bit.

Nella codifica Manchester uno zero è codificato con una assenza di modulazione nel primo mezzo bit ed una modulazione nel secondo mezzo bit. Viceversa un bit uno è codificato con una modulazione nel primo mezzo bit ed una non modulazione nel secondo mezzo bit.

IV.1.2 CODIFICA PIE

La codifica di tipo PIE (Pulse Interval Encoding) è basata su un TARI (cfr.§IV.1) predefinito. I bit zero ed uno così come simboli speciali quali Start Of Frame (SOF) ed End Of Frame (EOF) sono composti da un numero differente di periodi TARI. Conseguentemente, a parità del numero di simboli da codificare, la lunghezza della sequenza codificata risulta variabile, tuttavia questa caratteristica risulta di scarsa importanza poiché la sequenza codificata risulta auto-temporizzata. Il valore TARI rappresenta anche l'ampiezza d'impulso minima presente nel segnale

Figura IV.2
TARI [EPCglobal]



modulato, fattore importante per determinare la larghezza di banda del segnale trasmesso. In particolare, più basso è il valore TARI, più elevata sarà l'occupazione di banda del segnale.

Gli standard più recenti come ISO/IEC 18000-6, Type C consentono l'uso di differenti valori TARI (6,25, 12 & 25 μs) per soddisfare i differenti vincoli regolamentari sull'emissione spettrale nelle diverse aree del mondo.

IV.1.3 CODIFICHE MILLER E FMO

Un'altra caratteristica fondamentale nella scelta delle codifiche più adatte all'implementazione nei TAG passivi è costituita dalla loro componente spettrale a frequenza zero. Infatti i TAG passivi modulano, tramite back-scattering, una portante ricevuta. Nel Reader il segnale è filtrato per eliminare la componente a frequenza zero, preservando solo le molto più deboli componenti modulate dal TAG. Nella comunicazione TAG=>Reader

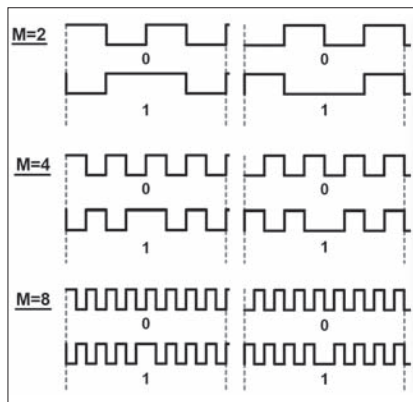


Figura IV.3
Codifica di Miller per la generazione
di sottoportanti [EPCglobal]

sono richieste pertanto codifiche con una componente spettrale a frequenza zero nulla o con energia molto bassa tale da non interferire con il segnale ricevuto e da minimizzare l'emissione di energia da parte del TAG. Le codifiche di tipo Miller e FM0 godono di tale proprietà.

Come illustrato nella Figura IV.1, anche nel caso della codifica di Miller la codifica di ogni bit occupa un intervallo di tempo predefinito "time slot". Questo time slot è diviso in due metà, chiamate mezzo bit.

Un uno è codificato con una transizione da assenza di modulazione a presenza di modulazione o viceversa tra i due mezzi bit del simbolo. Un bit zero è codificato invece continuando la presenza o l'assenza di modulazione come nel precedente mezzo bit oppure invertendo tale stato.

In altri termini si può affermare che nella codifica di Miller si ha un'inversione di fase in banda base nel caso di due zero consecutivi.

Nella codifica Miller modificata ogni transizione è rimpiazzata da un impulso negativo con durata molto inferiore al periodo di durata del bit.

Nella codifica FM0 (cfr. Figura IV.1) invece si ha un'inversione di fase in banda base ad ogni inizio di simbolo ed inoltre la codifica del simbolo zero ha un'inversione tra il primo mezzo bit ed il secondo.

Lo standard ISO/IEC 18000-6 Type C perfeziona ulteriormente la codifica di Miller offrendo differenti sub-carrier rates (Figura IV.3). Come verrà accennato nei paragrafi dedicati alle tecniche di modulazione (cfr. §IV.2.4.1), incrementando di un fattore M (ad esempio $M=2, 4, 8$) il numero di transizioni presenti nell'ambito dell'intervallo di tempo dedicato alla trasmissione di un simbolo codificato si generano sottoportanti a frequenze via via più distanti dalla portante agevolando così la ricezione da parte del Reader e conseguentemente ottimizzando il raggio di copertura, la velocità e l'occupazione spettrale del sistema.

IV.2 TECNICHE DI MODULAZIONE DEI SISTEMI PASSIVI

Nella comunicazione tra Reader e TAG e viceversa, vengono usate tecniche di modulazione semplici che richiedono bassa complessità circuitale e in cui l'ampiezza, la fase o la frequenza, vengono variate in accordo con

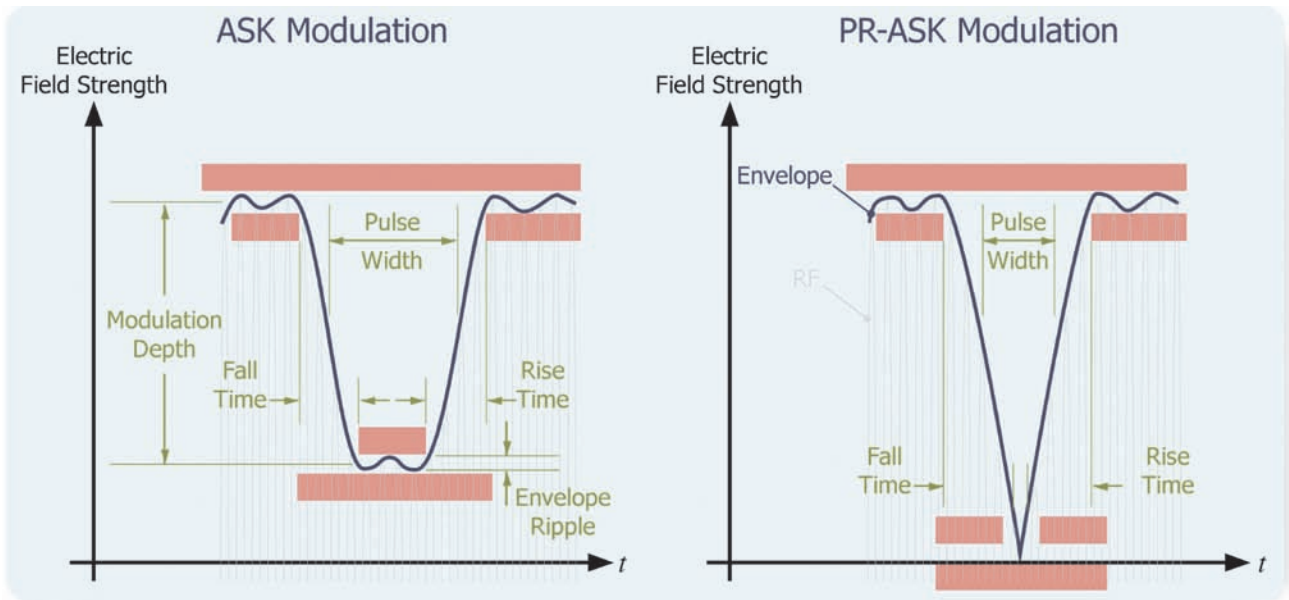
l'informazione trasportata da un segnale unipolare binario. I tre tipi di modulazione più comuni sono:

- ASK – (Amplitude Shift Keying), la ben nota modulazione d'ampiezza binaria, il segnale modulante (binario) causa la variazione tra due ampiezze della portante. Se la minore delle due ampiezze è 0, la modulazione è chiamata On-Off Keying (OOK).

La modulazione ASK può inoltre essere di tipo Double Side Band-Amplitude Shift Keying (DSB-ASK) oppure Single Side Band-ASK (SSB-ASK) che saranno descritte nei paragrafi seguenti.

- Phase Reversal-ASK (PR-ASK) nella quale il segnale modulante (binario) causa lo spostamento di fase di 180° della portante. Simile alla cosiddetta BPSK (Binary Phase Shift Keying) prevede che la rivelazione avvenga sulla base dell'ampiezza del segnale ricevuto, e non della fase, così da ottenere un segnale in banda base simile a quello ricavato ad una modulazione ASK.
- FSK – (Frequency Shift Keying), il segnale modulante (binario) causa lo spostamento della portante tra due frequenze.

Figura IV.4
La profondità di modulazione (modulation depth) (o equivalentemente l'indice di modulazione), il tempo di salita (rise time) e il tempo di discesa (fall time) sono specificate in modo che il Reader possa alimentare adeguatamente i TAG e leggerne i dati [7]



Un parametro di grande importanza è l'indice di modulazione, (espresso possibilmente in percentuale) definito negli standard come $(a - b)/(a + b)$ dove a e b sono il valore massimo e quello minimo dell'ampiezza del segnale modulato.

Sebbene la tecnologia a modulazione d'ampiezza sia ormai superata da tecniche più moderne e più efficienti, essa presenta ancora il fondamentale vantaggio costituito dalla semplicità circuitale e di conseguenza la ridotta potenza di alimentazione che favorisce l'implementazione nei TAG passivi. Le tecniche di modulazione più moderne invece, data la maggiore complicazione circuitale necessaria per ottenere elevate prestazioni non sono ancora implementabili (con poche eccezioni nelle bande di frequenza più basse) avendo a disposizione potenze estremamente limitate.

Poiché le caratteristiche di propagazione del segnale dipendono in maniera essenziale dalla frequenza operativa, i sistemi RFID che operano sulle bande LF, HF e UHF utilizzano codifiche e modulazioni differenti.

Inoltre dato che le condizioni operative dei Reader e dei TAG sono molto diverse, anche nella trasmissione TAG =>Reader e Reader =>TAG vengono usate tecniche di codifica e modulazione differenti.

IV.2.1 PRINCIPALI TECNICHE DI MODULAZIONE

Le tecniche di modulazione adoperate in ambiente RFID, devono soddisfare criteri di efficienza sia per l'occupazione spettrale (rapporto bit/Hertz) sia per potenza necessaria alla trasmissione (rapporto segnale/rumore). A questo si aggiunge la necessità di trasferire potenza elettrica al TAG in modo continuo.

2.1.1 Tecniche DSB-ASK e SSB-ASK (banda laterale doppia e banda laterale unica)

Le modulazioni digitali di tipo ASK sono inefficienti da un punto di vista dell'occupazione spettrale per un prefissato bitrate. Efficienze spettrali dell'ordine di 0,20 bit/Hertz non sono inusuali per le tecniche a banda

laterale doppia, DSB-ASK. La modulazione DSB-ASK, infatti, è la tecnica meno efficiente in termini di occupazione spettrale, ma la più semplice da realizzare tramite il meccanismo On – Off (On and Off Keying - OOK) della portante.

Un approccio per incrementare l'efficienza spettrale è l'impiego della tecnica banda laterale unica, SSB-ASK. Questa è particolarmente importante in Europa dove le restrizioni in termini di larghezza di banda possono precludere l'uso della DSB-ASK.

L'efficienza in termini di rapporto segnale/rumore delle tecniche DSB-ASK e SSB-ASK dipende dal cosiddetto indice di modulazione come definito in §IV.2. Con un indice di modulazione pari al 100% (OOK), è possibile verificare che il più basso valore di rapporto segnale rumore necessario per ottenere un dato bitrate si ricava utilizzando le modulazioni DSB-ASK e SSB-ASK. I requisiti di rapporto segnale rumore dovrebbero anche essere minimizzati per massimizzare la distanza operativa del TAG.

Sfortunatamente, l'uso dell'indice di modulazione 100% (OOK), corrisponde anche al minimo di potenza elettrica trasportata sul downlink per rifornire il TAG dell'energia necessaria al suo funzionamento. Il tempo di Off della portante, infatti, dovrebbe essere minimizzato in modo da evitare che il TAG perda l'alimentazione.

Si ricorda infine che le modulazioni di tipo ASK presentano spesso vincoli sulla durata degli intervalli di transizione che sono legati alle caratteristiche del filtraggio operato per limitare in banda il segnale.

2.1.2 Tecnica PR-ASK

Una tecnica per la quale è possibile minimizzare i requisiti di rapporto segnale rumore in una banda stretta e contemporaneamente massimizzare la potenza trasmessa al TAG è la cosiddetta PR-ASK nella quale la fase del segnale trasmesso varia di 180° ogni volta che viene inviato un simbolo. Tale tecnica produce un segnale modulato identico a quello prodotto dalla cosiddetta BPSK (Binary Phase Shift Keying). Nel caso della PR-ASK, tuttavia, la rivelazione avviene sulla base dell'ampiezza del segnale ricevuto e non della fase. Come si vede nella colonna destra

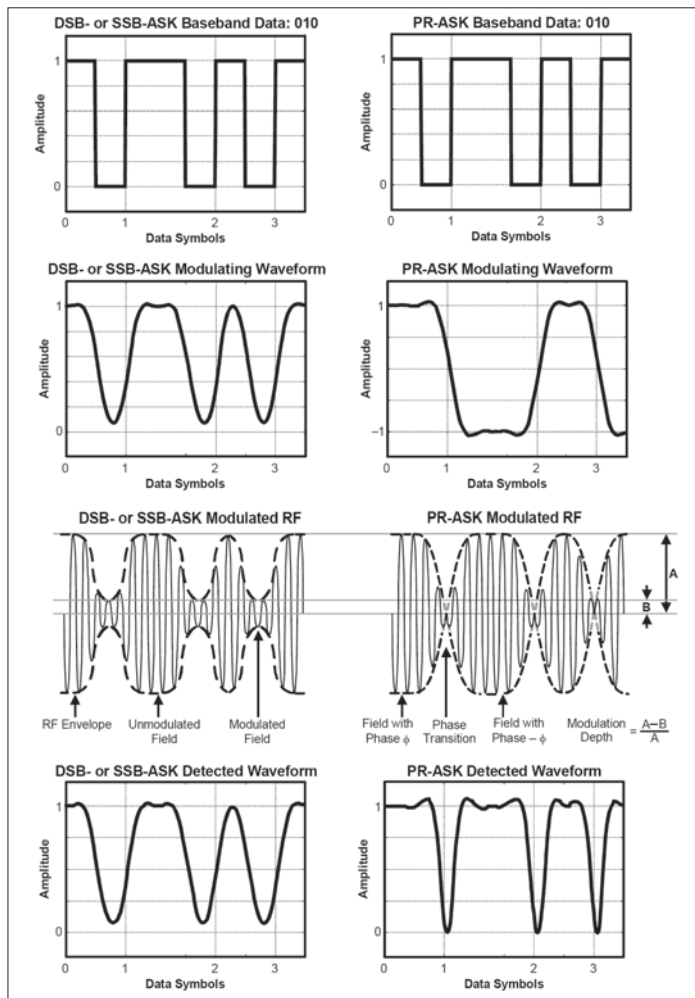


Figura IV.5
Confronto tra DSB-ASK (e SSB-ASK) e PR-ASK
[EPCglobal]

IV.2.2 MODULAZIONE READER =>TAG

La modulazione Reader =>TAG deve assicurare che il TAG riceva energia sufficiente, che possa facilmente effettuare la rivelazione e che il segnale del Reader rispetti le regolamentazioni sulla potenza massima e sull'ampiezza di banda.

dalla Figura IV.5, il segnale demodulato in ampiezza a partire dal segnale PR-ASK, ha caratteristiche simili a quello demodulato da un corrispondente segnale ASK.

Si ricorda che questo è possibile perché la codifica in banda base avviene generalmente sulla base di tecniche di tipo P1E basate sulla durata dell'impulso oppure sulle transizioni (Miller, FM0) ma non sulla sua ampiezza.

Come la OOK, la tecnica PR-ASK è caratterizzata da un indice di modulazione pari al 100%, tuttavia a differenza della OOK possiede la fondamentale proprietà di minimizzare il tempo in cui la portante non è trasmessa. Infatti, come le tecniche PSK, la portante viene trasmessa con ampiezza costante (solo la fase è variata) massimizzando in tal modo il trasferimento di energia. Inoltre dal segnale modulato così ottenuto è facilmente estraibile una temporizzazione dato che il segnale passa per lo zero ad ogni simbolo trasmesso.

La modulazione PR-ASK presenta caratteristiche di rapporto segnale rumore e spettro in frequenza molto più simili a quelle delle modulazioni PSK che a quelle della DSB-ASK, constatazione che ne consiglia l'uso in applicazioni con banda stretta e con raggio di copertura più esteso.

Se lo schema di codifica e modulazione non consente al segnale di trasportare abbastanza energia, il TAG passivo non è in grado di funzionare.

Inoltre il ricevitore del TAG deve essere semplice e deve essere in grado di sincronizzare il segnale. Per ottenere ciò lo schema di codifica (del Reader) deve consentire (al TAG) il recupero della sincronizzazione, questo può avvenire dal bordo d'uscita dei simboli di un codice PIE oppure dalle transizioni di un codice di Manchester (cfr.§IV.1).

Infine la probabilità di errore nei dati deve essere bassa, pena il fallimento della comunicazione.

Per quanto riguarda il problema della normativa sulle emissioni a radiofrequenza si devono considerare anche le forme d'onda ed il filtraggio, oltre all'ottimizzazione dello schema di codifica.

Inoltre tutti i suddetti requisiti devono essere soddisfatti in sistemi a basso costo.

Sistemi LF

Il Reader utilizza prevalentemente la modulazione FSK, per esempio con variazioni tra i due valori di 125 e 134kHz per rappresentare i dati binari trasmessi al TAG.

Sistemi HF e UHF

Il Reader usa prevalentemente la modulazione ASK sia in modalità DSB sia SSB oppure la PR-ASK, tutte caratterizzate dalla semplicità di rivelazione.

Per esempio, lo standard ISO/IEC 18000 Type C (altrimenti noto come EPC Gen2, Class 1), relativo a sistemi in banda UHF, prevede modulazioni di tipo Double Side Band-Amplitude Shift Keying (DSB-ASK), Single Side Band-ASK (SSB-ASK) e Phase Reversal-ASK (PR-ASK).

IV.2.3 RICEZIONE NEL TAG

A bordo della maggior parte dei TAG passivi sono realizzati ricevitori molto semplici con l'utilizzo di una potenza di alimentazione estremamente bassa.

Ad esempio, la semplicità ed economicità di un ricevitore ASK è garantita dalla possibilità di realizzare rivelatori non coerenti (cioè senza rivelazio-

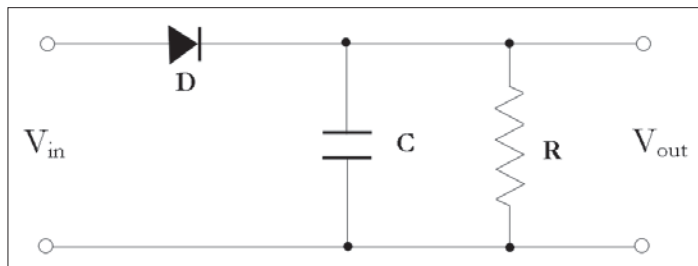


Figura IV.6
Rivelatore ad inviluppo

ne della fase del segnale) che estraggono l'inviluppo dell'ampiezza del segnale modulato. Un tipico circuito di questo tipo, spesso realizzato nei TAG, è il ben noto "rivelatore ad inviluppo" rappresentato nella Figura IV.6.

Dopo la demodulazione, i TAG passivi sono in grado di decodificare segnali codificati

Manchester (Bi-Phase-L) e Pulse Interval Encoding (PIE) maggiormente utilizzati nelle comunicazioni dai Reader verso i TAG.

Tali tecniche tuttavia presentano un duplice svantaggio: l'occupazione di banda risulta piuttosto elevata mentre l'efficienza spettrale (bit/Hz) risulta relativamente basso.

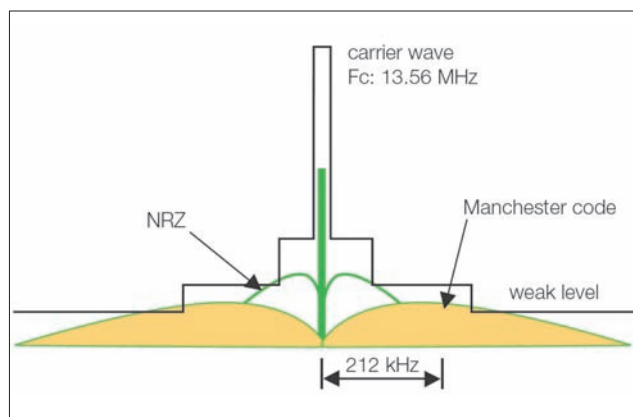
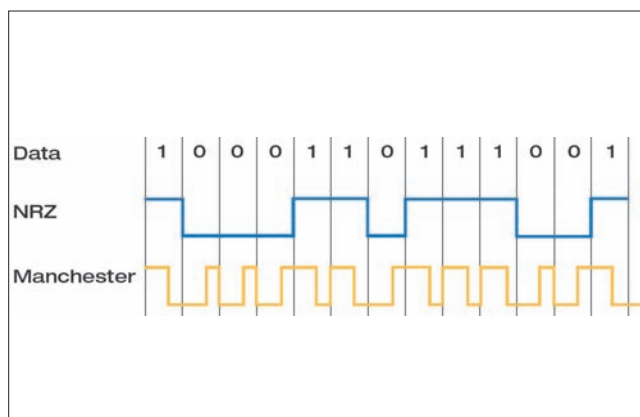
Queste due caratteristiche tendono generalmente ad essere antagoniste.

Ad esempio gli enti regolatori richiedono che lo spettro emesso sia ben confinato nell'ambito della banda assegnata. Usando la modulazione d'ampiezza (ASK) l'estensione dello spettro del segnale emesso limita fortemente il bitrate, a meno dell'impiego di codifiche più complesse.

L'estensione dello spettro del segnale, infatti, dipende dal metodo di codifica. Nella figura è riportato un confronto tra gli spettri ottenuti dalle codifiche Manchester ed NRZ, anche se quest'ultima viene scarsamente utilizzata.

Le applicazioni, dal canto loro, richiedono velocità di lettura dei TAG

Figura IV.7
Confronto tra spettri di segnali con codifiche Manchester ed NRZ [21].



elevate che implicano un maggior bitrate e conseguentemente una banda maggiore.

Ad esempio in un portale di lettura all'ingresso di un magazzino, si dovrebbe leggere una pallet contenente 200 TAG, in un secondo.

Per fare ciò, considerando che il singolo TAG interrogato, trasmette circa 100 bit, 200 TAG/s generano un flusso di dati minimo di 20kbps.

Sebbene vi siano numerose metodologie in uso per gestire in maniera efficiente le comunicazioni tra i Reader ed i TAG, le modulazioni di ampiezza nella banda UHF consentono di ottenere un bitrate nell'intervallo 16-80 kbps, un numero di bit letti per ogni TAG dell'ordine di 100-200 bit e un numero di letture di 50-800 TAG per secondo. Molti prodotti prevedono due o più possibili velocità dei dati.

È improbabile trovare prodotti al di fuori di tale intervallo operativo dato che non sarebbero utilizzabili da nessuna applicazione.

IV.2.4 MODULAZIONE TAG =>READER

Ricordando che il TAG non è equipaggiato con un trasmettitore ma si limita a modulare il carico (nell'accoppiamento induttivo) o il backscatter, va rilevato che entrambe queste tecniche permettono la variazione in ampiezza o in fase della portante re-irradiata, in dipendenza della loro implementazione.

Come conseguenza del livello estremamente basso del segnale modulato dal TAG relativamente a quello emesso dal Reader, si verificano difficoltà nella ricezione del segnale da parte di quest'ultimo. I due segnali infatti, quello del Reader e quello del TAG, avrebbero la stessa frequenza.

Per consentire al Reader di rilevare più agevolmente il segnale del TAG viene spesso usata, nel processo di modulazione del TAG, una sottoportante che sposta lo spettro del segnale modulato dal TAG lontano dalla frequenza della portante (generata dal Reader). Questa sottoportante è rilevabile con maggior facilità dal Reader medesimo attraverso opportuno filtraggio.

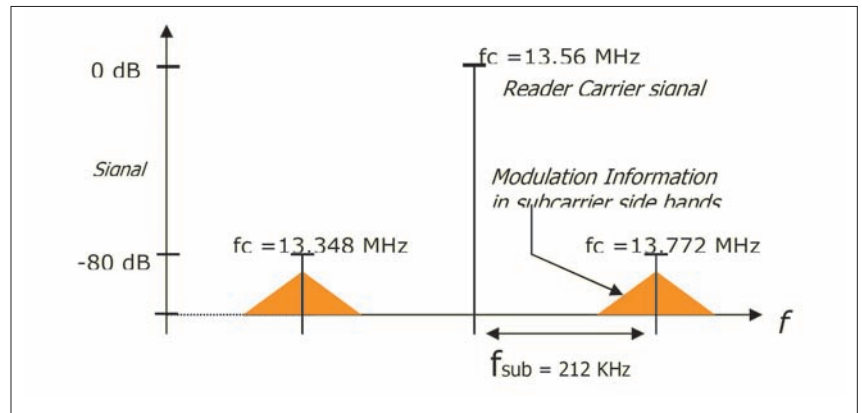
Ricordando che le tecniche di codifica dei dati adottate dal TAG determinano anche lo spettro di frequenza del segnale di risposta, per creare una sottoportante, la modulazione (tramite variazione del carico o back-

scattering) viene operata ad una frequenza più elevata del data rate nominale derivante dalla codifica di linea.

In pratica, l'accorgimento utilizzato è quello di incrementare di un fattore M (ad esempio $M=2, 4, 8$) il numero di transizioni nell'ambito dell'intervallo di tempo dedicato alla trasmissione del simbolo codificato [EPCGlobal Gen2, Class 1]. In tal modo si introduce nel segnale di risposta una componente frequenziale (sottoportante) progressivamente più distante dalla portante al crescere del fattore M , intorno alla quale si concentra lo spettro del segnale modulante.

L'informazione viene quindi modulata nella banda laterale di una sottoportante a frequenza più alta di quella della portante d'interrogazione del Reader.

Figura IV.8
Spettri dei segnali di un sistema HF a 13,56 MHz e sottoportante distante 212 kHz [4]



La Figura IV.8 illustra un tipica situazione spesso utilizzata nei sistemi HF che operano a 13,56 MHz ed usano una sottoportante distante 212 kHz. Questo accorgimento sposta le bande laterali associate alla modulazione operata dal TAG di 212 kHz sopra e sotto la frequenza portante di 13,56 MHz consentendo così una più agevole ricezione da parte del Reader.

Poiché però la maggior parte dei segnali di backscatter sono a livello relativamente basso ciò obbliga il Reader ad emettere un tono molto pulito in modo da non interferire con le risposte del TAG. Inoltre, per generare la sottoportante, il TAG deve essere dotato di un oscillatore locale o

comunque di una temporizzazione più veloce di quella ricavabile dal segnale ricevuto.

Per quanto riguarda invece la banda occupata dal segnale di risposta dal TAG verso il Reader è da notare che il backscatter non si mantiene confinato nell'ampiezza di banda del segnale emesso dal Reader. Le emissioni del TAG tuttavia non costituiscono un parametro critico, in quanto il livello del segnale è così basso da essere considerato (non incorrere) nelle prescrizioni normative per la larghezza di banda ai fini delle interferenze dei segnali radio.

2.4.1 Risposte dei TAG (in banda e fuori banda)

Come descritto in precedenza, la risposta dei TAG passivi all'interrogazione del Reader si basa su opportuna "modulazione" della riflessione (backscatter) del segnale ricevuto. La potenza disponibile per essere ritrasmessa al Reader risulta quindi estremamente ridotta e conseguentemente il livello del segnale di risposta è più simile al rumore di fondo che a quello del segnale emesso dal Reader.

Da tale punto di vista i differenti metodi di modulazione utilizzati possono essere classificati a seconda che i segnali di risposta siano o meno nella stessa banda del segnale ricevuto:

- tecniche in banda; in cui la variazione del carico o il backscatter interessano direttamente la frequenza portante emessa dal Reader.
- tecniche fuori banda; in cui la variazione del carico o il backscatter interessano una sottoportante, generata dal TAG, che si discosta dalla portante emessa dal Reader.

Una problematica delle tecniche in banda è che il Reader ed il TAG non possono trasmettere dati contemporaneamente. Durante la trasmissione del TAG, infatti, il Reader deve inviare una frequenza non modulata al solo scopo di alimentare il TAG medesimo (HDX) oppure il TAG deve sfruttare energia accumulata (SEQ) (cfr.§IV.2.4.2). Inoltre vi è un periodo di tempo necessario affinché il sistema transiti dallo stato in cui trasmette il Reader e quello in cui trasmette il TAG e viceversa.

Da ultimo, per confinare la risposta dei TAG nella banda di lavoro, la velocità dei dati trasmessi dal TAG deve essere mantenuta approssimati-

vamente uguale alla velocità del Reader e quindi relativamente bassa. Questa caratteristica è realizzata tipicamente con una codifica digitale in banda base che risulta essere meno robusta al rumore rispetto a tecniche alternative.

Ricordando che le emissioni dei TAG possiedono livelli di potenza estremamente bassi, l'uso delle tecniche fuori banda determina indubbi vantaggi nella progettazione di un sistema RFID; Reader e TAG, infatti, possono trasmettere dati contemporaneamente (FDX). In tal modo si realizza un sistema full duplex eliminando anche i periodi di tempo necessari al sistema per invertire il senso della trasmissione. E' inoltre possibile utilizzare nel Reader trasmettitori meno precisi e quindi meno costosi in quanto il rumore "in banda" influisce poco sulla ricezione del segnale di backscatter. Infine, migliorando il rapporto segnale/rumore, un Reader può ricevere segnali di backscatter da TAG disposti a distanze più elevate rispetto a quelle ottenibili da sistemi con risposta in banda.

In conclusione si può affermare che le metodologie di risposta di backscatter in banda pongono ostacoli alla progettazione dei Reader che invece vengono minimizzati nelle tecniche fuori banda.

In quest'ultime, però, considerando l'influenza, sugli effetti di interferenza, del livello estremamente basso dei segnali generati dai TAG passivi, va valutato l'effetto di eventuali segnali spuri nella banda di ricezione del Reader e di interferenze che si possono generare da altri sistemi operanti sulle frequenze coinvolte.

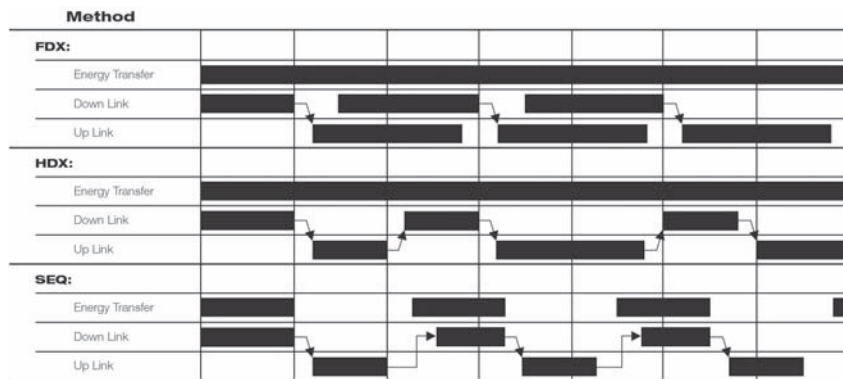
L'energia di backscatter, infatti, è tipicamente 40-60dB inferiore a quella dell'uscita del Reader e la pala di un ventilatore rotante ad alta velocità produce lo stesso livello di backscatter.

A conferma di ciò, l'ente di regolamentazione nord americano FCC, definisce un radiatore passivo come "radiatore non intenzionale", avendo constatato la scarsa significatività delle sue emissioni e non richiede test di emissione per i TAG RFID passivi in quanto non significativi.

2.4.2 Sistemi FDX, HDX e SEQ

Da un punto di vista procedurale, la comunicazione e il trasferimento di energia tra Reader e TAG avvengono secondo uno dei seguenti schemi:

Figura IV.9
 Procedure di comunicazione nei sistemi RFID
 [21]



full duplex (FDX), half duplex (HDX) and sequential (SEQ).

- Nel sistema FDX il trasferimento dati dal Reader al TAG (down link) avviene contemporaneamente al trasferimento dati dal TAG al Reader (uplink), mentre il trasferimento di energia dal TAG al Reader è continuo, indipendentemente dal verso di trasferimento dei dati.
- Nel sistema HDX il trasferimento dati dal Reader al TAG (down link) si alterna al trasferimento dati dal TAG al Reader (uplink), mentre il trasferimento di energia dal TAG al Reader è anche in tal caso continuo (attraverso una portante non modulata), indipendentemente dal verso di trasferimento dei dati.
- Nel sistema SEQ il trasferimento di energia dal Reader al TAG avviene invece (contemporaneamente al trasferimento dati dal Reader al TAG) in periodi temporali determinati, mentre il trasferimento dati dal TAG al Reader avviene negli intervalli intercorrenti tra i precedenti, sfruttando energia accumulata dal TAG.

I tre schemi procedurali sono illustrati in Figura IV.9.

Risulta evidente che la scelta di uno degli schemi di comunicazione descritti è vincolata in maniera determinante dalle tecnologie RF utilizzate. In particolare l'utilizzo di tecniche di comunicazione fuori banda rende possibile la realizzazione di sistemi FDX, che invece è preclusa dall'uso di tecniche in banda.

IV.3 COMUNICAZIONE READER <=> TAG

Quando si opera in ambienti con molteplicità di TAG o Reader che operano nello stesso tempo, sorgono i classici problemi di conflitti tra apparati nelle comunicazioni wireless.

I casi più significativi riguardano l'impiego dei TAG RFID nella gestione delle merci. In queste applicazioni vengono impiegate grandi quantità di TAG passivi a basso costo ed una molteplicità di Reader, spesso concentrati nei medesimi ambienti (magazzini, supermercati, ecc.). Le quantità di TAG tenderanno ad aumentare fino all' "esplosione" se l'associazione di "etichette intelligenti" ai singoli articoli in commercio diverrà una realtà diffusa.

Il problema presenta due aspetti speculari:

- Tutti i TAG (in mancanza di apposite procedure) risponderebbero contemporaneamente ad una interrogazione di Reader ricevuta correttamente.
- I TAG dovrebbero rispondere a tutti i Reader che li interrogassero contemporaneamente.

Naturalmente in queste condizioni la comunicazione non può avvenire con successo, pertanto vanno presi provvedimenti affinché nessuno di questi due casi si verifichi.

- La possibilità di risposte multiple e contemporanee da parte di più TAG che ricevano la stessa interrogazione corrisponde alla circostanza di diversi TAG presenti nel raggio di azione di uno stesso Reader. In questo caso essi replicherebbero alle interrogazioni tutti nello stesso momento. Questo provocherebbe inevitabilmente collisioni e perdite di dati. È quindi necessario implementare nei TAG algoritmi anti collisione, in modo che le loro risposte possano essere ordinate temporalmente e riconosciute individualmente.

Il numero di TAG che può essere identificato (nell'unità di tempo) all'interno della distanza operativa di un Reader dipende dal bitrate dei TAG (che dipende anche dalla frequenza operativa) e dal protocollo anticollisione, tipicamente si va da 50 TAG/s per frequenze HF a 200 TAG/s per frequenze UHF.

Una volta che il singolo TAG è stato identificato, il Reader può indirizzarlo singolarmente e compiere operazioni su di esso senza interferire

con i TAG vicini. Tra le operazioni più comuni (se il tipo di TAG lo permette) vi è la scrittura di parti della memoria, oppure la predisposizione del protocollo anti-collisione affinché tenga in standby il TAG per un po' di tempo, onde non interferire con altri TAG non ancora identificati.

- La possibilità di interrogazioni multiple contemporanee da parte di più Reader, in cui il TAG presenta una capacità limitata di rispondere ad ogni specifica interrogazione. Conseguentemente devono essere attuate tecniche di sincronizzazione tra Reader affinché non si verifichino interrogazioni contemporanee in un ambiente in cui sono presenti più Reader.

Problemi legati alla disponibilità di banda ed alle potenze impiegate hanno condotto Europa e Stati Uniti a definire due approcci completamente differenti alla sincronizzazione tra Reader. Tali approcci vanno sotto il nome di “Listen Before Talk - LBT” in Europa e “Frequency Hopping” negli USA.

IV.3.1 TECNICHE DI SINCRONIZZAZIONE TRA TAG

3.1.1 *Etichette intelligenti ed esplosione dei dati*

Un esempio può aiutare a comprendere il problema del volume di dati generato dalla tecnologia RFID quando, nella gestione delle merci, si arrivasse all'associazione di “etichette intelligenti” non solo ai contenitori per il trasporto ed agli imballaggi, ma ai singoli articoli in commercio.

Si consideri un carico di confezioni di oggetti (zollette di zucchero in figura) che venga spostato dal produttore al centro di distribuzione ai dettaglianti.

Si assuma che:

- Ogni confezione di oggetti sia marcata con etichette RFID.
- Un cartone per la spedizione contenga 80 di queste confezioni.
- In media, 64 cartoni vengano aggregati in una pallet.
- Un lotto di spedizione contenga in media 30 pallet.
- Un magazzino contenga 30 lotti di spedizione.

Un'interrogazione radio, sull'intero lotto di spedizione, provocherebbe la risposta di tutti i TAG, con la conseguente necessità di riconoscere più

Figura IV.10
Paradosso dell'esplosione dei dati



di 150.000 oggetti distinti. Questo tipo di interrogazione è oggi ai limiti delle possibilità, considerate le potenze permesse (in interrogazione) e la sensibilità dei TAG. Se però, con il progresso tecnologico, si arrivasse ad una interrogazione che provochi la risposta di tutto ciò che è contenuto nel magazzino dell'esempio (o, peggio, in un supermercato) si arriverebbe a 4,5 milioni di risposte contemporanee da gestire. Le tecniche studiate per le comunicazioni wireless (di tutti i tipi) non sono mai giunte ad affrontare questo tipo di problemi.

IV.3.2 PROTOCOLLI ANTI COLLISIONE - TECNICHE

Esistono due classi fondamentali di protocolli anti-collisione, derivati direttamente dalle tecnologie delle wireless LAN, la classe dei protocolli deterministici e quella dei protocolli probabilistici.

Nell'ambito dei protocolli che gestiscono le "collisioni" tra trasmissioni simultanee da una molteplicità di TAG, il cosiddetto "Binary Decision Tree" appartiene alla classe dei protocolli deterministici mentre i cosiddetti "ALOHA" e "slotted ALOHA" appartengono alla classe dei protocolli probabilistici.

relativa a quella particolare porzione dell'albero di decisione. Ad esempio se la chiamata con prima cifra "0" dà collisione si passerà a due chiamate con cifre "00" e "01", se anche la chiamata con cifre "01" dà collisione si passerà a due chiamate con cifre "010" e "011" e via discorrendo fino alla risoluzione di tutti i conflitti. Dalla figura appare evidente l'esplosione delle dimensioni dell'albero e quindi del numero delle chiamate all'aumentare del numero dei TAG, conseguentemente i protocolli di questo tipo presentano delle prestazioni limitate per quanto riguarda la velocità di ricerca degli identificatori dei TAG nell'intero albero.

Il protocollo di tipo probabilistico ALOHA (sviluppato dall'Università delle Hawaii) prevede che il TAG trasmetta il proprio messaggio e se il messaggio non va a buon fine il TAG effettua un nuovo tentativo di trasmissione, autonomamente (dopo avere atteso un certo periodo di tempo) o a seguito di una nuova interrogazione da parte del Reader. I tentativi di trasmissione proseguono fino a che la trasmissione del messaggio va a buon fine.

Il protocollo "slotted ALOHA" prevede invece una sorta di discretizzazione degli istanti in cui i TAG possono iniziare a trasmettere un pacchetto di dati. Questo comporta che se non vi è collisione nell'istante iniziale, il pacchetto sicuramente non subirà collisione durante la sua trasmissione. Il protocollo "slotted ALOHA" possiede un'efficienza in termini di sfruttamento della banda disponibile di circa il 30% rispetto a circa il 18% dell'ALOHA. I protocolli ALOHA sono relativamente veloci nell'identificazione di un particolare TAG nell'ambito di un insieme numeroso. Inoltre una maggiore efficienza può essere raggiunta con l'impiego aggiuntivo di tecniche di tipo Listen Before Talk (LBT). Queste prevedono che il Reader verifichi che il canale di trasmissione sia libero prima di effettuare un'interrogazione, evitando così di interrompere una trasmissione in corso.

3.2.1 Protocolli anti collisione - Standard

Gli standard quali ISO/IEC 18000-6 si sono evoluti prendendo in considerazione protocolli anticollisione differenti. Inizialmente ISO/IEC 18000-6 Type A prevedeva il protocollo ALOHA. Successivamente

ISO/IEC 18000-6 Type B utilizzava il protocollo “Binary Decision Tree”. Più recentemente ISO/IEC 18000-6 Type C (Gen2) prevede l’uso del protocollo “slotted ALOHA” raggiungendo così un throughput maggiore.

Quest’ultimo unifica una serie di precedenti specifiche UHF e fornisce la flessibilità che consente di aumentare le prestazioni pur mantenendo quel rigore nella specifica che ne garantisce un suo impiego su scala mondiale. Fornisce quattro differenti velocità di comunicazione consentendo a ciascuna implementazione di ottenere il massimo throughput dal canale a disposizione soddisfacendo allo stesso tempo le limitazioni regolamentari di ciascuna nazione. Il cosiddetto protocollo ‘Q’ contenente il meccanismo “slotted ALOHA” è stato ulteriormente ottimizzato nei riguardi della possibilità di leggere TAG che risultano accessibili marginalmente nell’area di copertura del Reader. Gli scambi protocollari sono stati ridotti nella loro durata temporale per garantire che i TAG ricevano sufficiente energia da portare a termine la comunicazione. Un particolare parametro ‘Q’ è utilizzato per controllare la probabilità che un TAG risponda al Reader. I TAG conformi a tale standard sono inoltre in grado di porsi in uno stato di temporanea inattività (standby) appena dopo essere stati letti. In tal modo le collisioni vengono minimizzate e si velocizza la lettura degli altri TAG.

3.2.2 Tecniche avanzate di identificazione in ambiente di Reader multipli

Un parametro essenziale per le prestazioni di un sistema RFID ad alta densità di TAG è velocità di identificazione (singulation rate) ovvero la rapidità con la quale un Reader identifica ciascuno dei TAG che ricade nel proprio raggio d’azione.

Se la velocità di identificazione è sufficientemente alta, si dovrebbe pervenire ad una prestazione molto richiesta, consistente nella lettura “in movimento” delle etichette. Ad esempio prodotti contenuti in una pallet in transito su carrello o di bagagli su un nastro trasportatore.

In mancanza di protocolli complessi (TAG di prima generazione), la velocità di identificazione dipende essenzialmente da due fattori: l’efficienza del protocollo anticollisione ed il bitrate prodotto dal TAG.

Il processo di identificazione nei TAG passivi più moderni (Gen2 nelle

bande UHF, cfr.§VI.1.7) avviene anche attraverso delle risorse procedurali avanzate. Ovvero combinando il protocollo anticollisione (Slotted ALOHA) con una tecnica di “selezione” che divida in due parti la popolazione dei TAG sulla base di determinate caratteristiche (comando “selection”), limitando di conseguenza il numero di TAG che possono collidere. Ad esempio si selezionano solo i TAG delle confezioni escludendo quelli dei singoli oggetti contenuti; oppure si divide in due parti (sulla base dell’identificativo) una popolazione troppo numerosa di oggetti che potrebbero rispondere. Effettuata la selezione (che non implica risposte dai TAG) si può passare alle interrogazioni che consentono di classificare (inventariare) i TAG selezionati (che a questo punto devono rispondere utilizzando il protocollo anticollisione).

Altri metodi efficaci consistono nel:

- “mettere a dormire” (put to sleep) per qualche tempo i TAG che hanno risposto, evitando che interferiscano con la comunicazione verso gli altri. Questo modo di operare, però, crea problemi in quando più Reader che operano nella stessa area, non possono sapere se un TAG è stato “silenziato” da un altro Reader.
- Generare delle risposte tronche (truncated reply) da parte dei TAG che risultino più veloci, trasmettendo solo una parte dell’identificativo o dell’EPC. Questa tecnica trova impiego in ambienti particolari ove tutti i TAG appartengano alla stessa partita e posseggano identificativi o EPC con parti comuni.

Sfruttando queste possibilità i costruttori possono realizzare varie strategie di identificazione.

Inoltre per ridurre i problemi di convivenza di più Reader con la medesima popolazione di TAG, le specifiche Gen2 (cfr.§VI.1.7) adottano un protocollo in cui è prevista la convivenza di differenti “sessioni” di identificazione (fino ad un massimo di 4). I TAG devono poter gestire ciascuna sessione in modo indipendente, rispondendo in modo appropriato. Naturalmente, essendo il TAG unico, richieste e risposte relative a differenti sessioni non dovranno collidere temporalmente. Dal lato dei Reader un sistema di gestione che li controlli, assegnerà dinamicamente ciascun Reader ad una sessione.

IV.3.3 TECNICHE DI INTERROGAZIONE DEL READER: LISTEN BEFORE TALK VS. FREQUENCY HOPPING



Figura IV.14
Reader portatile legge/scrive
etichette intelligenti
IP3pro4. - Intermec

Lo standard ISO/IEC 18000-6 Type C riguarda anche la differenza tra i livelli di potenza di uplink e di downlink in ambienti in cui sono presenti molteplici Reader. Infatti Reader disposti in vicinanza possono interferire tra loro.

Il livello di potenza in downlink generato dall'amplificatore di potenza di un Reader può raggiungere un valore massimo di +37 dBm negli USA, consentendo ai TAG passivi di ricevere un livello di potenza (trasportata dal segnale RF) utilizzabile maggiore di -15 dBm a circa 4 m di distanza. Il livello di potenza in uplink ricevuto dal Reader (trasmissione in backscattering dal TAG) può raggiungere un livello di -63 dBm, estremamente basso rispetto al livello generato in downlink. Inoltre in ambienti con presenza di molteplici Reader, altri lettori possono interferire con il segnale di backscattering ricevuto.

3.3.1 Listen Before Talk & Adaptive Frequency Agility

In Giappone e in Europa la disponibilità di frequenze in banda UHF è scarsa, conseguentemente lo standard ISO/IEC 18000-6 Type C ha previsto di ridurre la congestione tramite la sincronizzazione delle interrogazioni dei Reader in prossimità tramite l'uso di tecniche che consentono di evitare l'impiego di canali già occupati, queste vanno sotto il nome di "Listen Before Talk" – LBT.

Nella tecnica LBT il Reader deve ascoltare prima di trasmettere verificando che altri apparati non stiano già occupando il canale prescelto. Se il canale è occupato il Reader deve attendere oppure tentare l'occupazione di un altro canale scelto tra un insieme di canali disponibili nel caso in cui sia adottata la cosiddetta opzione di "Adaptive Frequency Agility" – AFA.

La normativa europea definisce occupato un canale su cui sia presente un segnale di:

- -96 dBm se la potenza dell'interrogazione sia di 2 W
- -90 dBm se la potenza dell'interrogazione sia di 500 mW
- -83 dBm se la potenza dell'interrogazione sia di 100 mW

Nell'ambito dell'impiego delle tecniche LBT/AFA, un uso più efficien-

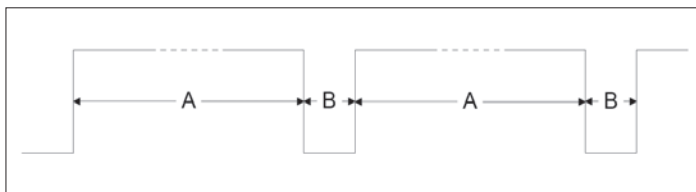


Figura IV.15
Intervalli di trasmissione

te e mediamente equidistribuito tra i contendenti dei canali disponibili viene raggiunto imponendo un limite sul tempo massimo A in cui il Reader può occupare uno stesso canale e sul tempo minimo B che deve attendere prima di

rioccupare lo stesso canale (se disponibile).

Per aumentare la capacità del Reader di operare in ambienti con congestione, rumori o interferenze, si può anche prevedere l'uso di uno di quattro differenti rate di codifica per sotto-portante (FM0, Miller M=2, M=4 & M=8) per variare la larghezza di banda del canale.

3.3.2 Frequency Hopping

L'FCC statunitense ha previsto un approccio basato sul salto di frequenza ("Frequency Hopping") che consente di ottenere un elevato grado di efficienza. I trasmettitori in contesa non possono occupare una frequenza per più di un periodo di tempo molto ridotto (meno di mezzo secondo). Tuttavia, al termine di tale periodo di tempo, non devono necessariamente spegnersi (come nel caso del "Duty Cycle") ma sono obbligati a saltare su una frequenza differente con scelta casuale. L'effetto complessivo è che tale metodo risulta molto efficiente sia nel caso in cui sia presente un solo Reader, sia in quello in cui siano presenti più Reader.

Nel primo di questi due casi è consentito all'unico Reader presente di avere un tasso di utilizzazione della banda del 100% fino al completamento della sua emissione (che però avviene saltando su frequenze diverse). Nel secondo caso in cui sono presenti più trasmettitori, poiché le frequenze sono occupate in maniera casuale l'accesso diventa una questione di media probabilistica che si traduce in un'uniforme ripartizione tra tutti i trasmettitori dell'uso delle frequenze e della probabilità di trasmettere su una frequenza già occupata. In situazione di affollamento un Reader costretto a saltare di frequenza troverà, con probabilità elevata, la nuova frequenza occupata e sarà costretto a riprovare fino a che non troverà una frequenza disponibile.

Per assicurare buone prestazioni, l'FCC ha definito, per RFID in UHF media, una banda di 26 MHz divisa in 63 canali. Tuttavia studi condotti

anche su pochi canali (4-6), sembrano mettere in evidenza che il modello fornisca prestazioni migliori del modello LBT.

La modalità Frequency Hopping non porta a grandi complicazioni sia sul lato TAG che su quello Reader.

- Il TAG, infatti, opera come un riflettore passivo (backscatter) intrinsecamente a larga banda, non risente pertanto dei salti della frequenza di interrogazione.
- La sezione ricevente del Reader, per parte sua, recepisce automaticamente ogni cambio di frequenza del segnale emesso, in quanto la conversione di frequenza nel ricevitore condivide lo stesso oscillatore locale del trasmettitore (cfr. Figura II.61).

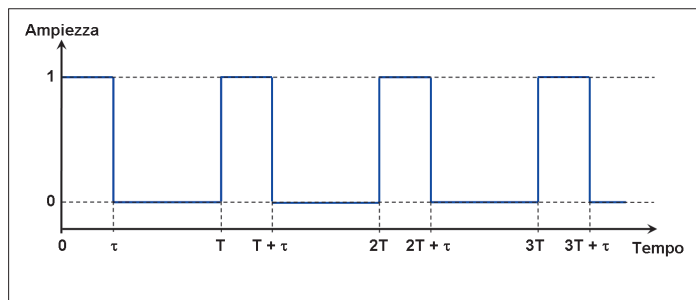
3.3.3 Occupazione del canale radio: la tecnica del “Duty Cycle”

Le due tecniche di LBT e Frequency Hopping prevedono entrambe delle regole per limitare l’occupazione del singolo canale radio. Queste procedure, che limitano il ciclo di lavoro di un trasmettitore su un singolo canale vanno sotto il nome di “Duty Cycle”.

Nella teoria della codifica dei segnali numerici, il cosiddetto “Duty Cycle” è definito come il rapporto tra la durata τ di un impulso ed il periodo T del segnale costituito da un treno di impulsi.

Nell’ambito della comunicazione tra TAG e Reader, però, con il termine di “Duty Cycle” si fa essenzialmente riferimento ad una tecnica di controllo d’accesso ad un mezzo trasmissivo condiviso che cerca di garantire a tutti i dispositivi contendenti una stessa elevata probabilità di successo. Nel caso particolare l’accesso riguarda l’impegno di una particolare frequenza operativa da parte dei Reader. La tecnica basata sul “Duty Cycle” prevede che un trasmettitore possa emettere ininterrottamente per non più di un breve periodo di tempo, al termine del quale dovrà spegnersi per consentire l’accesso alla frequenza da parte di altri trasmettitori in attesa. Per continuare la trasmissione dovrà attendere un certo periodo prima di tentare nuovamente di accedere alla frequenza. Ad esempio

Figura IV.16
“Duty Cycle”



se è consentito un “Duty Cycle” del 10% su un periodo di un secondo, al Reader è consentito di interrogare e leggere TAG per 0,1 s, dopo di che, dovrà restare in silenzio per i rimanenti 0,9 s su quella frequenza.

A scopo comparativo è utile comprendere l’impatto che ha l’impiego della modalità “Duty Cycle” in un sistema RFID.

I vincoli introdotti da tale approccio infatti, se da un lato semplificano la progettazione, dall’altro impongono limiti sull’efficienza operativa del sistema. Il modo “Duty Cycle” tradizionale introduce un periodo di “on” ed un periodo di “off”. In ogni circostanza il periodo di “off” determina la possibilità che alcuni eventi non siano ricevuti e quindi determinano l’inaffidabilità del sistema per certe applicazioni. Ad esempio, riconsiderando il “Duty Cycle” del 10% su un periodo di un secondo, di cui si è parlato, appaiono due problematiche:

- Un numero limitato di TAG è letto in 0,1 s. Tenendo conto delle basse velocità di lettura disponibili, è molto probabile che non si riesca a leggere un’intera popolazione di TAG in un periodo così breve. Se tale popolazione risulta in movimento, i TAG non letti possono, con probabilità elevata, essere persi in quanto andati fuori dall’area di copertura del Reader dopo i 0,9 s del periodo “off”.
- Anche con una popolazione di pochi TAG in transito veloce (ad esempio in applicazioni di raccolta pedaggi), l’approccio “Duty Cycle” lascia una elevata finestra temporale in cui si possono perdere letture di TAG. Questo inficia la robustezza di un’applicazione imponendo il rallentamento dei veicoli entro limiti prefissati per evitare l’uscita dei TAG dalla distanza operativa del Reader.

Inoltre, estremizzando tale situazione, molti sistemi RFID sono configurati per leggere uno stesso TAG più volte per incrementare l’affidabilità dei dati raccolti. Questo può portare ad estendere la finestra temporale nella quale un veicolo deve trovarsi a breve distanza dal Reader (3-6 metri) e questo può comportare una velocità di transito troppo bassa rispetto a quella usuale dei veicoli.

Un’altra situazione estrema è quando sistemi basati su “Duty Cycle” possiedono un periodo relativamente lungo come ad esempio un’ora. Questo consentirebbe, teoricamente, ad un trasmettitore di occupare una

frequenza per intervalli temporali di alcuni minuti. Il conseguente blocco degli altri dispositivi per un periodo così lungo pone seri problemi di affidabilità in sistemi real-time come generalmente sono i sistemi RFID. Ovviamente, soluzioni che prevedano periodi troppo lunghi non sono accettabili. In fase di progettazione ci si deve orientare verso soluzioni con periodi piuttosto corti anche se devono essere attentamente valutate tutte le conseguenze di questo tipo di scelte. In ogni caso, tuttavia, l'approccio "Duty Cycle" richiede che un trasmettitore sia inattivo per una certa percentuale di tempo anche in ambienti in cui è presente un numero ridotto di trasmettitori (al limite uno soltanto). Ciò comporta il mancato pieno sfruttamento della capacità della banda di frequenze e rappresenta un approccio non ottimale se non per ambienti particolari con un numero specifico di trasmettitori, situazione che costituisce una minima percentuale dei sistemi reali.

In conclusione, il vincolo imposto dalle soluzioni basate su "Duty Cycle" può essere il più semplice da specificare e da realizzare ma determina la limitata flessibilità e il limitato sfruttamento della banda disponibile. Invece, quest'ultima caratteristica deve essere massimizzata quando la disponibilità di banda (o di canali disponibili) risulta scarsa, come avviene nelle situazioni reali.

Quando ciò risulta possibile, quindi, le soluzioni basate su "Duty Cycle" sono da evitare in favore dell'impiego di tecniche più flessibili ed efficienti come quella definita dall'FCC e descritta in precedenza.