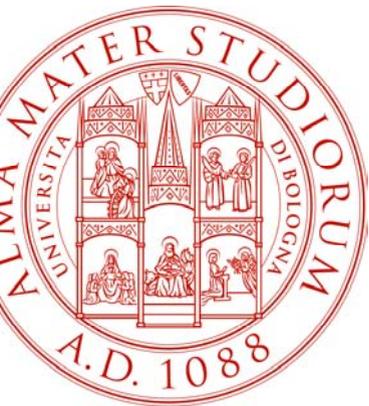


# Sistemi di Radio Comunicazione per *Automatic Data Collection*



Tecniche Elettromagnetiche  
per la Localizzazione ed il  
Controllo Ambientale

Franco Fuschini  
[franco.fuschini@unibo.it](mailto:franco.fuschini@unibo.it)

Marconi  
Wireless

# Introduzione (1/3)

- Radio Systems for Automatic Data Collection = sistemi di TLC che permettono di acquisire informazioni su di un oggetto per mezzo della radio-comunicazione fra un *Transponder* fisicamente associato all'oggetto e contenente le informazioni ad esso relative ed un *Interrogatore-Ricevitore* che deve acquisirle;
- Sistema di comunicazione costituiti essenzialmente da 4 macroblocchi:
  - a. L'Interrogatore-Ricevitore;
  - b. il *Transponder*;
  - c. l'interfaccia radio;
  - d. l'infrastruttura informatica che gestisce l'interazione
- ◇ Nota: radio-comunicazione -> contactless -> "lettura" potenzialmente possibile anche in assenza di visibilità diretta fra i dispositivi;
- ◇ "Sistemi cooperativi": l'acquisizione ed il trasferimento delle informazioni avviene grazie alla interazione dei dispositivi

# Introduzione (2/3)

- ◇ L' Interrogatore-Ricevitore incorpora solitamente un modulo per la rice-trasmissione a radiofrequenza, una unità di controllo ed un "elemento di accoppiamento" (*element coupling* o *coupling unit*) al *Transponder*;
- ◇ Il Transponder è quasi sempre costituito da un elemento di accoppiamento all'interrogatore e dai dispositivi di controllo, elaborazione e memoria necessari per interpretare i comandi ricevuti dal *Reader* e per la loro esecuzione;
- ◇ In molti casi, l'*element coupling* è costituito da una Antenna per la rice-trasmissione di onde EM

# Introduzione (3/3)

- ▶ Nella maggior parte delle applicazioni, il *Transponder* non ha alcuna facoltà/autonomia di operare alcuna trasmissione che deve essere in qualche modo autorizzata (il *Transponder* deve essere "abilitato" dall'interrogatore per mezzo di un opportuno segnale di "interrogazione");
- ▶ In sintesi, la funzione principale del *Tag* consiste nel **TRAS**mettere i propri dati per ris**PONDERE** all'interrogazione effettuata dal lettore.  
In generale al *Transponder* sono richieste le seguenti capacità funzionali:
  - a. ricezione/attivazione;
  - b. ricezione/demodulazione;
  - c. modulazione;
  - d. trasmissione;

# Classificazione generale

*transponder passivi* : sono sprovvisi di batteria o  $\forall$  altra sorgente di alimentazione diretta. Vengono quindi alimentati dall'Interrogatore che per mezzo del meccanismo di accoppiamento non solo attiva ed abilita il *Transponder* ma fornisce anche l'energia necessaria per effettuare la modulazione e la trasmissione;

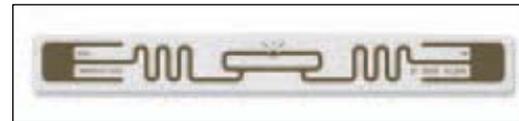
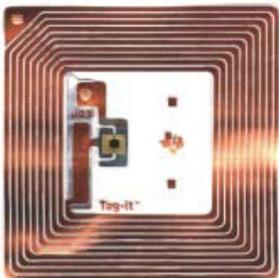
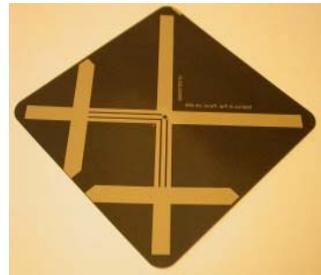
*transponder semi-passivi (semi-attivi)* : sono dotati di batteria che fornisce energia per l'alimentazione della memoria e per la modulazione effettuata dalla relativa logica di controllo. L'energia necessaria alla trasmissione del segnale continua ad essere fornita dall'Interrogatore per mezzo del meccanismo di accoppiamento;

*transponder attivi* : sono dotati di un vero e proprio trasmettitore/ricevitore a radiofrequenza e di una batteria che provvede sia ad alimentare la memoria sia a fornire l'energia necessaria alla modulazione ed alla trasmissione. I *Transponder* attivi sono quindi "autonomi" e potenzialmente in grado di effettuare trasmissioni indipendentemente dall'interrogazione da parte del lettore.

# Esempi

- ◇ *Radio Frequency IDentification* (RFID) - sistemi passivi nella maggior parte dei casi
- ◇ Sistemi di addebito automatico e di controllo degli accessi (*Telepass*) - sistema semi-passivo;
- ◇ Radar Secondario (SSR) - sistema attivo

# Radio Frequency Identification (RFID)



# RFID - Introduzione

- ◇ Nei sistemi RFID l'Interrogatore viene usualmente chiamato Lettore (*Reader*) mentre il *Transponder* viene spesso indicato come "*Tag*" o "*Smart Label*";
- ◇ Tecnologia da tempo impiegata a basse frequenze (banda HF - 13.56 MHz) in numerose applicazioni *short-range* (es. sistemi anti-furto in negozi ed esercizi commerciali);
- ◇ La recente standardizzazione di sistemi RFID operanti in banda UHF (~ 870 MHz) ha amplificato l'interesse verso la tecnologia RFID, poiché l'incremento della frequenza operativa permette (almeno in via teorica) maggiori distanze di lettura e velocità di trasferimento dati;
- ◇ Sistemi alternativi / complementari al *BarCode*, rispetto ai quali la "lettura" può avvenire anche in assenza di visibilità fra i dispositivi;

# Classificazione dei Sistemi RFID

Esistono diversi criteri di possibile classificazione:

a. Alimentazione del Transponder

- passivi;
- semi-passivi (o semi-attivi)
- attivi;

b. Principio di funzionamento

- *inductive coupling*;
- *EM backscatter modulation*;
- ...

c. Frequenza operativa

- *Low Frequency (LF)*;
- *High Frequency (HF)*;
- *Ultra High Frequency (UHF)*;
- *Microonde ( $\mu$ W)*;

d. Portata (*close coupling, remote coupling, long range*)

e. Memoria (*1 bit / n bits, read-only / riscrivibili, ...*)

f. ....

# Principio di funzionamento (1/2)

Data una sorgente che genera e sostiene un campo EM di frequenza  $f$ , si individuano le seguenti regioni dello spazio:

1. regione di campo "lontano":  $r \gg \lambda$  ;  $r \gg D$  ;  $r \gg 2D^2/\lambda$

2. regione di campo "vicino" (dei "campi reattivi"):  $r \leq \lambda$

Il campo EM si presenta e si propaga come un'onda EM usualmente sferica, non uniforme, TEM localmente piana (campo di radiazione)

Il campo EM ha le caratteristiche di un campo "statico"  $\rightarrow$  il campo vicino coincide con il campo statico "istante per istante", cioè generato dal valore istantaneo della sorgente

Il campo EM totale è sempre dato dalla somma di due contributi, uno di radiazione ed uno di tipo statico. Tuttavia, nella regione di campo lontano prevale il primo, mentre nella regione di campo vicino prevale il secondo

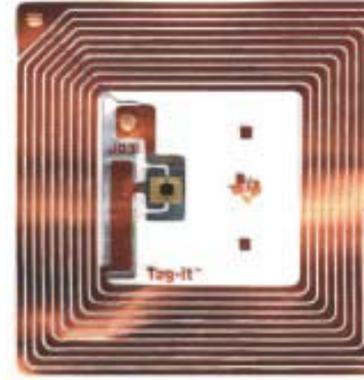
# Principio di funzionamento (2/2)

In base al principio di funzionamento, i sistemi RFID possono essere suddivisi in 2 categorie principali:

1. Sistemi ad accoppiamento induttivo: la comunicazione fra *Tag* e *Reader* avviene in regione di *campo vicino*, e quindi non sfrutta la propagazione di alcuna onda EM.

L'interazione fra i dispositivi avviene usualmente per accoppiamento induttivo dovuto al campo magnetico. *L'elemento di accoppiamento è costituito da una spira con un numero opportuno di avvolgimenti*

2. Sistemi a propagazione EM: la comunicazione fra *Tag* e *Reader* avviene in regione di campo lontano e dunque tramite la propagazione di onde EM. *L'elemento di accoppiamento è costituito da una antenna per la rice-trasmissione di onde EM*

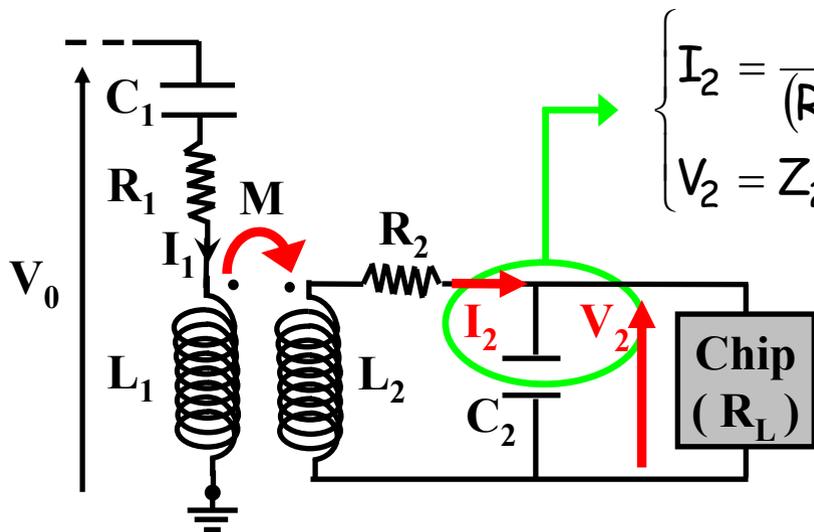


# Sistemi ad accoppiamento induttivo (1/2)

- ◇ il campo magnetico tempo-variante generato dal *Reader* induce<sup>(1)</sup> una tensione (e quindi una corrente) ai morsetti del *Tag* e così fornisce l'energia necessaria ad alimentare la memoria e la logica annessa (caso passivo);
- ◇ il *Tag* percorso da corrente genera a sua volta un campo magnetico che per induzione<sup>(1)</sup> va ad alterare la tensione ai morsetti del *Reader*, tale variazione viene rilevata dal *Reader* ed in tal modo avviene quindi l'interazione fra i dispositivi;
- ◇ il trasferimento delle informazioni avviene spesso per mezzo della cosiddetta *Load Modulation* : la logica interna al *Tag* produce una variazione del carico ai morsetti della spira fra due valori distinti  $Z_{L1}$  e  $Z_{L2}$  (in accordo alla sequenza da trasmettere) → tale variazione si ripercuote sulla corrente nella spira → sul campo  $H$  → sulla tensione indotta ai morsetti del *Reader*, che in tal modo riceve i bits memorizzati nel *Tag*

(1) Legge di Faraday

# Sistemi ad accoppiamento induttivo (2/2)

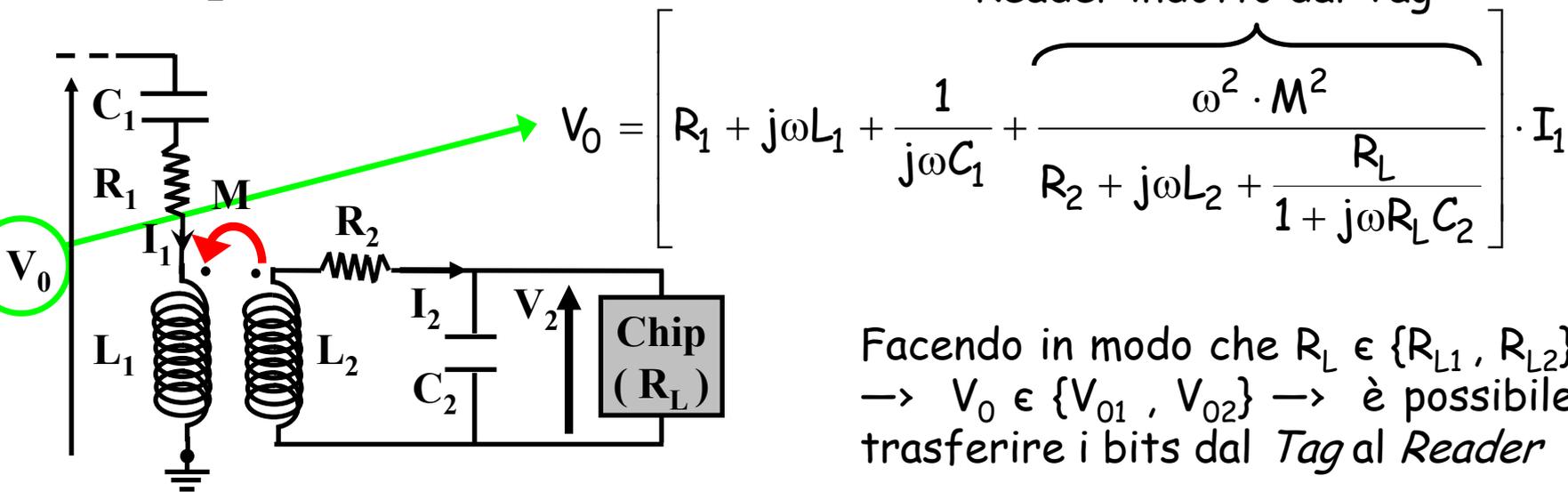


$$\begin{cases} I_2 = \frac{j\omega M \cdot I_1}{(R_2 + Z_2 + j\omega L_2)} & \text{con } Z_2 = R_L // C_2 \\ V_2 = Z_2 \cdot I_2 \end{cases}$$

$M$  : coefficiente di  
mutua induttanza

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

contributo alla tensione al  
Reader indotto dal Tag



Facendo in modo che  $R_L \in \{R_{L1}, R_{L2}\}$   
 $\rightarrow V_0 \in \{V_{01}, V_{02}\} \rightarrow$  è possibile  
trasferire i bits dal *Tag* al *Reader*

# Esempio: *Anti-Theft RFID Systems*

- ◇ La più nota (e più diffusa) applicazione della tecnologia RFID ad accoppiamento induttivo è probabilmente rappresentata dai sistemi antifurto delle merci negli esercizi commerciali;

- ◇ Il *Tag* memorizza un solo *bit* (ai valori 1 e 0 corrispondono gli stati "ON" e "OFF");



Electronic  
Article  
Surveillance

- ◇ Quando il *Reader* rileva nel suo *range* di azione la presenza di un "Tag ON" scatta l'allarme, poiché in caso di avvenuto pagamento il *Tag* viene settato ad OFF (oppure rimosso).
- ◇ Funzionamento usuale ad accoppiamento induttivo a 13.56 MHz

# Sistemi a propagazione EM

- ◇ il *Reader* irradia un segnale "di interrogazione" a radiofrequenza che viene ricevuto dal *Tag* ed utilizzato (in parte) per alimentare la memoria e la logica annessa (caso passivo);
- ▷ Parte dell'energia fornita dal segnale di interrogazione viene invece re-irradiata (*backscattered*) verso il *Reader* con modalità che dipendono dalle proprietà di radiazione dell'antenna del *Tag* <sup>(1)</sup>. Il *Reader* riceve il segnale trasmesso dal *Transponder* ed in tal modo si compie l'interazione fra i dispositivi (caso passivo e semi-passivo);
- ▷ Il trasferimento delle informazioni avviene usualmente per mezzo della cosiddetta *Load Modulation* (la variazione dell'impedenza di carico ai morsetti dell'antenna fra i valori  $Z_{L1}$  e  $Z_{L2}$  si ripercuote sul campo EM re-irradiato → sul segnale ai morsetti del *Reader*, che in tal modo riceve i bits memorizzati nel *Tag*

(1) Principio del Radar

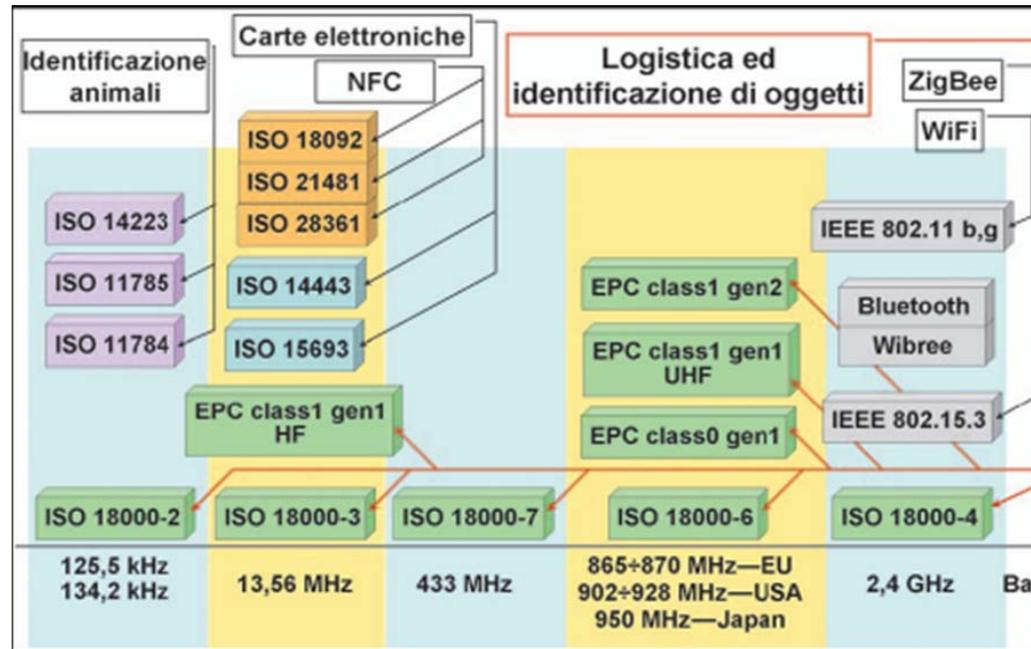
# Frequenza operativa

La frequenza operativa è per definizione la frequenza di trasmissione del lettore (che può non coincidere con quella utilizzata dal Tag per la trasmissione dei dati);

Il processo di standardizzazione internazionale avvenuto negli ultimi ha previsto il funzionamento nelle seguenti bande principali (Italia):

- a. Banda LF: 120 ÷ 145 kHz
- b. Banda HF: 13.56 MHz;
- c. Banda UHF: 865 ÷ 870 MHz;
- d.  $\mu$ onde (UHF "alta"): attorno ai 2.45 GHz
- e.  $\mu$ onde (5.4 ÷ 5.9 GHz)
- f.  $\mu$ onde: attorno ai 24.125 GHz

Ogni banda è regolata da uno o più Standard; nonostante la recente integrazione fra ISO 18000-6 ed EPC Global Gen2 (07/06), permangono talvolta differenze fra diversi Paesi ed aree geografiche, il che rappresenta un ostacolo alla massiccia diffusione della tecnologia.



# RFID in Banda LF

**Frequenze:** 125 kHz & 134.2 kHz

**Standard:** ISO 18000-2

**Accoppiamento:** induttivo (magnetico)

**Alimentazione:** tag passivi, con qualche eccezione

**Read Range:** tipicamente <0.5m, con tag attivi fino a 2m

**Letture / Scrittura:** sia R/O che R/W

**Trasferimento dati:** bassa velocità, fino a 1kbit/s

**Letture multiple:** disponibili sia per lettura multipla che singola

**Formati:** incapsulati in vetro e/o ceramica per tracciabilità animale. In package plastici per usi industriali.

**Costi:** dipendono dal formato e dal tipo di applicazione che devono sostenere.

**Applicazioni:** Identificazione animali, controllo accessi, identificazione veicoli, immobilizer per auto, container.

**Influenze ambientali:** comunicazione agevole attraverso liquidi e materiali acquosi.

Sensibilità ad orientamento antenne.

**Caratteristiche generali:** antenne di grandi dimensioni, costosi

**NOTE:** tecnologia matura e diffusa che tende ad essere soppiantata dai tag a frequenza maggiore.



# RFId in Banda HF

**Frequenze:** 13.56MHz

**Standard:** ISO18000-3, ISO15693 (*Vicinity*), ISO14443 (*Proximity*), EPC 13.56class1

**Accoppiamento:** induttivo (magnetico)

**Alimentazione:** nella stragrande maggioranza passivi

**Read Range:** tipicamente fino a un massimo di  $\approx 1.5m$  dipendente da potenza emessa dal lettore e dalla forma delle antenne, specialmente a quella del tag

**Lettura / scrittura:** sia *R/O* che *R/W*

**Trasferimento dati:** tipicamente intorno ai 25kbit/s

**Letture multiple:** meccanismi anti collisione per leggere circa 20/30 tag/s

**Formati:** formato più diffuso la cosiddetta etichetta intelligente, che vede antenna e chip integrate in un'etichetta stampabile

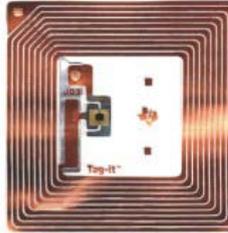
**Costi:** dipendenti dal supporto fisico del tag. 'Smart tag' : 40/60 €cent

**Applicazioni:** logistica (singoli oggetti), smart card, biglietti, smistamento bagagli

**Influenze ambientali:** praticamente insensibili alla presenza di liquidi e a materiali acquosi.

**Caratteristiche generali:** applicazioni a distanza non eccessiva e con limitato numero di tag

**NOTE:** attualmente i più disponibili e di più diffusi, nonché di uso universale



# RFId in Banda UHF

**Frequenze:** 865.6÷867.6; 868÷869 MHz in EU 902÷928MHz in USA, 950MHz in Japan

**Standard:** 18000-6 type C, EPC Class0/1 Gen1, EPC Class1 Gen2

**Accoppiamento:** elettromagnetico



**Alimentazione:** passivi & attivi

**Read Range:** qualche metro (2÷5) per lettura di tag passivi; dipende sensibilmente dalle *norme nazionali sulla potenza emessa e dalle condizioni elettromagnetiche del collegamento*

**Letture / scrittura:** generalmente R/W

**Trasferimento dati:** usualmente nell'intorno dei 28kbit/s, ma anche fino a 128kbit/s

**Letture multiple:** meccanismi anti-collisione per leggere 100tag/s. EPC Class1/Gen2 prevede la lettura di 600tag/s

**Formati:** vari, per le diverse esigenze ambientali compresa l'applicabilità a unità metalliche.

**Costi:** 'etichette intelligenti' 20/40 €cent (dipende dalle quantità richieste).

**Applicazioni:** logistica della filiera di fornitura (pallet), logistica (single item), controllo bagagli

**Influenze ambientali:** prestazioni ridotte in presenza di metalli, liquidi, materiali acquosi

**Caratteristiche generali:** adatti per distanze più elevate o gruppi numerosi di tag.

**NOTE:** differenti frequenze e potenze nelle differenti regioni



# Alta UHF ( $\mu$ Onde)

**Frequenze:** 2.4 2.483MHz in EU 2.4 2.5GHz in US

**Standard:** ISO 18000-4 mode 1/2

**Accoppiamento:** elettromagnetico

**Alimentazione:** passivi & attivi

**Read Range:** poco più di 1 m ( $\leq 2$ ) per tag passivi, fino a 30m se attivi

**Lettura / scrittura:** sia R/O che R/W

**Trasferimento dati:** qualche decina [30÷40] di kbit/sec

**Letture multiple:** 0.05s per leggere alcune decine di tag da 128 bit

**Formati:** vari, per diverse esigenze ambientali e applicabilità ad unità metalliche

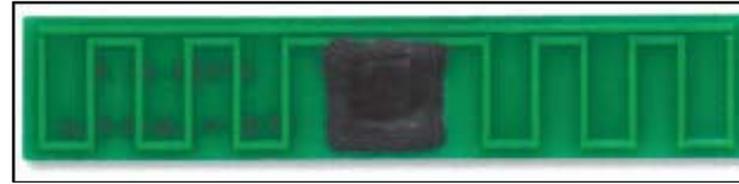
**Costi:** tipicamente maggiori delle altre tipologie

**Applicazioni:** *logistica e tool collection*

**Influenze ambientali:** più sensibili di UHF a metalli o liquidi

**Caratteristiche generali:** simili a UHF media, maggior rapidità in lettura

**NOTE:** banda di lavoro molto affollata (e.g. WiFi 802.11b/g, Bluetooth, ZigBee)



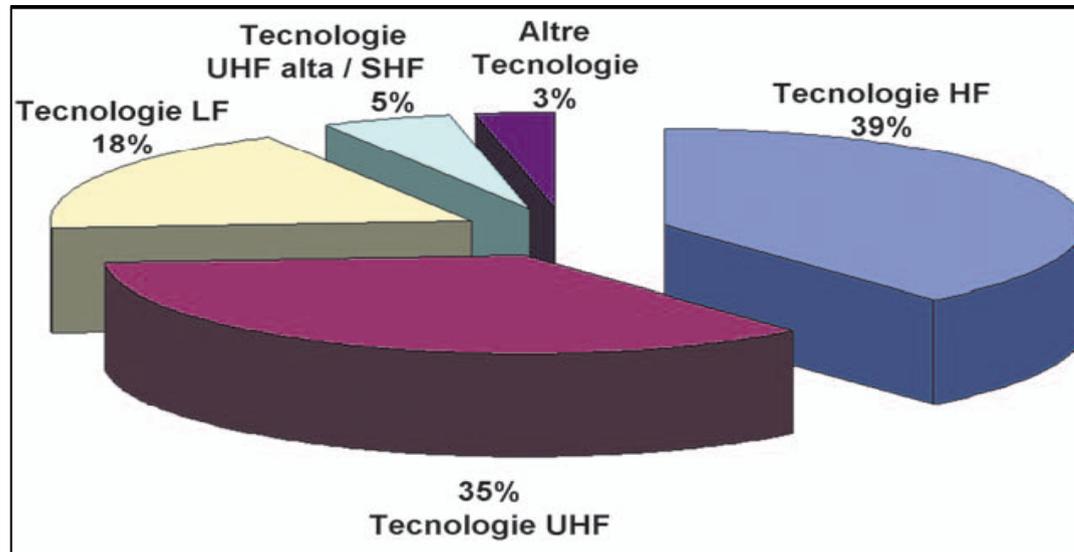
Tag passivo, 30x6 mm



# La banda UHF

Sensibile incremento delle applicazioni in banda UHF negli ultimi anni (logistica):

- costi paragonabili ai sistemi HF
- "promettono" maggiori *read range* e *data rate*



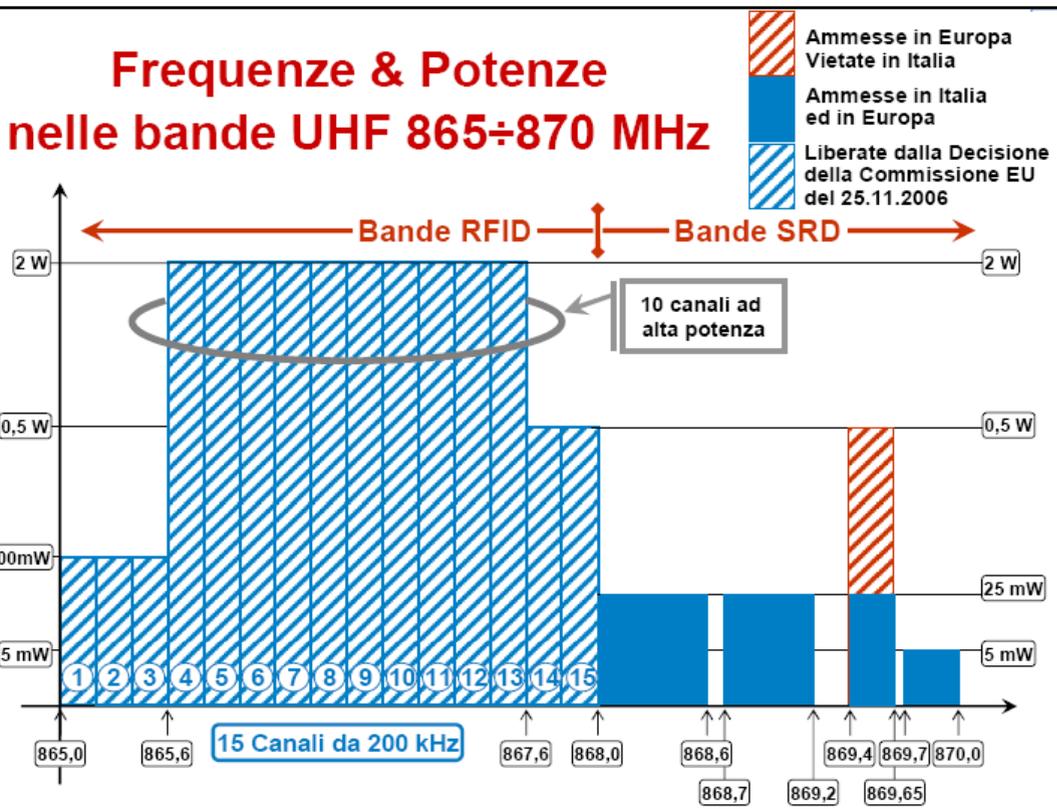
Tratto dall'analisi di quasi 2000 progetti RFID degli ultimi anni

- ◇ Per evitare sovrapposizione con la banda destinata alla telefonia mobile, l'assegnazione delle frequenze RFID-UHF è dettata da specifiche normative presenti in ciascun Paese/Area geografica (ad es. 870 MHz/UE, 915 MHz/USA, 950 MHz Japan)
- ◇ Nel seguito l'attenzione è limitata ai sistemi RFID in banda UHF

# Allocazione delle frequenze in banda UHF

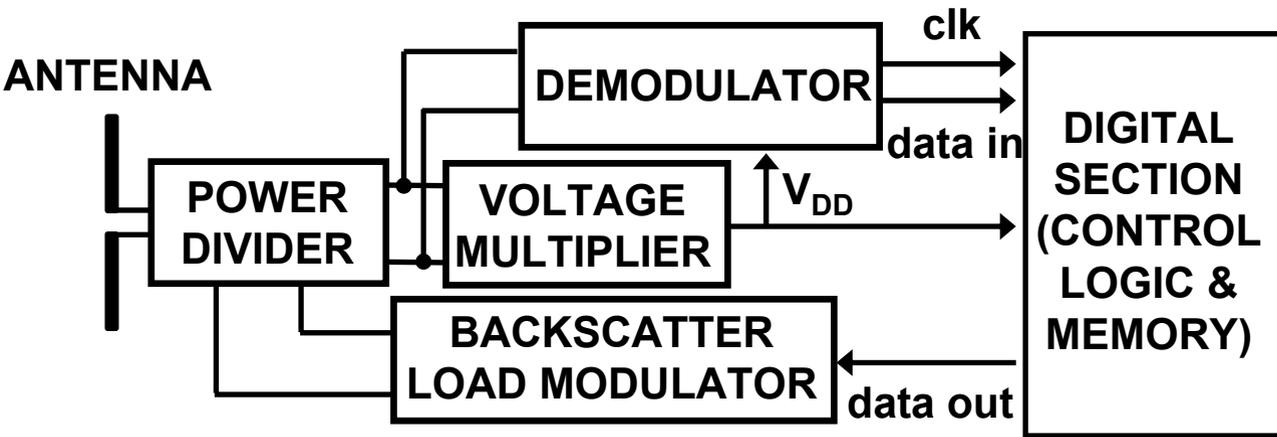
Nell'intento di armonizzare frequenze e potenze, la Commissione Europea, in data 23/11/2006, emana un documento secondo cui (Articolo 3):

"Gli Stati membri designano e rendono disponibili, entro sei mesi a decorrere dall'entrata in vigore della presente decisione, in modo non esclusivo, senza interferenze e senza protezione, le bande di frequenza destinate alle apparecchiature RFID, soggette alle condizioni specifiche, di cui all'allegato alla presente decisione."



	USA	EU
<b>Banda</b>	902 - 928 MHz	865 - 868 MHz
<b>Larghezza di banda</b>	26 MHz	3 MHz
<b>Canali</b>	64 (400 KHz)	15 (200 KHz)
<b>Potenza</b>	4W EIRP	2W ERP
<b>Accesso multiplo</b>	FHSS	LBT (Listen Before Talk)

# Transponder RFID



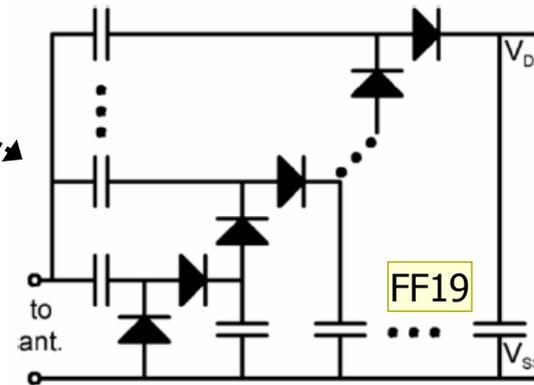
schema a blocchi  
(caso passivo)

l'antenna (dipolo ~ dipolo) riceve il segnale irradiato dal Reader:

il segnale ricevuto viene **demodolato** per interpretare il comando trasmesso dal lettore (*Tag programmabili*),

il segnale ricevuto viene in parte **rettificato** per ottenere la tensione  $V_{DD}$  necessaria ad alimentare ed attivare la logica digitale (memoria)

i dati vengono inviati al **modulatore**, che produce variazioni dell'impedenza di carico  $Z_L$  fra 2 valori  $Z_{L1}$  e  $Z_{L2}$ , con conseguente variazione del campo re-irradiato

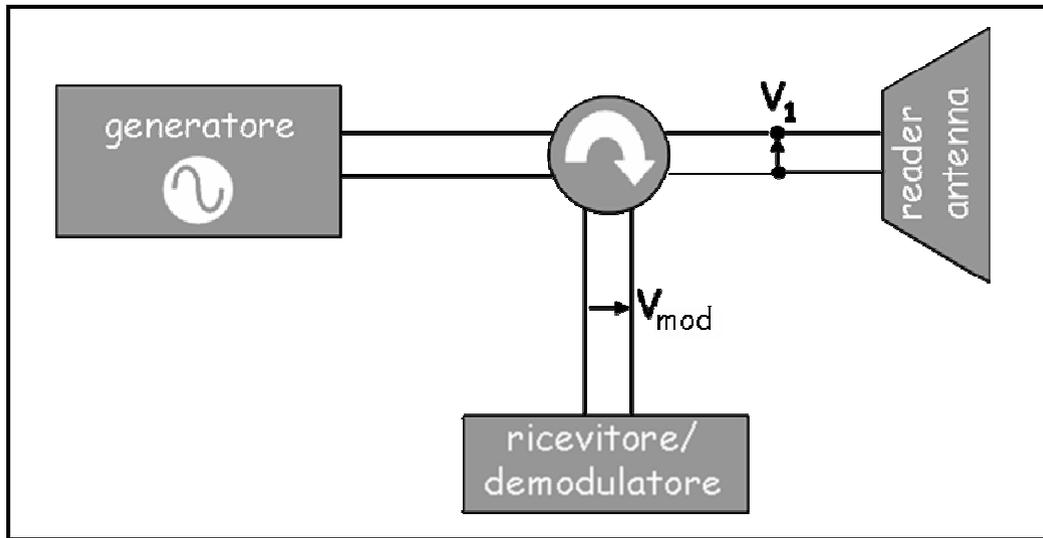


19

Le capacita' che costituiscono il raddrizzatore determinano una impedenza di carico fortemente capacitiva --> occorre imopedenza d'antenna fortemente induttiva e non pari agli usuali 50 ohm. Da qui conseguono le forme stravaganti delle antenne dei tag (oltre che per contenere dimensioni)

Franco Fuschini, 20/04/2008

# Reader RFID



schema a blocchi

- ◇ L'antenna del *Reader* irradia il "segnale di interrogazione" generato dal generatore/trasmittitore.

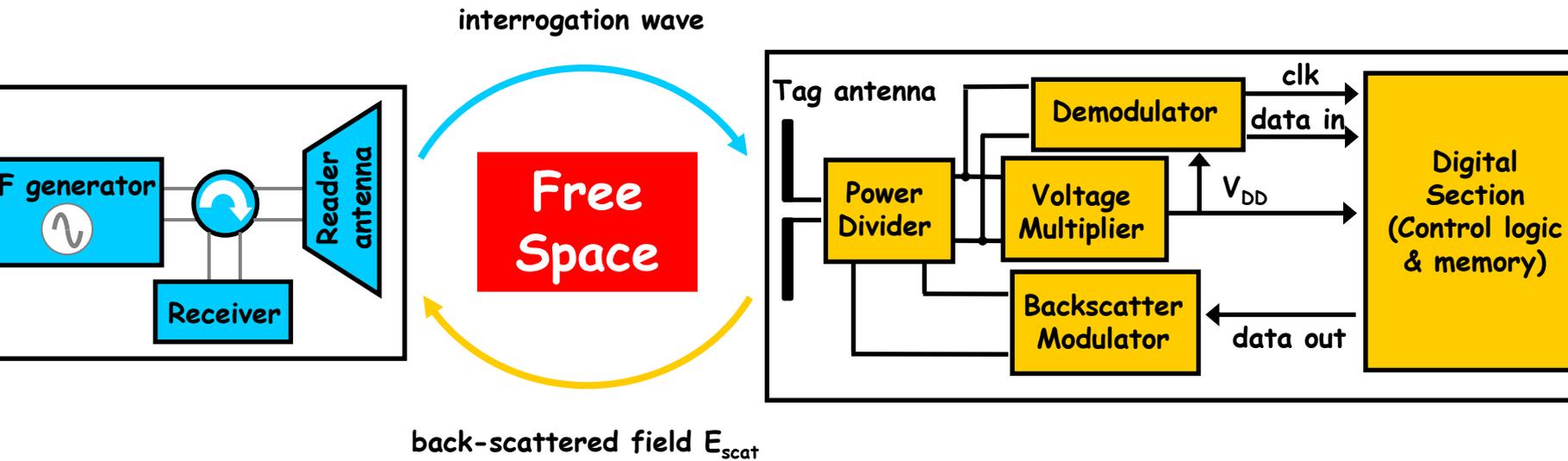
Sistemi più semplici: portante non modulata per il "*tele-powering*"

*Tag* programmabili/riscrivibili: contiene anche il comando che il *Reader* richiede di eseguire

- ◇ L'antenna del *Reader* riceve il segnale trasmesso dal *Tag* e per mezzo di un circolatore (o circuito analogo) lo invia al Ricevitore.

L'utilizzo del circolatore è necessario per evitare che il segnale ricevuto venga "coperto" dal segnale di interrogazione (decine di dB più intenso)

# Prestazioni in condizioni ideali



Condizioni operative ideali = Spazio Libero

( per ragioni di semplicità i sistemi RFID vengono usualmente progettati supponendo considerando condizioni operative ideali )

# Prestazioni al Tag in condizioni ideali (1/6)

**Attivazione del Tag** (caso passivo): il *Transponder* assorbe potenza  $P_{\text{TagIn}}$  dal segnale di interrogazione ricevuto dal *Reader*. La potenza assorbita dipende anche dall'adattamento fra antenna e carico:  $Z_L \in \{Z_{L1}, Z_{L2}\}$  (*Load Modulation*)  $\rightarrow P_{\text{TagIn}} \in \{P_{\text{TagIn}_1}, P_{\text{TagIn}_2}\}$

$$P_{\text{TagIn}_{1,2}} = \text{EIRP} \cdot g_{\text{tag}} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \tau_p \cdot \rho_{T1,2}$$

$$\rho_{T1,2} = \frac{4 \cdot R_A \cdot R_{L1,2}}{|Z_A + Z_{L1,2}|^2} \in [0,1]$$

Attivazione del Tag:  $P_{\text{TagIn}} \geq P_{\text{TagMin}} \in [-20 \div -10] \text{ dBm}$

- ◆ **Back-Scattering del Tag** (caso (semi-)passivo): il *Transponder* re-irradia parte dell'energia incidente (segnale di interrogazione); il campo e la potenza diffusi ( $E_{\text{scat}}$ ,  $P_{\text{TagBS}}$ ) dipendono anche dall'adattamento fra antenna e carico:  $Z_L \in \{Z_{L1}, Z_{L2}\}$  (*Load Modulation*)  $\rightarrow E_{\text{scat}} \in \{E_{\text{scat}_1}, E_{\text{scat}_2}\}$ ,  $P_{\text{TagBS}} \in \{P_{\text{TagBS}_1}, P_{\text{TagBS}_2}\}$

# Prestazioni al Tag in condizioni ideali (2/6)

- ◇  $\forall$  oggetto illuminato da un'onda EM re-irradia parte della potenza incidente in tutte le direzioni dello spazio, con intensità diversa nelle singole direzioni in relazione alle caratteristiche dell'oggetto (forma, dimensioni, proprietà dei materiali, ecc.)
- ◇ La *sezione radar* (o *radar cross section - RCS*) differenziale è una grandezza che misura l'intensità di potenza diffusa nella direzione  $(\theta_s, \phi_s)$

$$\sigma(\theta_s, \phi_s) = 4\pi \cdot \frac{I_r^{\text{scat}}(\theta_s, \phi_s)}{S_{\text{inc}}} = 4\pi r^2 \frac{|\mathbf{E}_{\text{scat}}^{\rho}(r_s, \theta_s, \phi_s)|^2}{|\mathbf{E}_{\text{inc}}^{\rho}|^2}$$

- ◇ La *sezione radar* totale rappresenta invece il rapporto fra la potenza totale diffusa e la densità di potenza incidente:

$$\sigma_T = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \sigma(\theta_s, \phi_s) d\Omega = \frac{P_{\text{scat\_tot}}}{S_{\text{inc}}}$$

# Prestazioni al Tag in condizioni ideali (3/6)

► **Teorema dello scattering da antenna:** *il campo re-irradiato in  $(r, \theta, \varphi)$  da una antenna illuminata da un campo  $E_{inc}$  e chiusa su di una impedenza  $Z_L$  può sempre essere espresso come il campo che l'antenna irradierebbe in  $(r, \theta, \varphi)$  a parità di campo incidente qualora fosse chiusa su di una impedenza di riferimento  $Z_{REF} \pm$  un termine correttivo che dipende dalla condizione di riferimento considerata:*

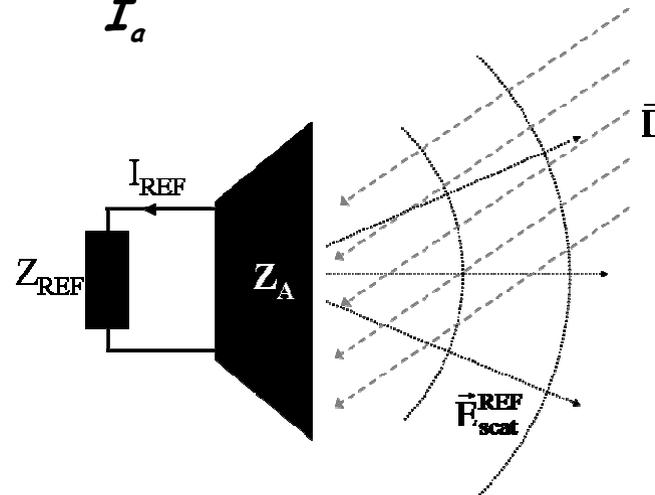
$$\vec{E}_{scat}^p(r, \theta, \varphi | Z_L) = \vec{E}_{scat}^p(r, \theta, \varphi | Z_{REF}) + K_{REF} \cdot I_{REF} \cdot \frac{\vec{E}_a^p(r, \theta, \varphi)}{I_a}$$

$\vec{E}_{scat}^p$  Campo diffuso quando l'antenna è caricata da  $Z_{REF}$

$I_{REF}$  Corrente ai morsetti quando l'antenna è caricata con  $Z_{REF}$

$K_{REF}$  Coefficiente complesso dipendente da  $Z_{REF}$  e  $Z_L$

$\vec{E}_a^p$  Campo irradiato quando la corrente ai morsetti è  $I_a$  e NON c'è campo incidente



► Esempio:  $Z_{REF} = Z_A \rightarrow K_{REF} = (Z_A - Z_L) / (Z_A + Z_L)$

# Prestazioni al Tag in condizioni ideali (4/6)

- ◇ Il Teorema della Scattering da antenna permette di calcolare l'espressione del campo diffuso da un Tag RFID illuminato dal campo di interrogazione  $\mathbf{E}_{inc}^{(*)}$  (caso passivo / semi-passivo)

$$E_{scat\_1,2}^p(r, \theta, \phi) = j\lambda \cdot E_{inc} \cdot \sqrt{g(\theta_{inc}, \phi_{inc}) \cdot g(\theta, \phi)} \cdot \left( \underset{\sim}{A} - \underset{\sim}{I} \cdot \rho_{1,2} \right) \cdot \left[ \hat{p}(\theta_{inc}, \phi_{inc}) \cdot \hat{p}_{inc} \right] \cdot \frac{e^{-j\beta r}}{4\pi r} \frac{Z_A^2}{|Z_A|^2} \cdot \hat{p}(\theta, \phi)$$

$(\theta, \phi)_{inc}$  Direzione d'arrivo dei campi incidente (direzione del collegamento)

$\hat{p}(\theta, \phi)$  Vettore di polarizzazione dell'antenna del Tag

$\hat{p}_{inc}$  Vettore di polarizzazione del campo incidente

$\rho_{1,2} = \frac{Z_{L1,2} - Z_A^*}{Z_{L1,2} + Z_A}$  Coefficiente di riflessione ai terminali d'antenna del tag

$A$ : Matrice complessa indipendente dal carico correlata con la corrente indotta dall'onda incidente sulla superficie dell'antenna. (Dipendente dalla geometria)  
[ per antenne di piccole dimensioni *dipole-like*  $\cong$  matrice identità  $I$  ]

(\*) Fuschini, Piersanti, Paolazzi, Falciasecca, *Analytical approach to the back-scattering from UHF RFID Transponder*, *Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2008

# Prestazioni al Tag in condizioni ideali (5/6)

## ◇ RCS differenziale del Transponder

$$\sigma_{1,2}(\theta, \phi) = \frac{4 \cdot R_A^2}{|Z_A + Z_{L1,2}|^2} \cdot \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot g_+^2(\theta, \phi)_{inc} \right) \cdot \tau = \rho_{S1,2} \cdot \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot g_+^2(\theta, \phi)_{inc} \right) \cdot \tau$$

## ◇ RCS totale del Transponder :

$$\sigma_{T1,2} = \tau \cdot \delta \cdot \rho_{S1,2} \cdot \left( \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot g(\theta_{inc}, \phi_{inc}) \right) = \tau \cdot \delta \cdot \rho_{S1,2} \cdot a_{eff}(\theta_{inc}, \phi_{inc})$$

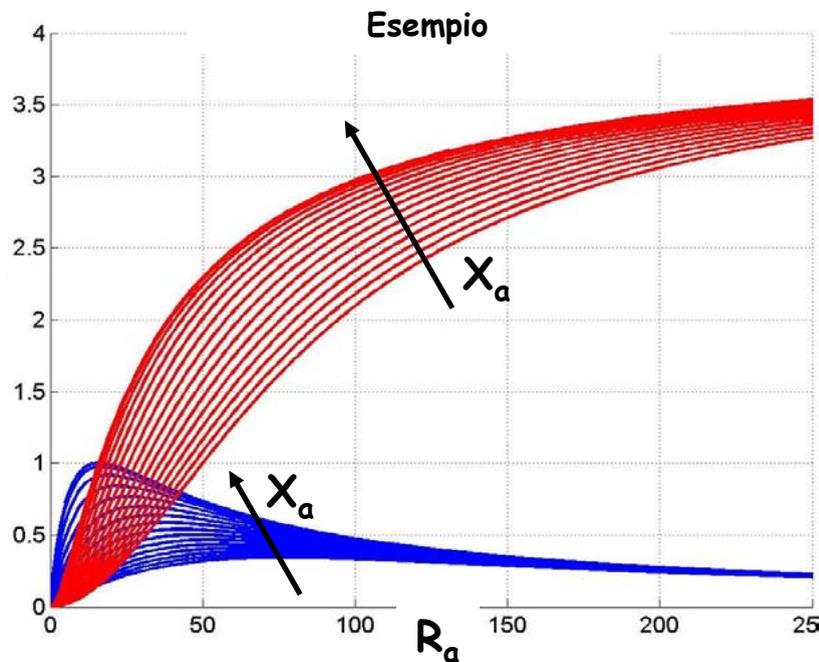
$$\rho_{S1,2} = \frac{4 \cdot (R_A)^2}{|Z_A + Z_{L1,2}|^2} \in [0, 4]$$

## ◇ Potenza re-irradiata dal Tag :

$$P_{tagBS\_1,2} = \sigma_{T1,2} \frac{|\mathbf{E}_{inc}^\rho|^2}{2\eta} = \rho_S \cdot \tau_p \cdot \delta \cdot a_{eff}(\theta, \phi)_{inc} \cdot \frac{|\mathbf{E}_{inc}^\rho|^2}{2\eta} = EIRP \cdot g_{tag} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot \tau_p \cdot \delta \cdot \rho_S$$

# Prestazioni al Tag in condizioni ideali (6/6)

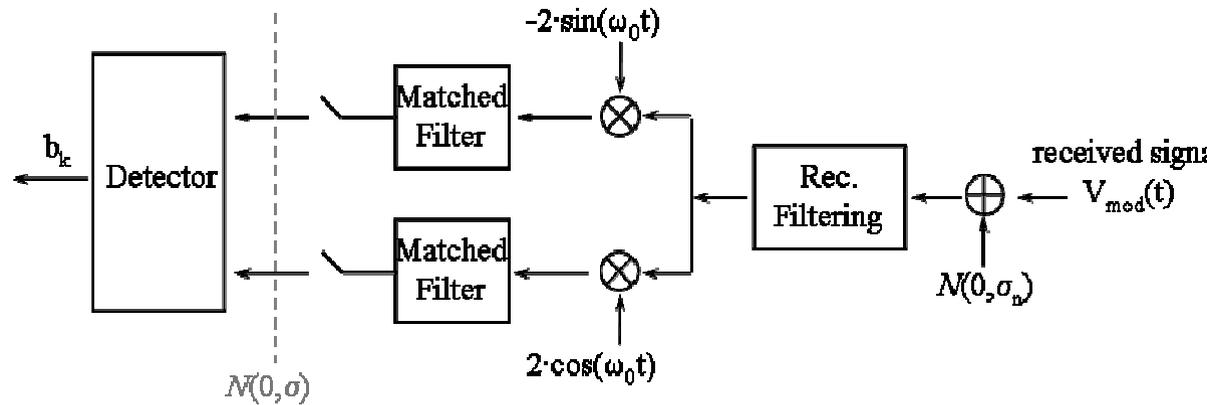
- ◇ Valori elevati di potenza assorbita ( $\rho_{T1,2}$ ) facilitano l'attivazione del Tag
- ◇ Valori elevati di potenza diffusa facilitano la corretta ricezione del Reader



- ◇ A valori elevati di  $\rho_S$  corrispondono valori modesti di  $\rho_T$
  - ◇ A valori elevati di  $\rho_T$  possono corrispondere valori assai bassi di  $\rho_S$
- ➔ necessario *trade-off*: occorre cioè "progettare il disadattamento" fra antenna e carico del dispositivo in modo che i valori  $\rho_S$  e  $\rho_T$  risultino adeguati.

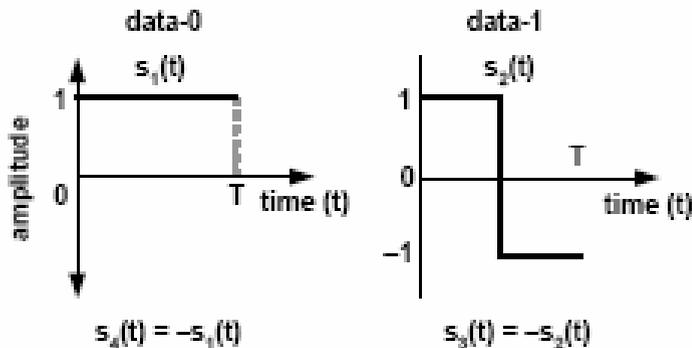
# Prestazioni al Reader in condizioni ideali (1/3)

- Ricevitore ideale a filtro adattato

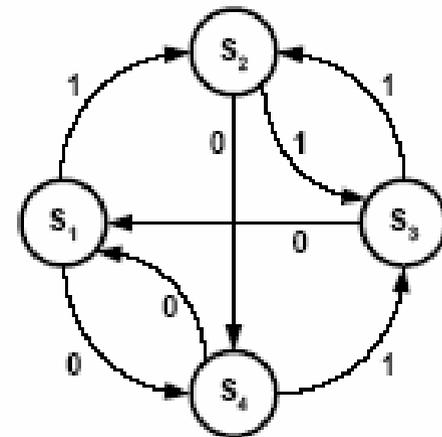


- Codifica Miller / FMO (ISO 18000-6)

## Miller Basis Functions



## Miller-Signaling State Diagram



## Modulazione ASK / PSK (ISO 18000-6)

Rumore AWGN con deviazione standard  $\sigma$  all'ingresso del decisore

# Prestazioni al Reader in condizioni ideali (2/3)

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{|V_0| \cdot m}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma} \right)$$

$$|V_0| = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{ReaderIn\_TPM}}}{\operatorname{Re}(Y_{RX})}}$$

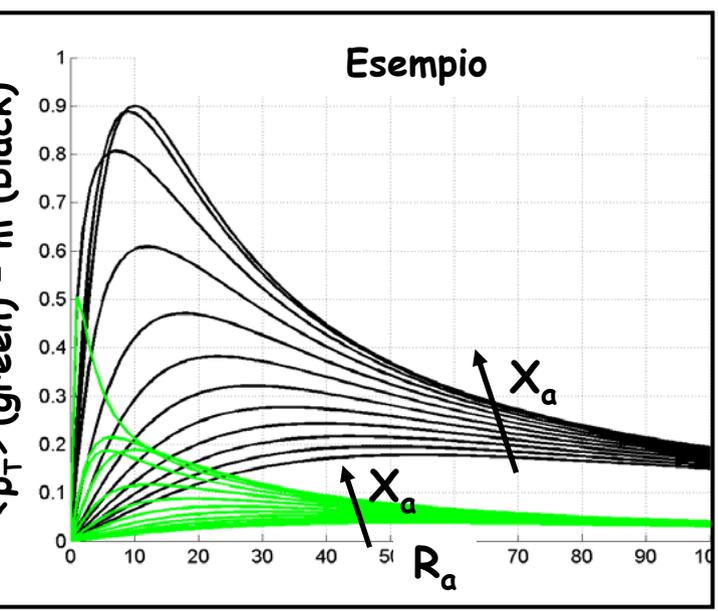
$P_{\text{ReaderIn\_TPM}}$ : potenza ricevuta nel caso di "Tag Perfectly Matched":

$$P_{\text{ReaderIn\_TPM}} = \text{EIRP} \cdot g_{\text{reader}} \cdot g_{\text{tag}}^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^4 \cdot \dots$$

$$m = \frac{|\rho_1 - \rho_2|}{2} \in [0 \div 1]$$

indice di modulazione

- ◇ Valori elevati di  $m$  (modulazione efficienti) corrispondono a bassi valori di  $\langle \rho_T \rangle$  (scarsa alimentazione della sezione digitale), e viceversa → necessario opportuno *trade-off*.



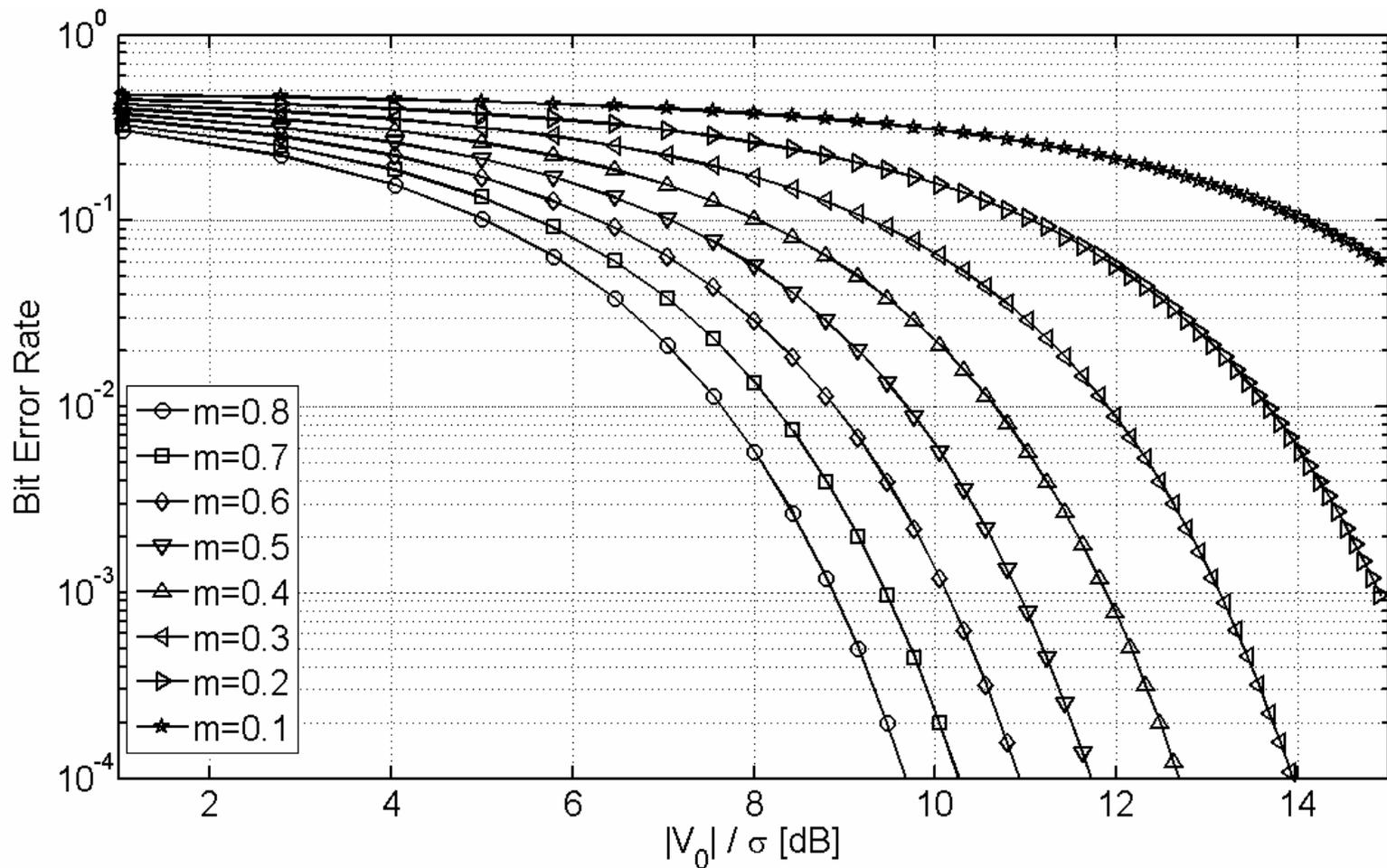
Lavorare con adeguati livelli di potenza rappresenta una condizione necessaria per il buon funzionamento del sistema;  
E' altresì necessario che ai 2 "stati di modulazione" (ai due valori ZL1 e ZL2) corrispondano segnali irradiati "il più possibile diversi"  
(modulazione efficiente), in modo da ridurre la probabilità che in ricezione risultino indistinguibili.

Il parametro che quantifica l'efficienza di modulazione è l'indice di modulazione

Se il Tag ed il Reader ricevono segnali di potenza adeguata ma il valore di  $m$  è troppo basso, i dispositivi si attivano ma può accadere che a causa del rumore/interferenza la demodulazione sia inefficace e che la BER sia troppo elevata → il sistema non funziona

Franco Fuschini, 07/05/2008

# Prestazioni al Reader in condizioni ideali (3/3)



# Read Range

Condizioni necessarie al funzionamento del sistema RFID:

1. attivazione del *Tag*:  $P_{TAG\_IN} \geq P_{TAG\_MIN}$
2. corretta demodulazione da parte del *Reader*:  $BER \leq BER_{th}$ 
  - o segnale ricevuto sufficientemente intenso ( $P_{ReaderIn} \geq P_{ReaderMIN}$ );
  - o adeguato indice di modulazione

$r = r_1$  tale che  $P_{TAG\_IN} = P_{TAG\_MIN}$  (*activation range*)

$$r_1 = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{EIRP \cdot g_t \cdot \tau \cdot \rho_T}{P_{TAG\_MIN}}}$$

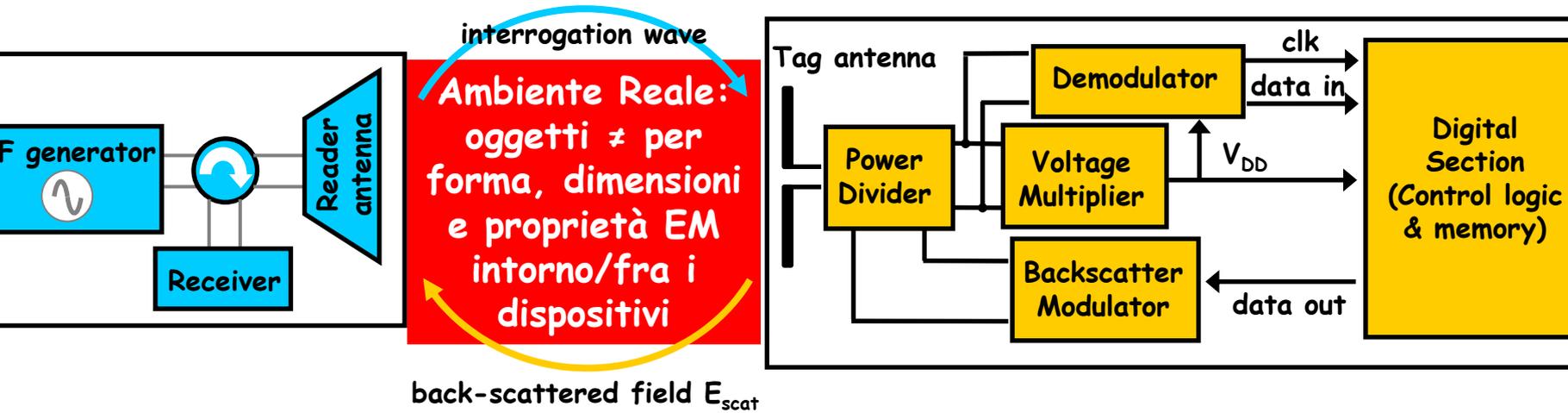
$r = r_2$  tale che  $BER = BER_{th}$  ( $10^{-3}$ ) (*demodulation range*)

$$BER_{th} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{m}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot EIRP \cdot g_{reader}}{\operatorname{Re}(Y_{RX})}} \cdot g_{tag} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi r_2} \right)^2 \cdot \tau_p \right)$$

distanza di lettura (*read range*):  $r_R = \min [r_1, r_2]$

NB: usualmente  
 $r_R = r_1 < r_2$

# Sistemi RFID in ambiente reale



l'inevitabile presenza di oggetti intorno/fra i dispositivi può determinare:

1. Cammini multipli (*multipath*)  $\Rightarrow$  distorsione ed affievolimento supplementare del segnale;
  2. Ostruzione del radiocollegamento  $\Rightarrow$  affievolimento supplementare del segnale;
  3. Fenomeni di accoppiamento EM con oggetti vicini<sup>(\*)</sup> e/o altri Tag  $\Rightarrow$  inattesa variazione dei parametri d'antenna del Tag (impedenza, efficienza, diagramma di radiazione)
- <sup>(\*)</sup> in particolare, l'oggetto identificato dal Tag

$$P_{\text{TagIn}} = ??$$

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left( \frac{|V_0| \cdot m}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma} \right)$$

$$|V_0| = ??$$

$$m = ??$$

$$r_R = ??$$

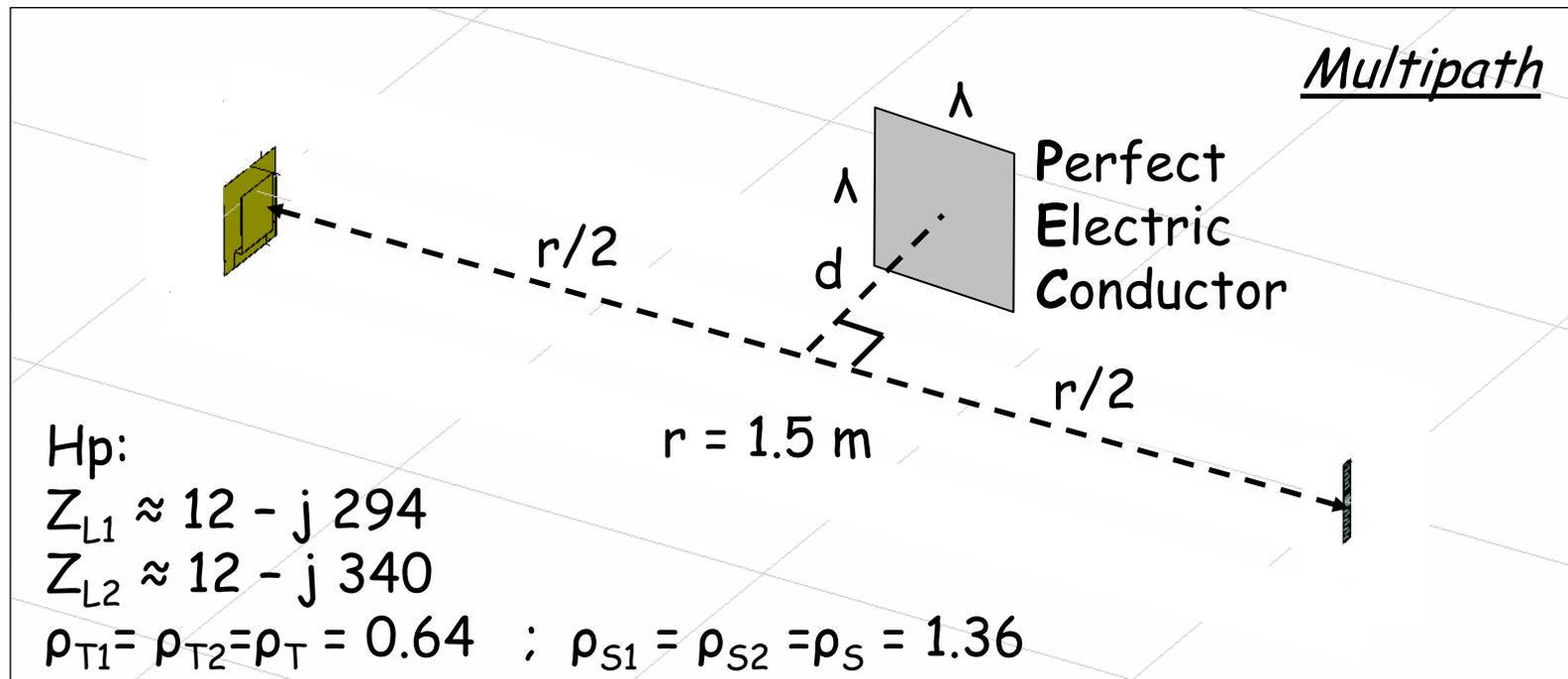
# Cammini Multipli

L'incremento della frequenza di lavoro (da HF a UHF) determina tuttavia l'insorgere di tutte le problematiche della propagazione a radiofrequenza (anche se in un ambiente ristretto), aumentando quindi la criticità dei sistemi in ragione di una maggiore sensibilità alle caratteristiche dell'ambiente operativo;

• La presenza di oggetti e/o ostacoli in prossimità dei dispositivi genera il fenomeno dei cammini multipli (*multipath*): il segnale irradiato giunge cioè al ricevitore in diverse repliche (o echi), ciascuna caratterizzata da un cammino di propagazione diverso per lunghezza e per numero e tipologia di interazioni con l'ambiente (riflessioni, diffrazioni, trasmissione, ecc.);

• I contributi ricevuti dai diversi cammini interferiscono fra loro e possono quindi alterare sensibilmente la potenza ricevuta (e più in generale distorcere la forma d'onda effettivamente ricevuta) rispetto al caso ideale in cui viene ricevuto il solo contributo "diretto"

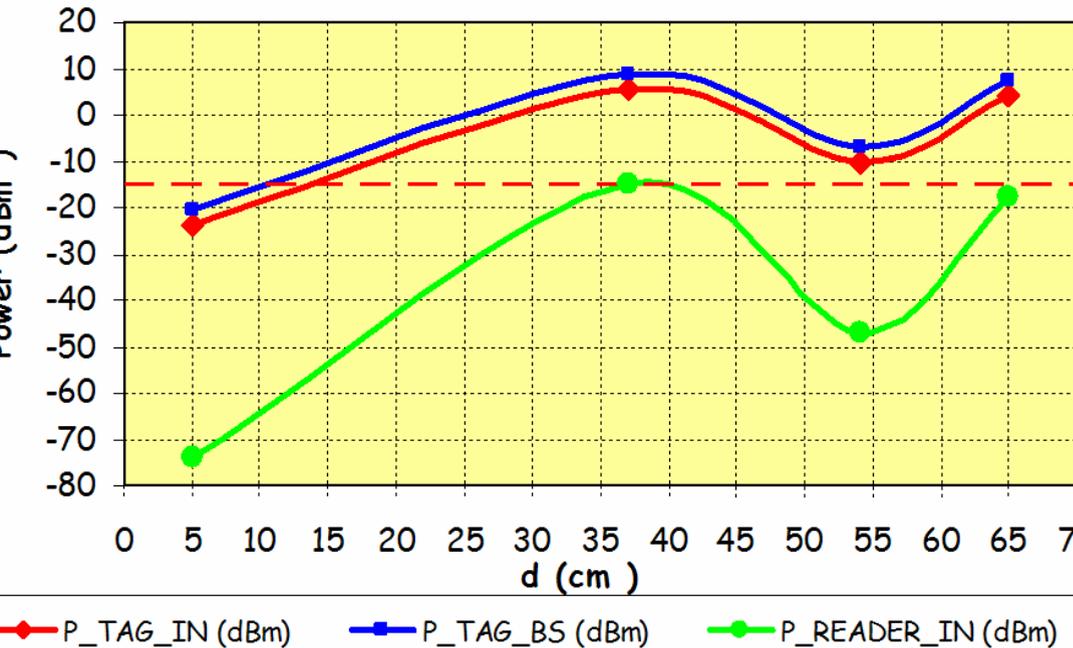
# Multipath - un semplice esempio (1/2)



- L'aggiunta di un solo oggetto può comportare perturbazioni anche molto significative delle condizioni di Spazio Libero;
- L'oggetto introdotto in figura genera certamente un contributo di riflessione speculare (superficie dell'oggetto // direzione del collegamento);

# Multipath - un semplice esempio (2/2)

1 object - REFLECTION



L'interferenza fra il contributo diretto e quello riflesso determina forti oscillazioni delle potenze in gioco, anche per modeste variazioni del valore di d

coeff. riflessione = -1

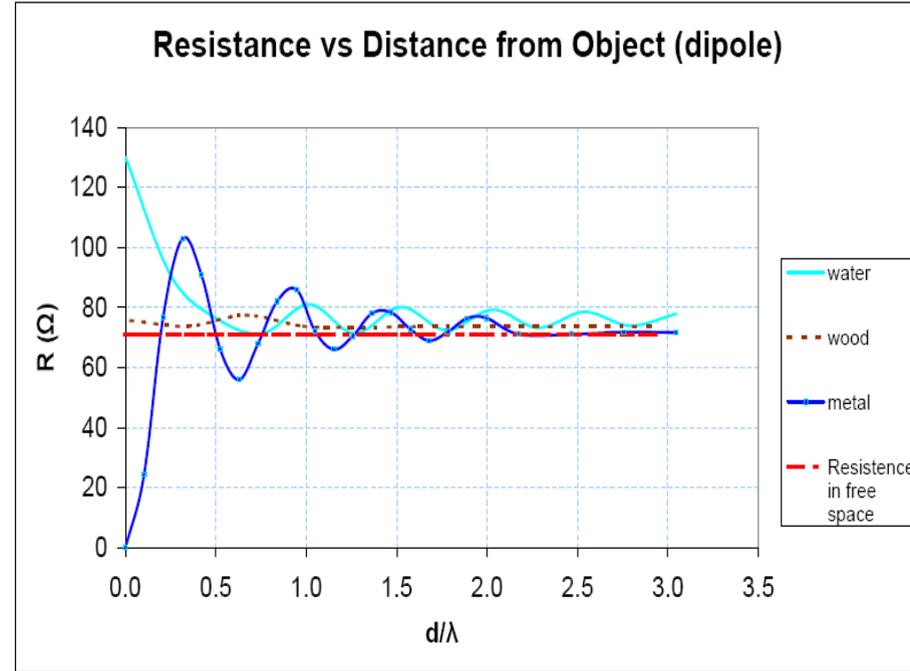
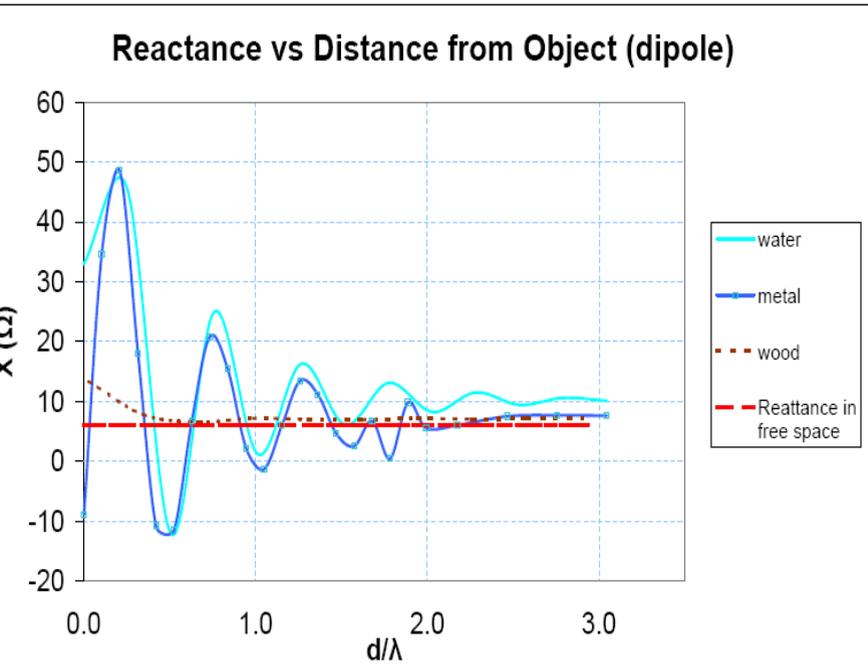
d (cm)	$\Delta\varphi = \beta r_D - \beta r_R + \pi$	Interferenza
5	$\sim 183^\circ$	distruttiva
37	$\sim 360^\circ$	costruttiva
54	$\sim 183^\circ$	distruttiva
65	$\sim 326^\circ$	$\sim$ costruttiva

# Accoppiamento EM

- ◇ oggetti nelle immediate vicinanze del *Tag* possono determinare fenomeni di accoppiamento EM in grado di alterare anche significativamente efficienza ( $\delta$ ) ed impedenza d'antenna ( $Z_A$ ) rispetto ai valori di progetto  $\rightarrow$  variazioni di  $\rho_T$ ,  $\rho_S$  ed  $m$  con conseguente possibile deterioramento delle prestazioni del sistema;
- ◇ l'entità dell'accoppiamento dipende dalla distanza ma anche dalla forma e dalle proprietà EM dell'oggetto (materiali);
- ◇ acqua e metalli risultano particolarmente critici per i sistemi in banda UHF;
- ◇ il problema dell'accoppiamento EM affligge potenzialmente tutti i sistemi di TLC, ma nel caso RFID è particolarmente critico perchè plausibile che l'oggetto identificato (al quale il *Tag* è fisicamente associato) sia sempre necessariamente a stretto contatto (o quasi) con il *Transponder*

# Analisi elettromagnetica

- In presenza di fenomeni di accoppiamento EM l'impedenza effettiva dell'antenna del *Tag* può perciò essere valutata solo tramite analisi numerica per mezzo di un opportuno simulatore elettromagnetico

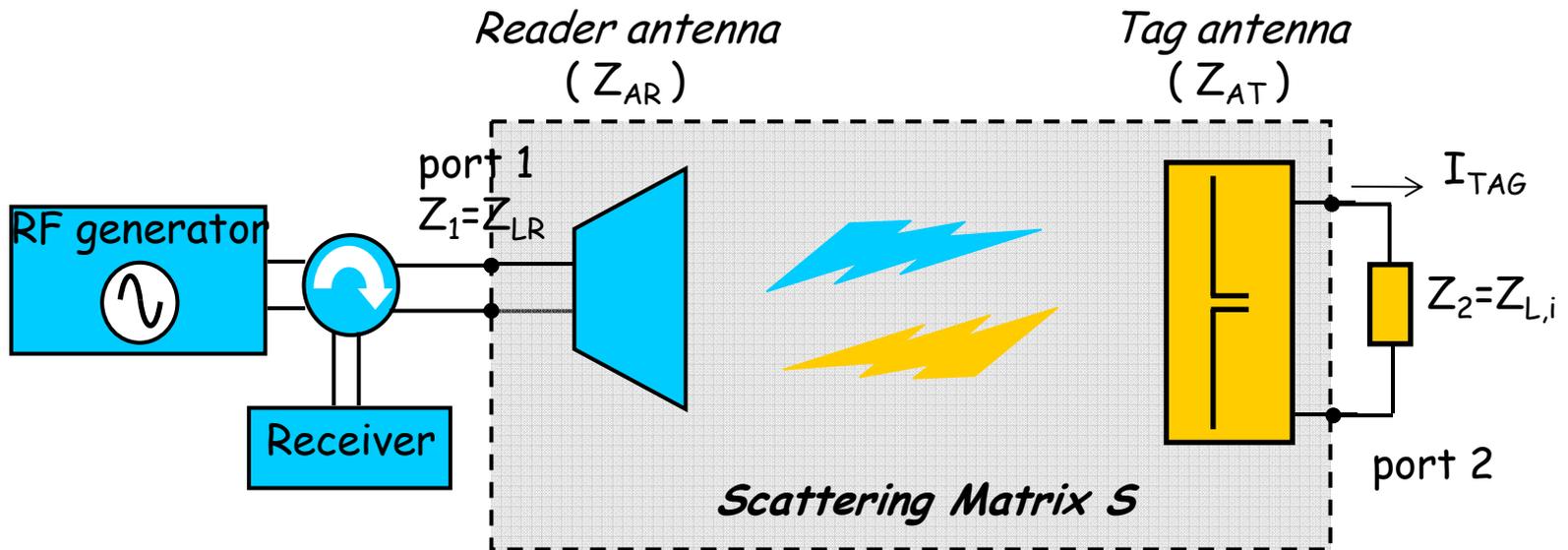


Come anticipato, metallo ed  $H_2O$  particolarmente critici

Variazioni di  $Z_A$  determinano variazioni di  $\rho_{T1,2}$ ,  $\rho_{S1,2}$  ed  $m \rightarrow P_{TagIn}$  e BER possono assumere valori anche molto diversi rispetto al caso ideale

# Link Level Simulation (1/3)

- ◇ l'intero collegamento RFID in presenza di accoppiamento EM e/o multipath può essere valutato per mezzo dell'analisi EM completa;
- ◇ un sistema RFID può sempre essere considerato come un "sistema 2-porte" in cui le porte 1 e 2 coincidono con i morsetti dell'antenna del *Reader* e del *Tag*, rispettivamente;



- ◇ il sistema 2-porte può quindi essere caratterizzato per via numerica per mezzo della matrice di diffusione S

# Link Level Simulation (2/3)

Nota la matrice di diffusione (analisi EM) è possibile valutare la potenza assorbita dal Tag nelle condizioni operative simulate:

$$P_{\text{TagIn}} = \frac{1}{2} \cdot \text{Re}(Z_2) \cdot |I_{\text{tag}}|^2 = \frac{1}{2} \cdot |S_{21}|^2 \cdot |a_1|^2$$

•  $a_1$  = intensità d'onda incidente alla porta 1:  $a_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot \text{EIRP}}{g_r}}$

$$Z_2 \in \{Z_{L1}, Z_{L2}\} \rightarrow P_{\text{TagIn}} \in \{P_{\text{TagIn1}}, P_{\text{TagIn2}}\}$$

Nota la matrice di diffusione (analisi EM) è possibile valutare i due valori di tensione  $V_{\text{mod1}}$ ,  $V_{\text{mod2}}$  all'ingresso del ricevitore associati ai due stati di modulazione:

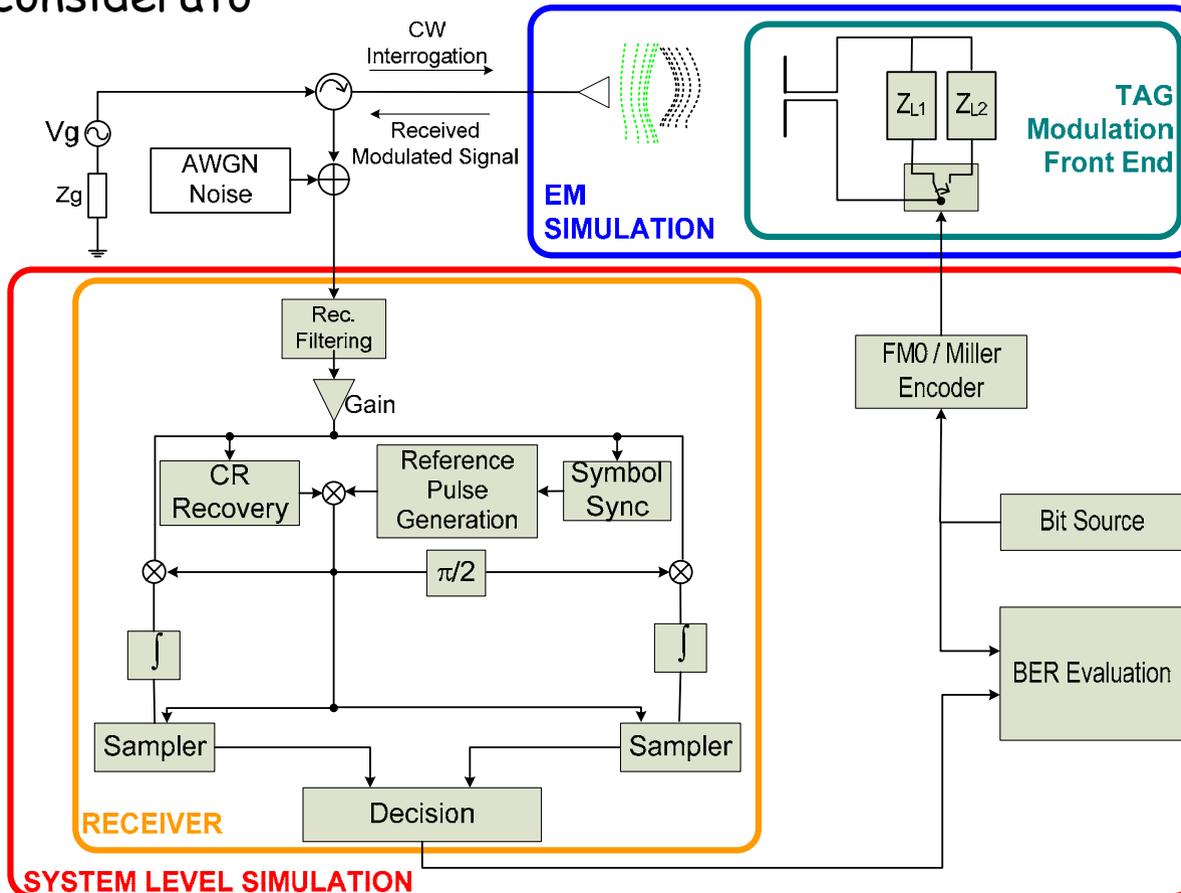
$$V_{\text{mod}} = -\frac{(Z_{AT} + Z_2) \cdot Z_1}{2 \cdot \Re(Z_2) \cdot \sqrt{\Re(Z_1)}} \cdot p_2 \cdot p_1 \cdot S_{21} \cdot S_{12} \cdot a_1$$

•  $p_1 = \begin{cases} +1 & \text{se } \Re(Z_1) \geq 0 \\ -1 & \text{se } \Re(Z_1) < 0 \end{cases}$  ;  $p_2 = \begin{cases} +1 & \text{se } \Re(Z_2) \geq 0 \\ -1 & \text{se } \Re(Z_2) < 0 \end{cases}$

$$Z_2 \in \{Z_{L1}, Z_{L2}\} \rightarrow V_{\text{mod}} \in \{V_{\text{mod1}}, V_{\text{mod2}}\}$$

# Link Level Simulation (3/3)

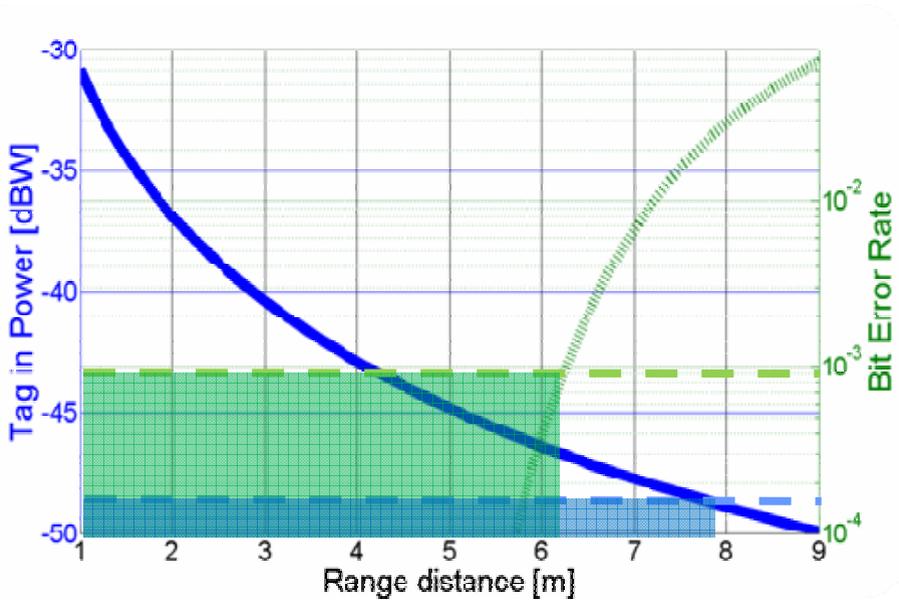
- ◇ A partire dai valori  $V_{\text{mod}1,2}$ , e conoscendo il disturbo che affligge la ricezione (rumore/interferenza) è possibile simulare il processo di demodulazione e decodifica al Reader e valutare quindi la BER nel particolare contesto operativo considerato



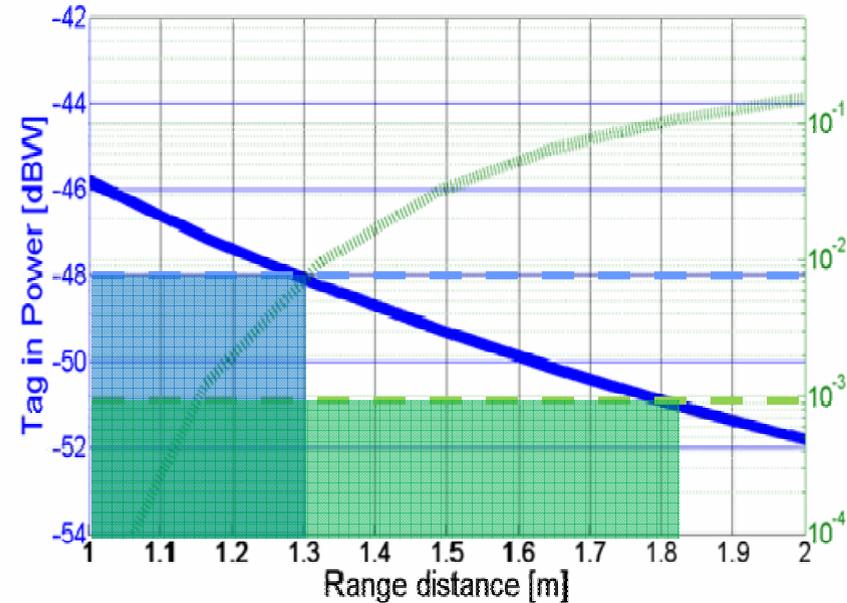
# Risultati: esempio

PSK ( $m=0.8$ )

Free Space



Real Case



# Life Cycle & Privacy

Il **ciclo di vita** dei *Tag* supera spesso, e di gran lunga, quello degli oggetti ai quali sono associati. Specie i *Tag passivi*, non necessitando di batterie, hanno aspettativa di vita teoricamente infinita.

→ possibilità di continuare ad interrogare gli oggetti da tempo in possesso di proprietari privati, traendo da ciò informazioni sulle abitudini dei proprietari medesimi.

**RFID e privacy:** legato alle applicazioni di tipo *ILT (item level tagging)*, ovvero ad applicazioni *Tag* a singoli articoli di consumo e ad oggetti abitualmente in possesso di privati (carte di pagamento o di accesso, apparati elettronici, ticket, ecc.).

**Potenziale minaccia:** acquisizione di informazioni indebite sul utente finale.

**Possibile soluzione:** possibilità di disattivare permanentemente i TAG al termine della catena di distribuzione, ovvero quando gli oggetti siano entrati in possesso dell'utente finale → *killing*

**In Italia:** il Garante per la Protezione dei Dati Personali ha emesso un provvedimento: *Garanzie per l'uso di "Etichette intelligenti" (Rfid) - 09/03/05*, che definisce misure al fine di rendere il trattamento dei dati personali nell'ambito dei sistemi RFID conforme alle disposizioni vigenti.

# Security

Le etichette elettroniche sono nate per una acquisizione automatica → acritica

Operazioni attuabili sui dati sensibili (*hacking*):

- *Acquisizione fraudolenta*
  - *Alterazione*
  - *Distruzione*
- 
- *Tracciamento illecito*
  - *Clonazione o furto degli ID*
  - *Violazione della privacy*

Operazioni facilitate dall'uso di tecnologie che non richiedono né il contatto fisico, né la visibilità degli apparati

Soluzioni efficienti:

- *killing* : disabilitazione definitiva del *Tag* in modo che non possa più essere letto (tutti i *Tag* di ultima generazione riconoscono il comando *killing*)
- *cloaking* : si adottano accorgimenti per cui un *Tag* possa esser rilevato solo da determinati *Reader* e risulti invece "mascherato", nascosto per tutti gli altri
- metodi di *crittografia* (creazione di un 'canale sicuro') → criptazione / autenticazione

# Applicazioni (1/2)

- ◇ *SmartWear Tech.* (San Diego, CA) has introduced two new products designed to give parents additional protection against child abduction and to aid in recovery of missing children.
- ◇ Use of RFID transponders sewn into clothing (2.4 GHz)
- ◇ The company's first products incorporate RFID tags embedded in clothing of children, which allow parents to monitor the child's whereabouts and trigger an alarm if the child leaves a designated area or crosses a boundary
- ◇ Readers would be placed strategically at doors, windows or gates and the system could be programmed to respond if the child moves out of a designated area

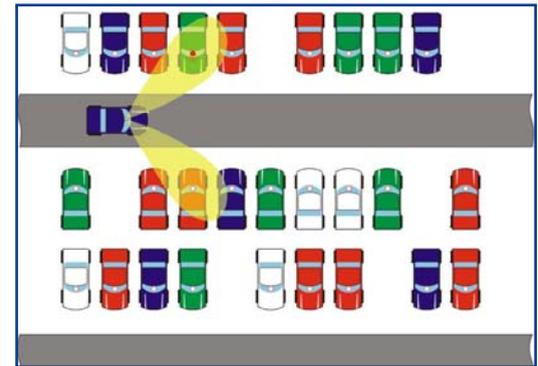
Sapendo coniugare "fantasia" e competenza tecnica, la tecnologia RFID si presta ad innumerevoli possibili applicazioni

# Applicazioni (2/2)

**Controllo accessi:** il reader vicino alla porta riconosce il codice ID dei tag portati dai dipendenti, abilitando l'apertura della porta

**Tracking di merci o prodotti:** viene monitorato lo spostamento dei prodotti (per mezzo di opportuni gate di lettura) lungo la catena di distribuzione e/o produzione al fine di individuare eventuali inefficienze del sistema (es. sistema postale)

**Identificazione:** viene individuata la presenza e la posizione di un determinato oggetto rilevando il *Tag* associato (esempio: identificazione parco automezzi)



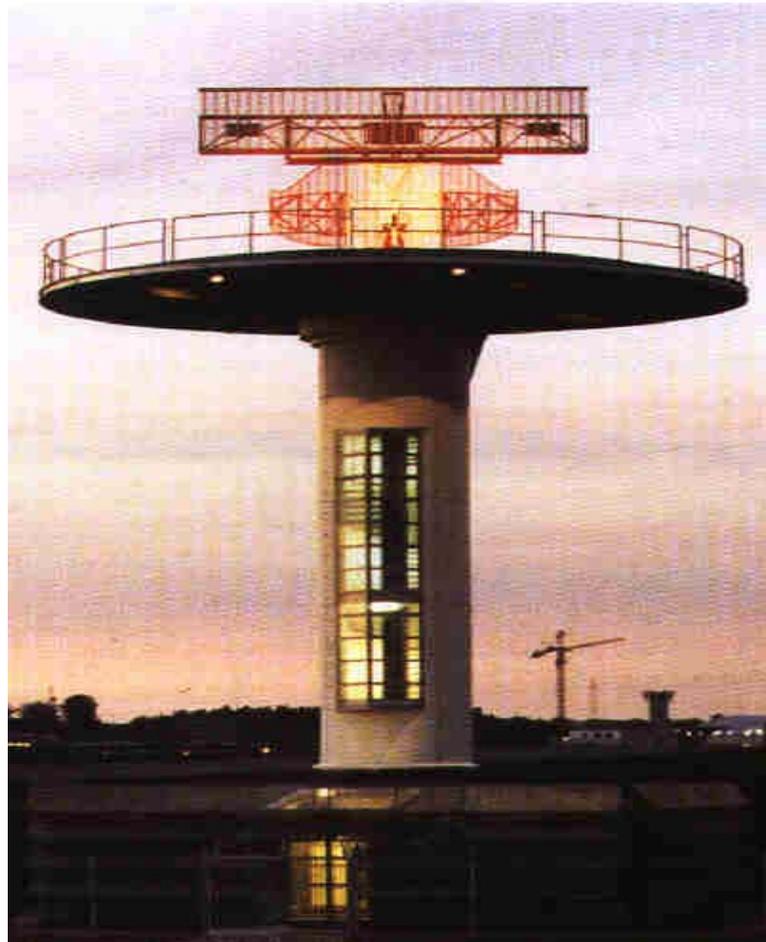
**Sanità:** il paziente viene dotato di un braccialetto (*wristband*) sul quale può essere trascritta la cartella clinica per tenere traccia di dati personali, cure, dosaggi

**Vendita al minuto:** tutti gli articoli in vendita sono etichettati con tag (*Item Level Tagging - ILT*) contenenti le informazioni del prezzo, che vengono trasferite al reader

# Conclusioni

- ◇ RFID tecnologia molto flessibile che si presta ad una molteplicità di interessanti applicazioni;
- ◇ Esistono molte applicazioni ad accoppiamento induttivo, limitate tuttavia dallo scarso *range* di lettura (1÷2 m al più);
- ◇ Estensione / standardizzazione della frequenza operativa in banda UHF "promette" sensibile incremento della distanza di lettura → grande interesse e forte attenzione a studi e sperimentazioni su tali sistemi
- ◇ Problemi in ambiente reale dovuti principalmente a cammini multipli ed accoppiamento EM → ricerca e sviluppo di applicazioni e soluzioni innovative affinché tali promesse possano essere effettivamente mantenute

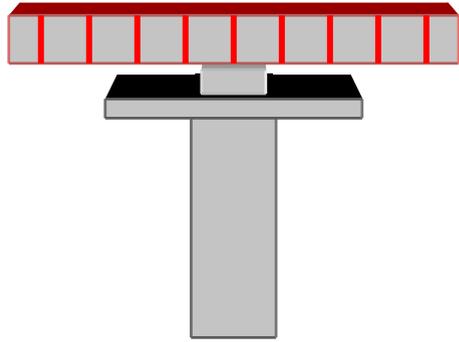
# IL RADAR SECONDARIO (Secondary Surveillance Radar - SSR)



# Introduzione (1/2)

- ◇ Il Radar Primario (*Primary Surveillance Radar - PSR*) irradia un'onda EM e riceve l'eco riflesso da eventuali oggetti, rilevandone così presenza, distanza e azimuth, ma non l'identità.
- ◇ *Identification Friend or Foe (IFF)* - primo sistema di identificazione utilizzato dall'aeronautica britannica durante la II Guerra Mondiale: gli aerei equipaggiati con IFF erano in grado di rispondere con un ben preciso segnale (radio) all'interrogazione (radio) ricevuta da un trasmettitore di terra;
- ◇ Il Radar Secondario (*Secondary Surveillance Radar - SSR*) rappresenta una evoluzione dell'IFF che risponde alle necessita del Controllo del Traffico Aereo (*Air Traffic Control - ATC*)

# Introduzione (2/2)



◇ Il radar secondario (SSR) è **cooperativo** perché necessita del transponder a bordo dell'aereo.

◇ Il radar secondario fornisce **3 coordinate** dell'aereo:

- **distanza** rispetto al sensore
- **azimut** rispetto ad una direzione di riferimento
- **quota** ricavata da un altimetro dedicato

◇ Il radar secondario (SSR), ad eccezione della quota barometrica, è **indipendente** perché è l'unità di terra che calcola la distanza e l'azimut dell'aereo.

# Generalità

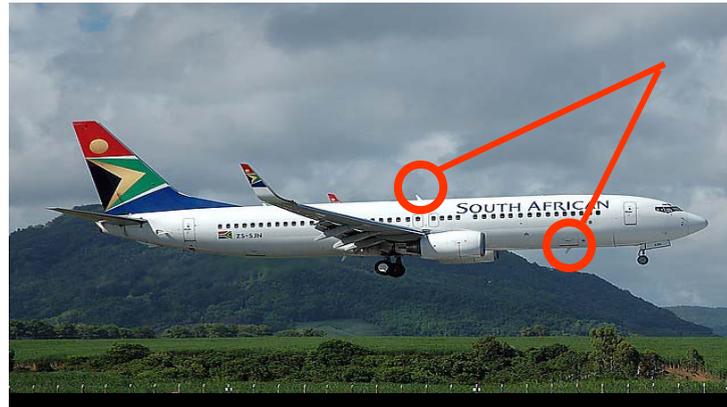


## Radar primario (PSR)



Aereo è elemento **passivo**

Riflette parte dell'energia elettromagnetica che lo investe



## Radar secondario (SSR)



Aereo è elemento **attivo**

Risponde alle sollecitazioni che provengono dal radar

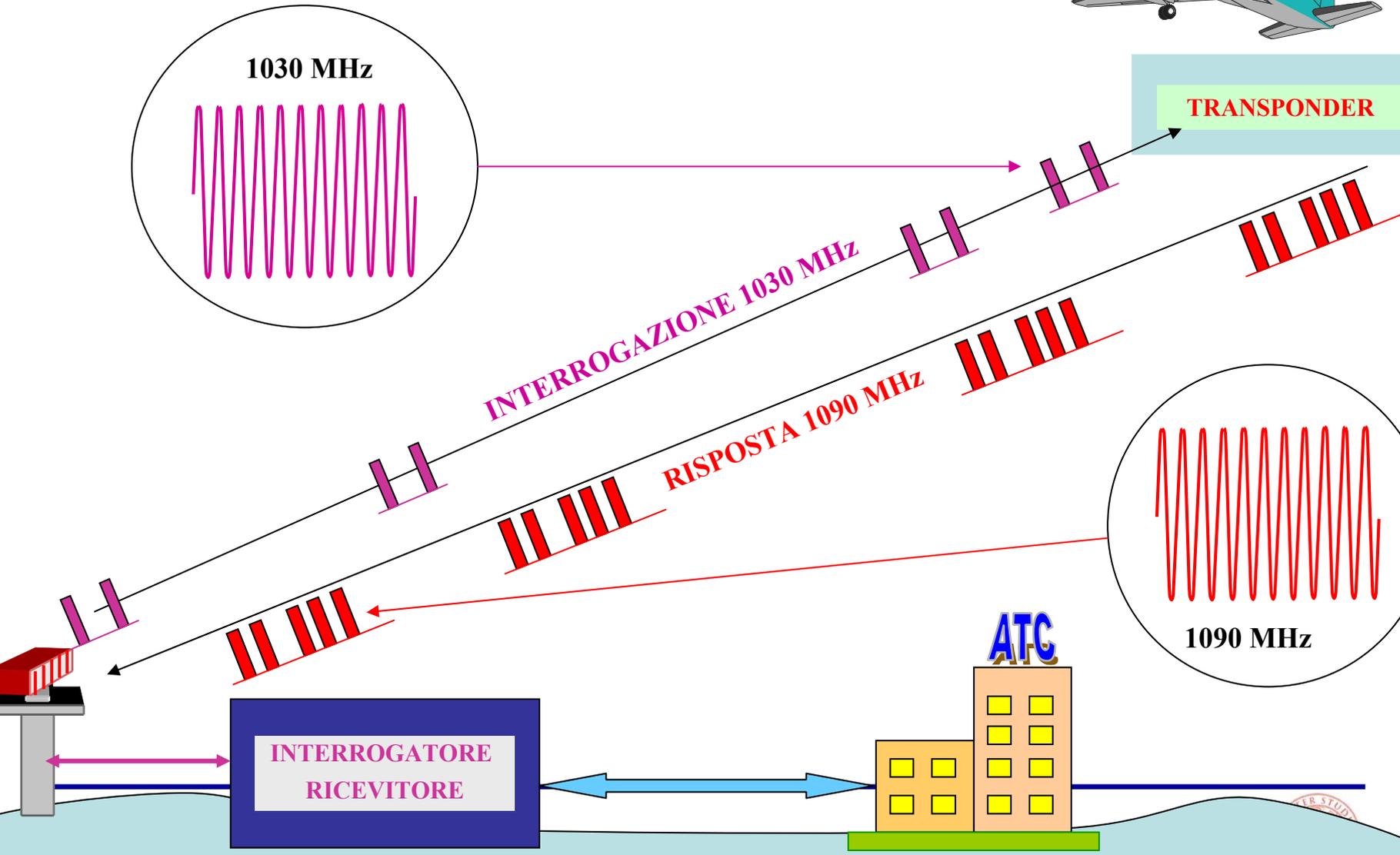
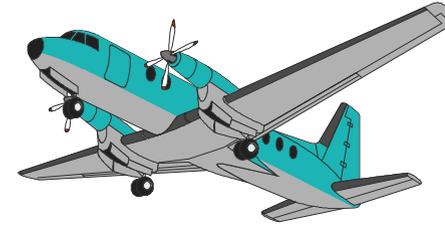
# Principio di funzionamento (1/3)

- ◇ Il radar secondario è un sistema capace di rilevare la presenza di aerei purché questi siano dotati di un'apposita unità (**TRANSPONDER**) destinata a rispondere alle sollecitazioni che giungono da terra.
- ▷ L'apparato di terra (**INTERROGATORE-RICEVITORE**) dell'SSR trasmette periodicamente (con intervallo di tempo = PRT - *Pulse Repetition Time*), delle "*interrogazioni codificate*" per mezzo di una antenna direttiva rotante;
- ▷ Il **TRANSPONDER** di bordo riceve le singole interrogazioni, le decodifica e, se le *riconosce valide*, attiva il proprio trasmettitore che produrrà singole "*risposte codificate*" (sequenze di impulsi di caratteristiche opportune).
- ▷ Il **RICEVITORE** di terra dalla risposta ricava l'**azimut** e la **distanza**, con la stessa tecnica di un radar primario, e, decodificando gli impulsi della risposta, ricava le informazioni aggiuntive.

*Nota: interrogazione o risposta codificata ⇒ serie di impulsi che in funzione dell'intervallo di tempo tra un impulso ed il successivo o della presenza/assenza di uno o più impulsi hanno significati diversi.*

*L'Annesso 10 dell'International Civil Aviation Organization (ICAO) descrive le specifiche tecniche di funzionamento del radar SSR e del transponder.*

# Principio di funzionamento (2/3)



# Principio di funzionamento (3/3)

## INTERROGATORE - RICEVITORE

- ⇒ **Antenna direttiva** specialmente nel piano orizzontale per ottenere
  - precisione
  - risoluzione in azimut
- ⇒ **Frequenza di interrogazione**  $F_i = 1030 \text{ MHz}$  (Up-Link)

## TRANSPONDER

- ⇒ **Antenna quasi Omnidirezionale**
- ⇒ **Frequenza di risposta**  $F_r = 1090 \text{ MHz}$  (Down-Link)

## FREQUENZE SSR

- ⇒ Standardizzate dall'ICAO
- ⇒ Consentono di usare la stessa antenna in trasmissione e ricezione
- ⇒ Non interferiscono con il PSR

# Normativa ICAO

DISTANZA e AZIMUT calcolata come nel radar primario

IDENTIFICAZIONE iniziale e continua

TRASMISSIONE AUTOMATICA della QUOTA BAROMETRICA

IMPULSO SPECIALE di IDENTIFICAZIONE

INDICAZIONE di :  
⇒ EMERGENZE  
⇒ RADIOAVARIE  
⇒ INTERFERENZE ILLECITE

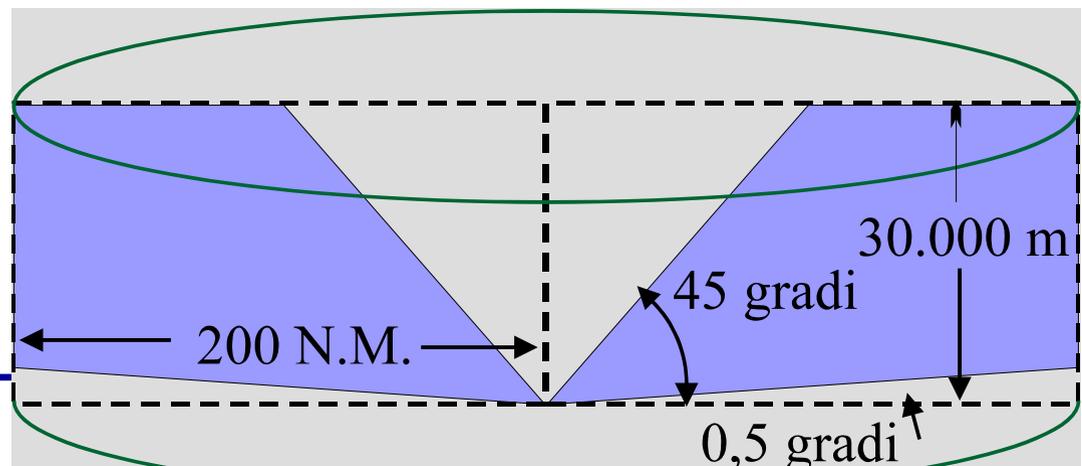
con:

PORTATA = 200 nm (nautical mile) ~ 370 km

QUOTA = 30 km per elevazioni tra  $0,5^\circ$  e  $45^\circ$

AZIMUT =  $360^\circ$

PRF = max 450 interr./sec



# EUROCONTROL - Requisiti di copertura

**EN-ROUTE AIRSPACE** (minima separazione radar 5 nm)

## **COPERTURA SSR DUPLICATA**

La portata orizzontale della copertura dovrà essere almeno 30 nm oltre l'area di responsabilità dell'ACC pertinente eccetto quando questo non sia possibile a causa di limitazioni geografiche.

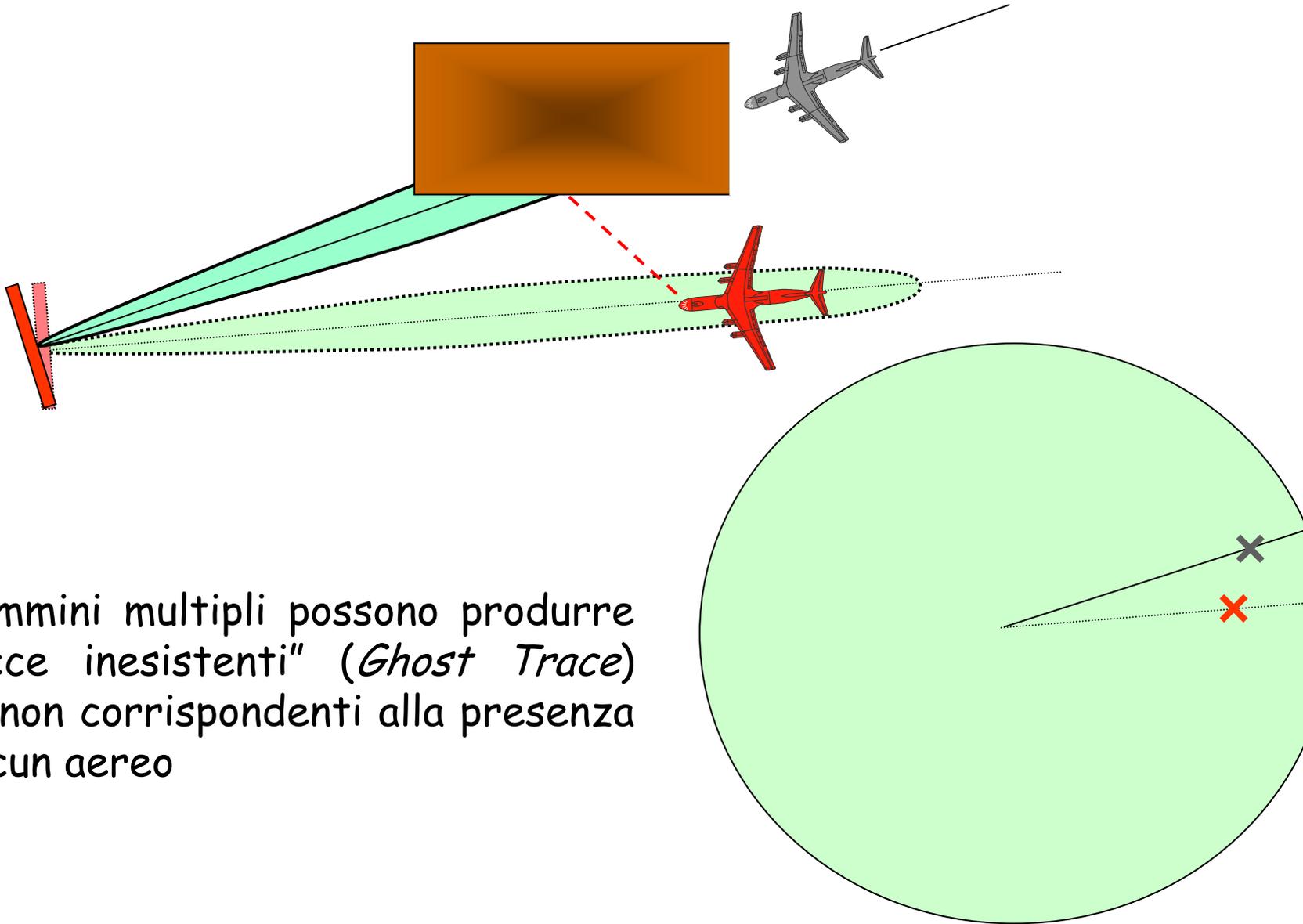
**HIGH COMPLEXITY TMA** (minima separazione radar 3nm)

## **COPERTURA SSR DUPLICATA e COPERTURA RADAR PRIMARIO SINGOLA**

Questa combinazione assicura la disponibilità continua di informazioni radar sulla posizione degli aeromobili e consente di fornire i servizi ATC ad aeromobili incapaci di rispondere alle interrogazioni SSR.

*Nota: Copertura SSR duplicata vuol dire che per un dato punto dello spazio i dati radar utilizzati dal centro ATC per la funzione di sorveglianza sono derivati da almeno due unità SSR indipendenti e funzionanti separatamente.*

# LIMITAZIONI - Cammini Multipli

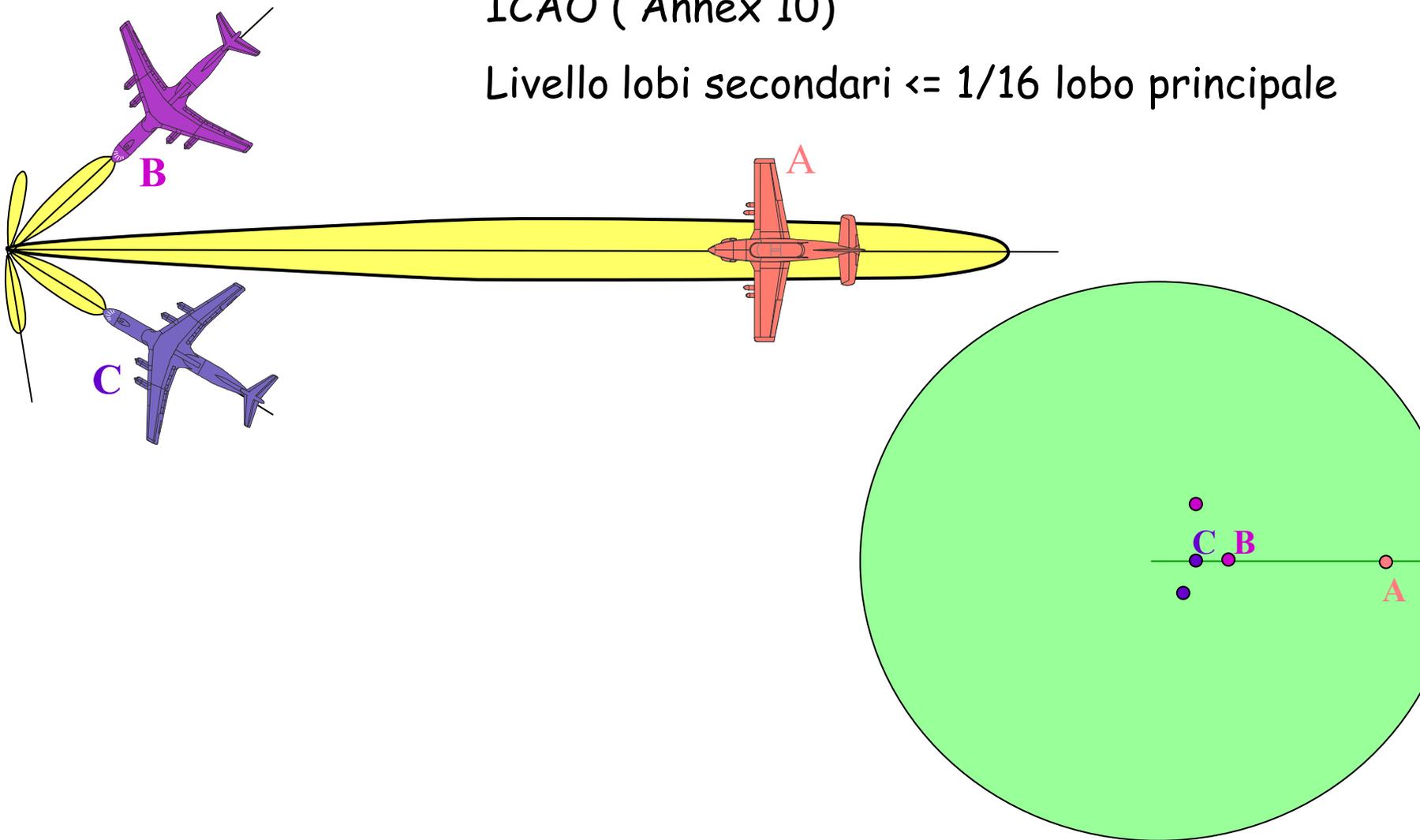


I cammini multipli possono produrre "tracce inesistenti" (*Ghost Trace*) cioè non corrispondenti alla presenza di alcun aereo

# LIMITAZIONI - Interrogazioni dei Lobi Secondari

ICAO ( Annex 10)

Livello lobi secondari  $\leq 1/16$  lobo principale

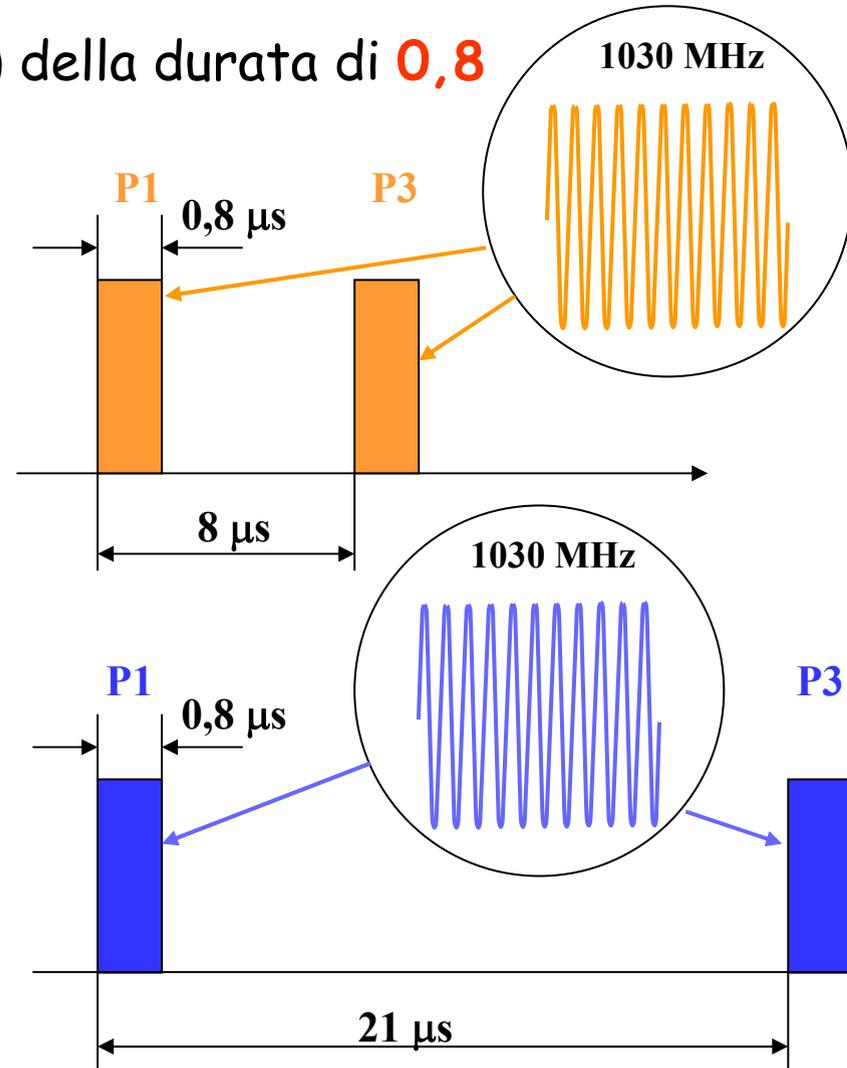


# Interrogazioni

Costituite da **2** impulsi a RF (1030 MHz) della durata di **0,8** **μsec** :

## Modo 3/A

Identificazione e sorveglianza



## Modo C

Quota dell'aeromobile

# SLS - Side Lobe Suppression

Nel radar secondario il transponder può essere attivato da interrogazioni provenienti dai lobi secondari producendo la rivelazione di aerei in posizioni errate.

La tecnica **SLS** consente al transponder di **"riconoscere"** se l'interrogazione proviene dal lobo principale (in tale caso il transponder risponde) o dai lobi secondari (in tal caso l'interrogazione viene ignorata).

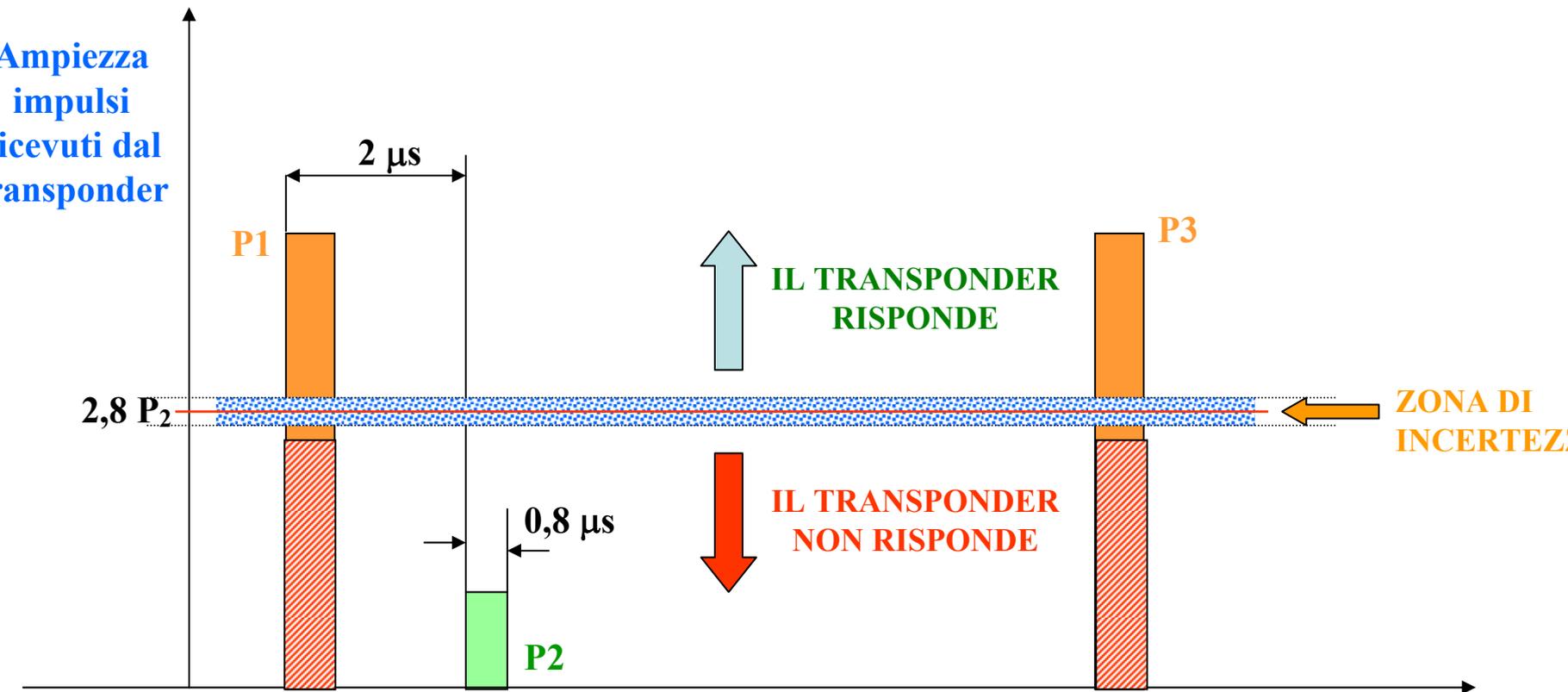
La tecnica **SLS** viene realizzata con la trasmissione di un impulso di controllo **P<sub>2</sub>** (stessa durata e frequenza di **P<sub>1</sub>** e **P<sub>3</sub>**) trasmesso 2μsec. dopo l'impulso **P<sub>1</sub>**.

Il transponder effettua il "riconoscimento" della provenienza dell'interrogazione (da lobo principale o da lobi secondari) confrontando le ampiezze degli impulsi ricevuti (**P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>**).

➤ Ampiezza di **P<sub>1</sub>** e **P<sub>3</sub>**  $\geq 2,8$  volte quella di **P<sub>2</sub>** ➔ il transponder **risponde**

➤ Ampiezza di **P<sub>1</sub>** e **P<sub>3</sub>**  $< 2,8$  volte quella di **P<sub>2</sub>** ➔ il transponder **non risponde**

# SLS - Side Lobe Suppression



L'ampiezza di  $P_1$  deve essere  $\geq 2,8$  volte quella di  $P_2$

L'impulso  $P_2$  non partecipa alla determinazione del **Modo**

# SLS - Side Lobe Suppression

La tecnica SLS può essere realizzata con due diverse soluzioni:

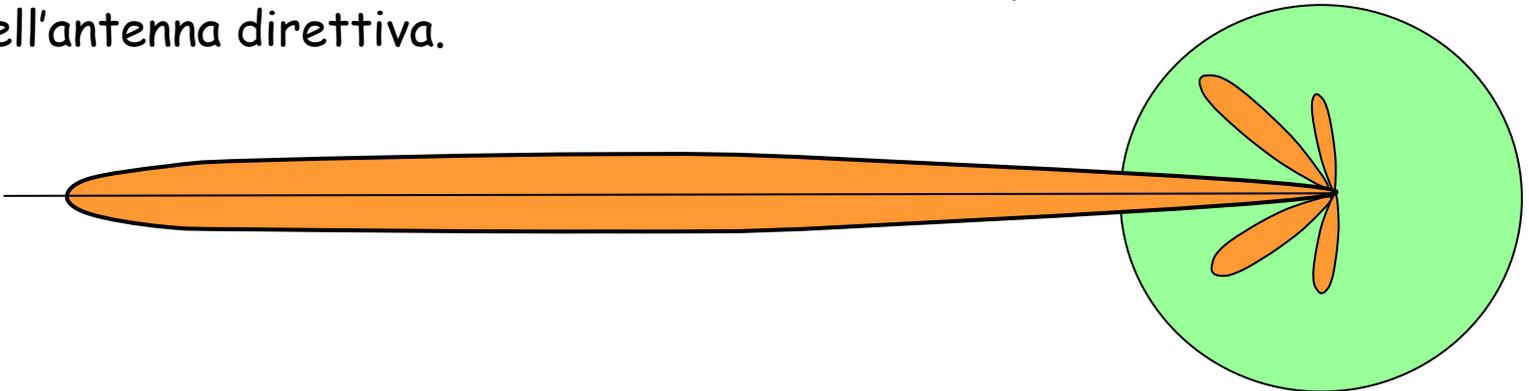
⇒ SLS con antenna ausiliare omnidirezionale

⇒ SLS con antenna "monopulse"

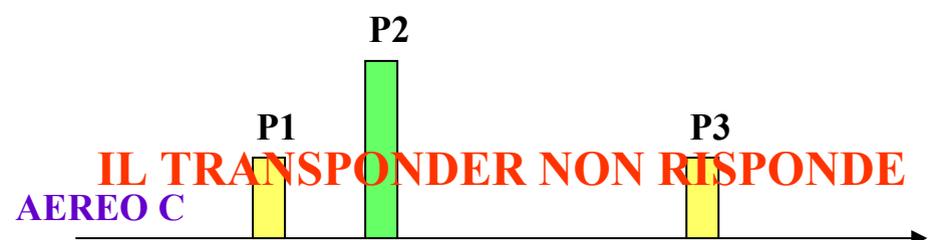
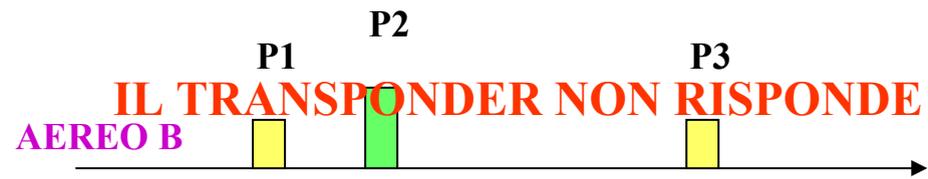
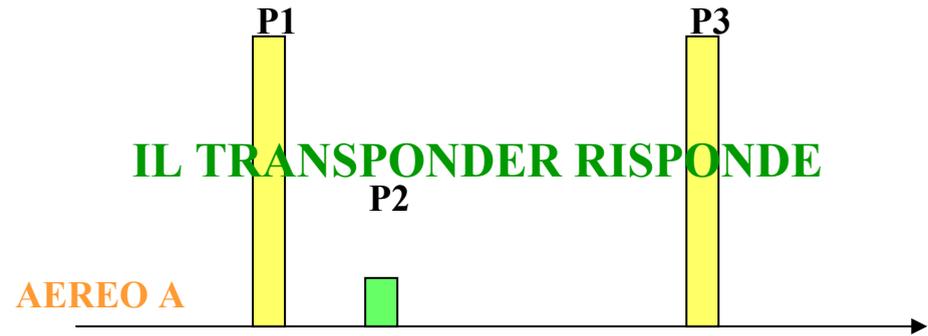
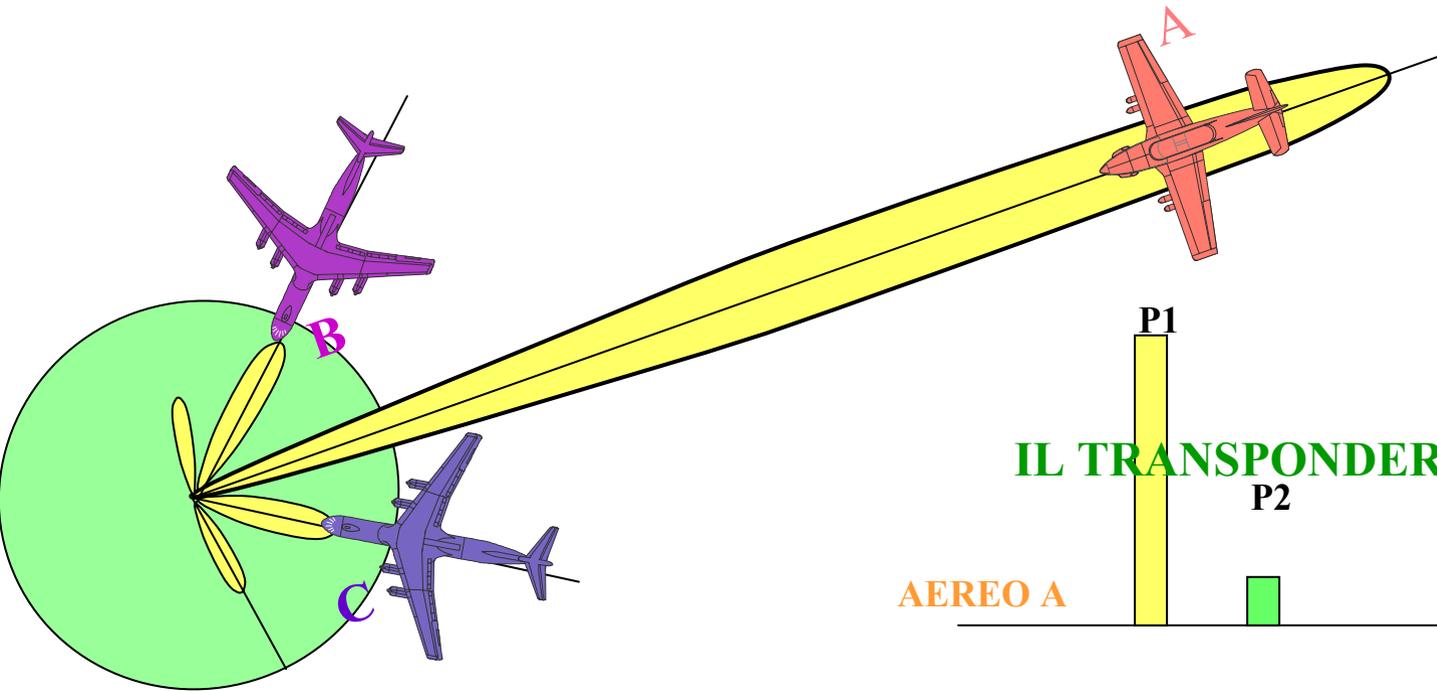
## SLS CON ANTENNA AUSILIARE OMNIDIREZIONALE

In questa realizzazione gli impulsi  $P_1$  e  $P_3$  sono trasmessi per mezzo dell'antenna direttiva mentre l'impulso  $P_2$  è trasmesso per mezzo dell'antenna ausiliare omnidirezionale.

Le caratteristiche dell'antenna omnidirezionale devono essere tali che in tutte le direzioni il segnale  $P_2$  deve essere più ampio di quello ( $P_1$  e  $P_3$ ) trasmesso dal piccolo lobo secondario e notevolmente inferiore di quello trasmesso dal lobo principale dell'antenna direttiva.

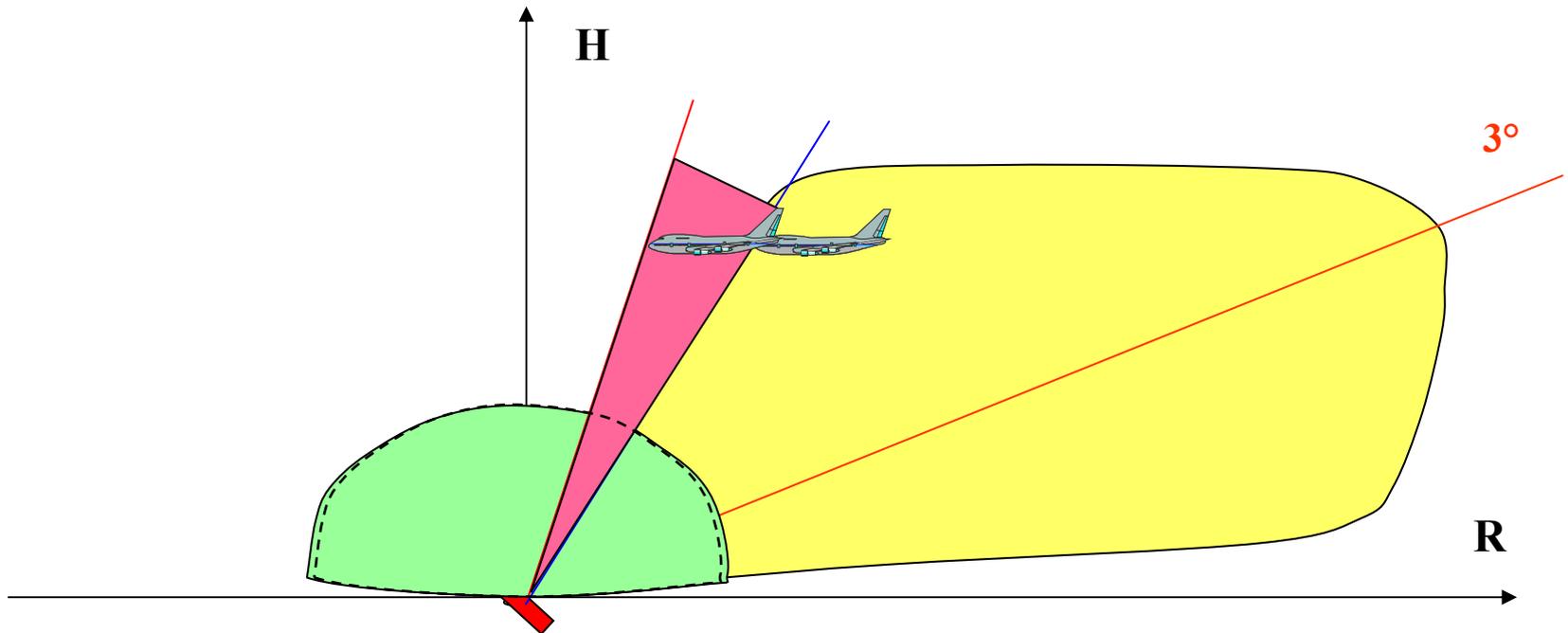


# SLS con Antenna Ausiliare OMNIDIREZIONALE (1/2)



## SLS con Antenna Ausiliare OMNIDIREZIONALE (2/2)

Il SLS effettuato con l'antenna ausiliare omnidirezionale non offre una buona risposta agli angoli alti ove risulta difficile mantenere sotto controllo i diagrammi di irradiazione delle due antenne (principale ed ausiliare) in modo da garantire i corretti rapporti di ampiezza tra P1-P3 e P2.

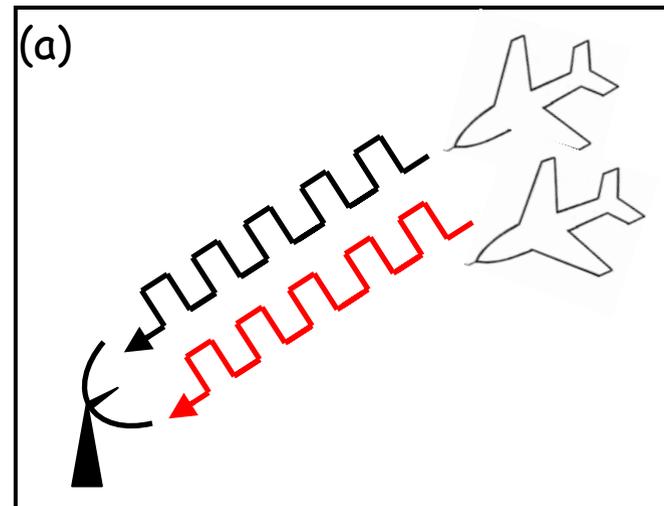


Il SLS con **antenna somma e differenza** offre migliore prestazioni.

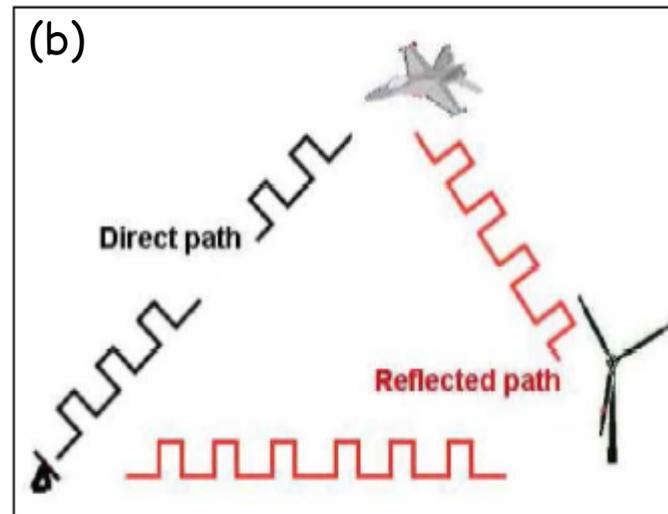
# LIMITAZIONI - *Garbling* (1/5)

◇ *Garbling* = sovrapposizione simultanea (anche parziale) al ricevitore di terra di più segnali generati in risposta all'interrogazione del SSR

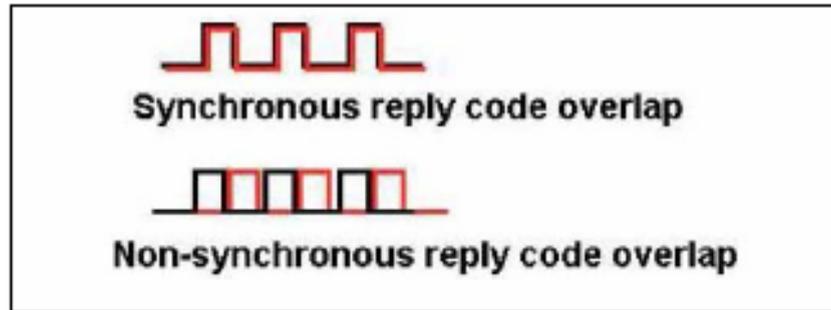
a. Sovrapposizione delle risposte dei Transponder di aerei relativamente vicini.



b. Sovrapposizione di repliche della risposta di uno stesso Transponder dovute a cammini multipli



# LIMITAZIONI - *Garbling* (2/5)

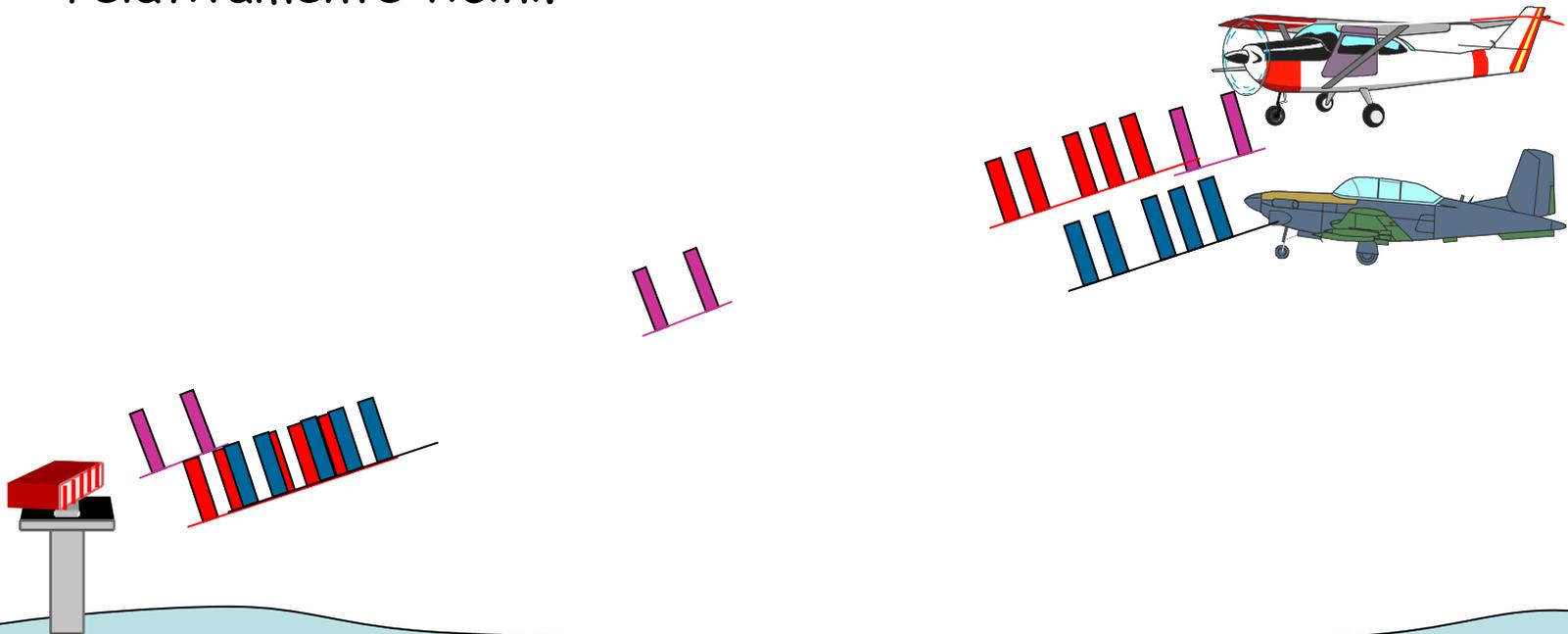


- ◇ Sovrapposizione sincrona: il segnale risultante rispetta tutte le specifiche in tempo e ampiezza<sup>(\*)</sup> e può quindi apparire come una nuova parola di codice (che in realtà nessuno ha trasmesso -> *ghost code*)
  - i due segnali non sono distinguibili e non possono essere recuperati;
  - Situazione potenzialmente dannosa -> il sistema deve essere in grado di scartare il codice fantasma
- ◇ Sovrapposizione asincrona: il segnale risultante NON soddisfa le tempistiche necessarie e non può quindi apparire come *ghost code*
  - i due segnali sono potenzialmente distinguibili e possono essere recuperati;

(\*) ogni risposta è costituita da una sequenza di impulsi equi-ampiezza e distanti 1.45  $\mu$ sec. (o multipli interi di tale valore)

# LIMITAZIONI - Garbling (3/5)

Sovrapposizione delle risposte dei transponder di aerei relativamente vicini.



## Effetti

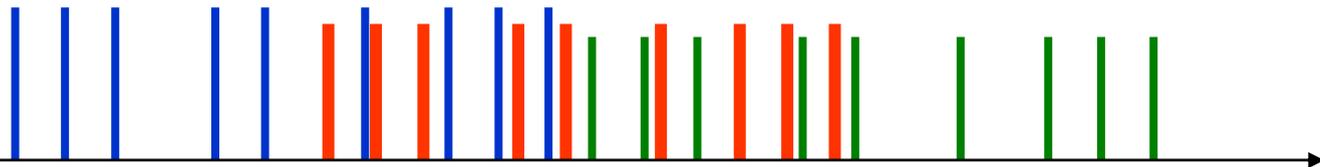
- ⇒ Impossibilità di distinguere entrambi gli aerei
- ⇒ Normalmente le informazioni di codice e quota vengono perse
- ⇒ Possibilità di "ricevere" codici fantasma (phantom or ghost code)
- ⇒ Negli spazi aerei ad alta densità di traffico aerei in volo lungo la stessa aerovia possono produrre "garbling" per lunghi periodi

# LIMITAZIONI - Garbling (4/5)

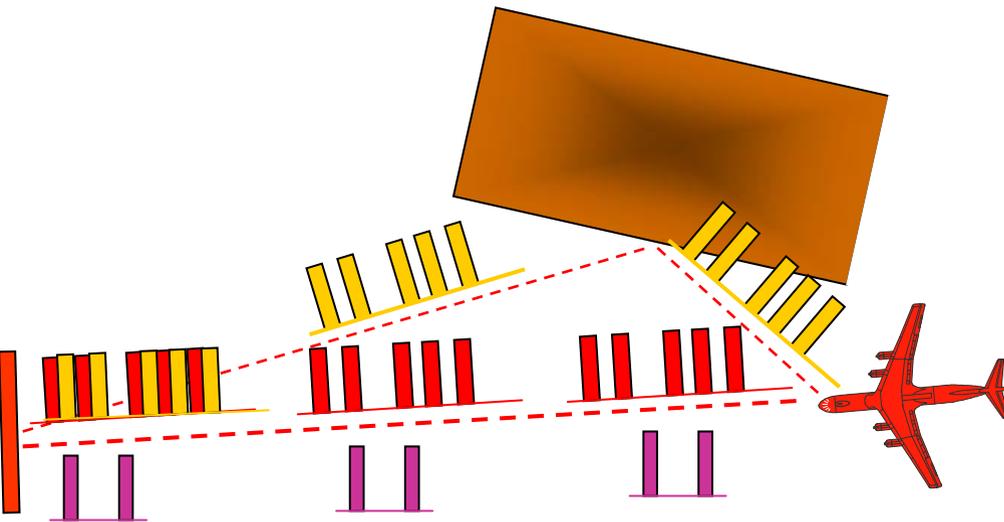
## PROTEZIONI

- ⇒ Ignorare le risposte con presenza di impulsi non previsti
- ⇒ Memorizzare i codici ricevuti, quando gli aerei non erano così vicini da produrre garble, ed estrarre i codici corretti dal garble mediante algoritmi di correlazione;
- ⇒ Separare gli impulsi provenienti da un transponder dagli altri mediante una accurata misura della durata e dell'ampiezza dei singoli impulsi e dell'intervallo di tempo tra un impulso e l'altro (*I transponder non sono tutti "uguali" e gli impulsi appartenenti ad una stessa risposta - **stesso transponder** - hanno normalmente ampiezza e durata simile*)

Risposte SSR  
convenzionale



# LIMITAZIONI - Garbling (5/5)



Sovrapposizione di repliche della risposta di uno stesso Transponder dovute a cammini multipli

- ◇ Molto spesso l'eco ha una ampiezza differente (inferiore) rispetto al segnale diretto -> il garbling può essere rilevato ed il codice recuperato per mezzo di algoritmi di correlazione;
- ◇ Se il Transponder è attivato da un lobo secondario, l'eco può essere rilevato dal lobo principale ed allora le ampiezze dei due segnali possono essere confrontabili -> potenziale "ghost code" FF30

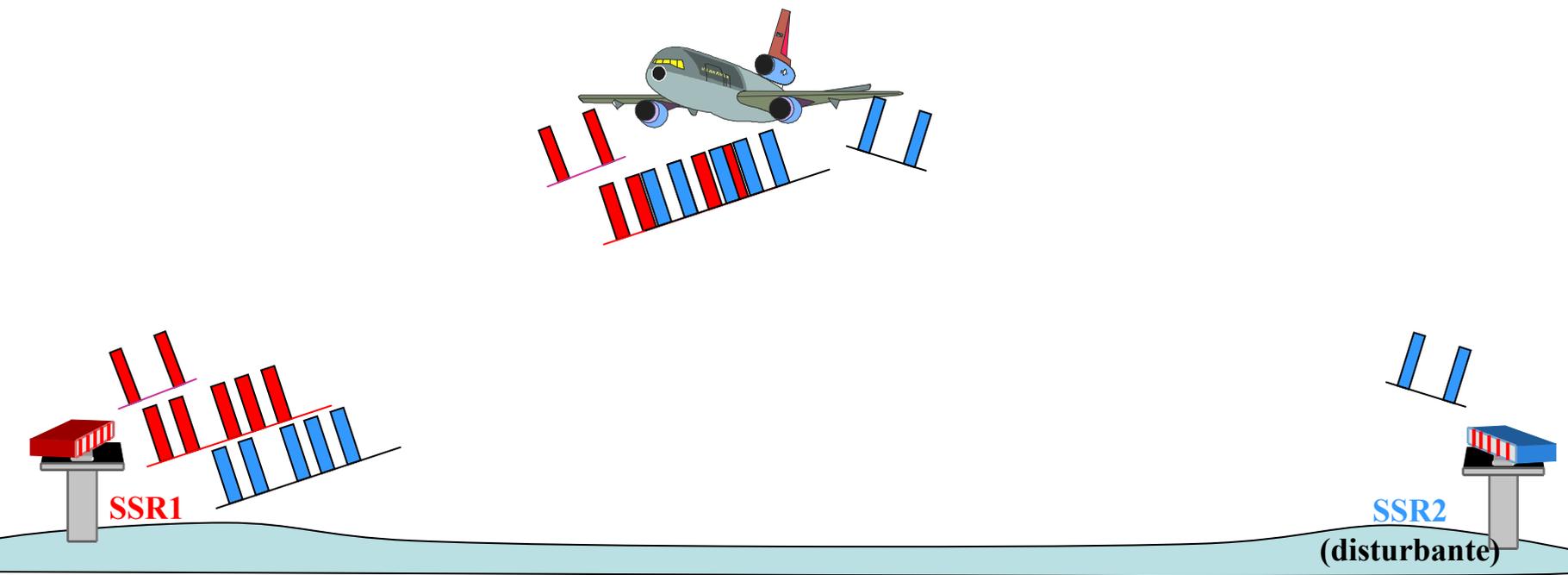
30

Si noti che in questo caso, ANCHE qualora il garbling venisse risolto, la stima di posizione sarebbe comunque errata perche' se il Transponder attivato da un lobo secondario comunque la posizione verrebbe stimata lungo la direzione del lobo principale

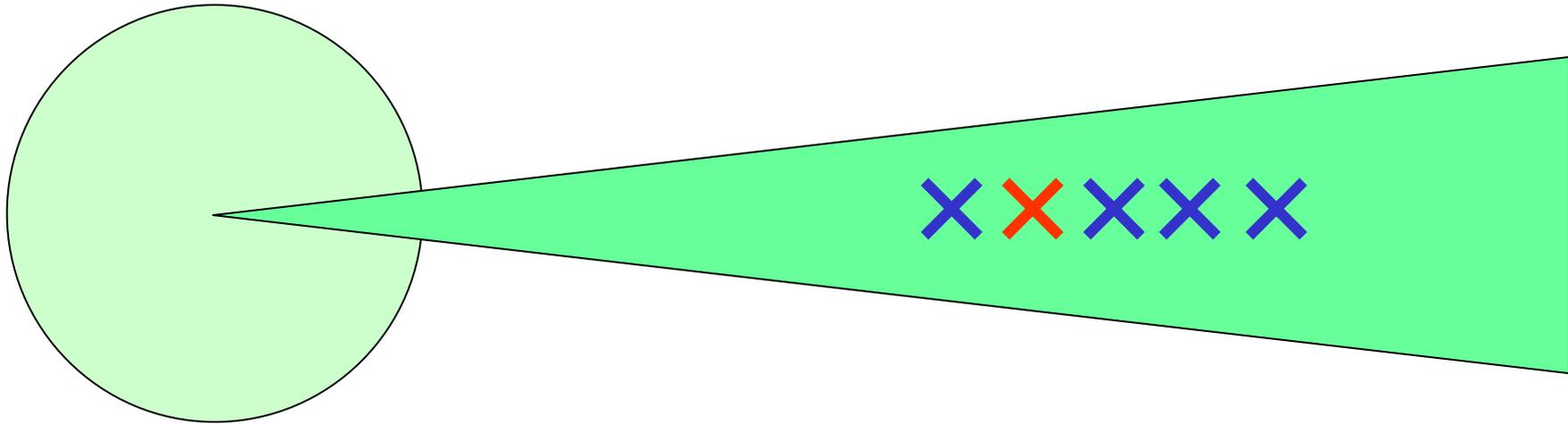
Franco Fuschini, 26/05/2008

# False Replies Unsynchronised In Time (FRUIT)

*Fruiting* = Ricezione da parte di un SSR di risposte ad interrogazioni effettuate da SSR differenti (in spazi aerei a copertura multipla)



# FRUITING - Effetti



- ⇒ Ricezione di risposte ad interrogazioni di altri SSR (il fenomeno è esaltato dalla presenza dei lobi secondari)
- ⇒ Risposte formalmente corrette
- ⇒ Risposte asincrone
- ⇒ Presentazione di tracce inesistenti

## FRUITING - Protezioni (1/2)

- ⇒ La probabilità di FRUIT aumenta al crescere del numero di aerei, del numero di interrogatori-ricevitori e del numero di interrogazioni -> può essere limitata riducendo al minimo il numero delle interrogazioni (*senza peggiorare le prestazioni del radar*);
- ⇒ Molto spesso le "false repliche" sono ricevute da un SSR "attraverso" i lobi secondari del diagramma di radiazione -> accorgimento di Side Lobe Suppression riduce anche il numero di FRUIT;

## FRUITING - Protezioni (2/2)

⇒ Le repliche asincrone possono essere "filtrate" controllandone il PRT in ricezione:

- a seconda del PRT del SSR, della velocità di rotazione dell'antenna e dell'ampiezza del lobo di radiazione, ogni aereo è soggetto ad un certo numero  $n_I$  di interrogazioni ogni volta che viene "puntato" dall'antenna del SSR (tipicamente  $n_I \sim 16$ );
- Il Transponder risponde a tutte le  $n_I$  interrogazioni e pertanto il "periodo di ripetizione delle risposte" è lo stesso periodo del segnale di interrogazione (e quindi pari a PRT)
- SSR differenti hanno PRT differenti → le "false repliche" possono essere riconosciute perchè si ripetono con un periodo differente dal PRT del SSR che le riceve
- circuiti di Defruiting: memorizzano tutte le risposte ricevute, le raggruppano in base al periodo di ripetizione ed eliminano tutte le risposte aventi un periodo  $\neq$  dal PRT del SSR

# SSR + PSR



# Le Risposte (1/2)

Serie di impulsi ciascuno della durata di  $0,45 \mu\text{sec}$

Durata della risposta =  $20,3 \mu\text{sec}$  ( la durata è costante)

Numero massimo di impulsi nella risposta = 14

1° e 14° impulso ( **impulsi parentesi -frame pulses** ) sempre presenti

Intervallo tra un impulso e l'altro =  $1,45 \mu\text{sec}$  o multipli interi

La risposta ad interrogazioni **Modo A** è il **CODICE** identificativo

La risposta ad interrogazioni **Modo C** è la **QUOTA**

Il **CODICE** di risposta è selezionato manualmente

Le risposte ad interrogazioni **Modo C** sono automatiche

Numero e posizione degli impulsi presenti nella risposta varia in funzione di:

⇒ Modo di interrogazione ( **A** o **C** )

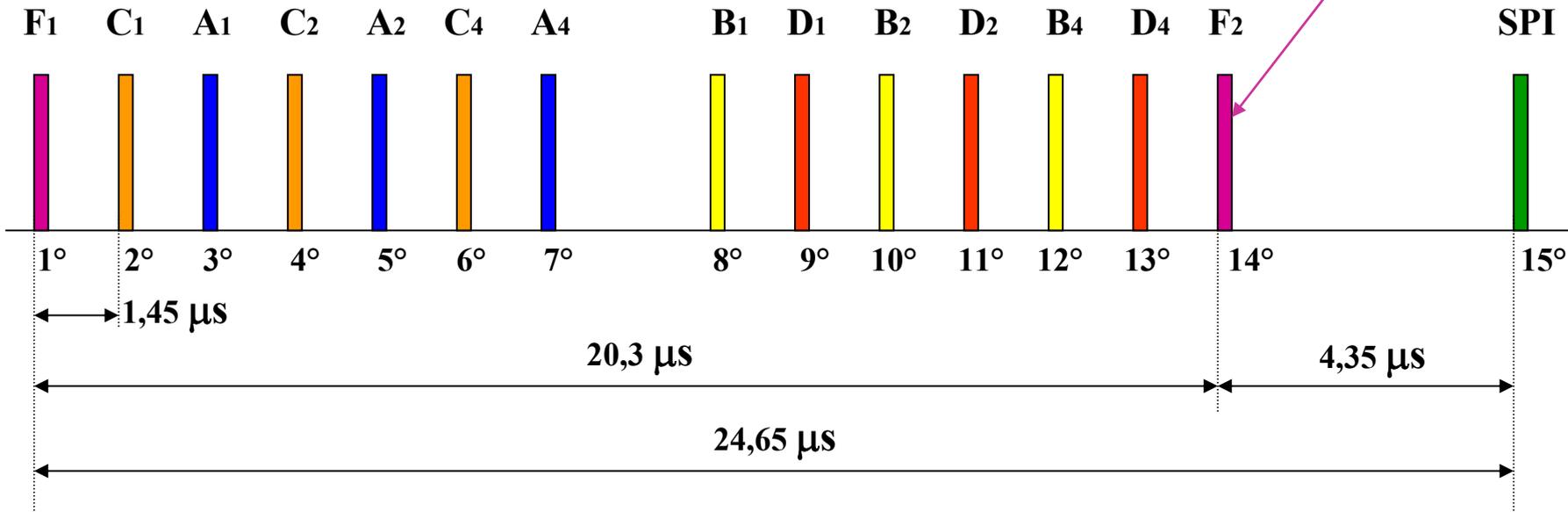
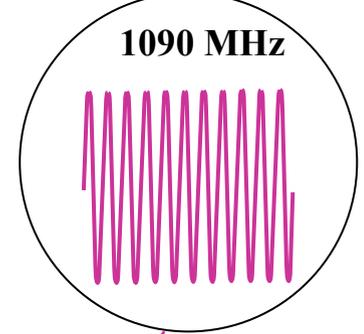
⇒ **Codice** di risposta selezionato o valore della **quota**

Possibilità di trasmettere un impulso speciale **SPI** (**Special Position Identification**)

**SPI** trasmesso  $4,35 \mu\text{sec}$  dopo il secondo **frame pulse**

La trasmissione dell'impulso **SPI** è attivata manualmente ed è ripetuta per un tempo compreso tra 15 e 30 secondi.

# Le Risposte (2/2)



## I CODICI

Codice SSR  $\Rightarrow$  Numero di 4 cifre espresse nel sistema numerico ottale  
(non possono essere usate le cifre 8 e 9)

# I Codici (1/2)

Regole per il calcolo del codice

Impulsi  $A_1, B_1, C_1, D_1$  valore associato 1 se presenti nella risposta, 0 se assenti

Impulsi  $A_2, B_2, C_2, D_2$  valore associato 2 se presenti nella risposta, 0 se assenti

Impulsi  $A_4, B_4, C_4, D_4$  valore associato 4 se presenti nella risposta, 0 se assenti

1^ cifra del codice identificativo somma dei valori associati agli impulsi **A**

2^ cifra del codice identificativo somma dei valori associati agli impulsi **B**

3^ cifra del codice identificativo somma dei valori associati agli impulsi **C**

4^ cifra del codice identificativo somma dei valori associati agli impulsi **D**

CODICI IDENTIFICATIVI DISPONIBILI = 4096 ( da 0000 a 7777 )

CODICI RISERVATI

⇒ 7500 *Hijack*

⇒ 7600 Radioavaria

⇒ 7700 Emergenza

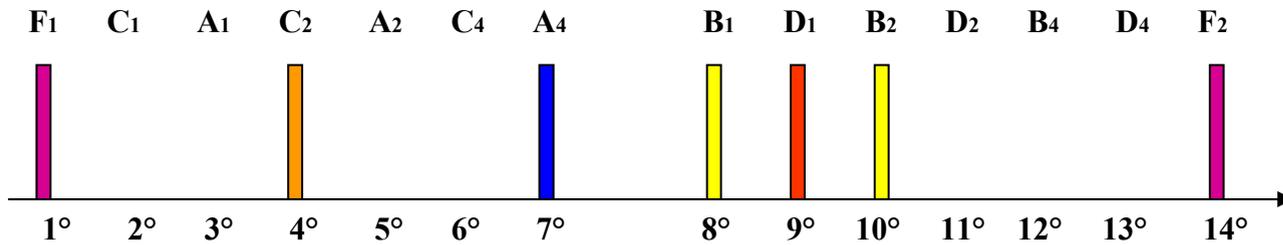
⇒ 0000 Scopi generali (Accordi regionali)

⇒ 2000 Nessuna istruzione ATC ricevuta per operare il transponde

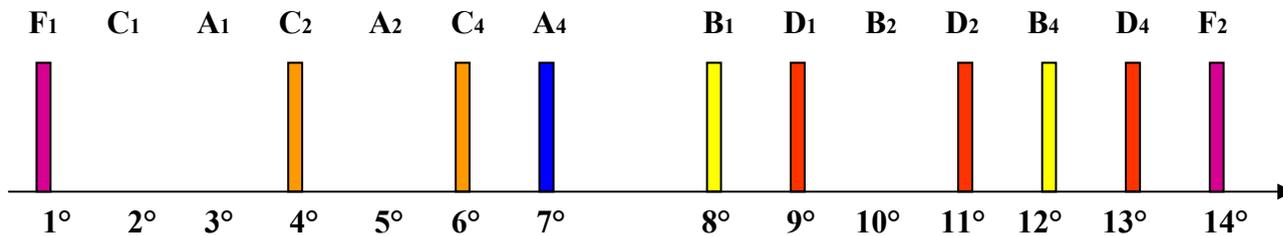


# I Codici (2/2)

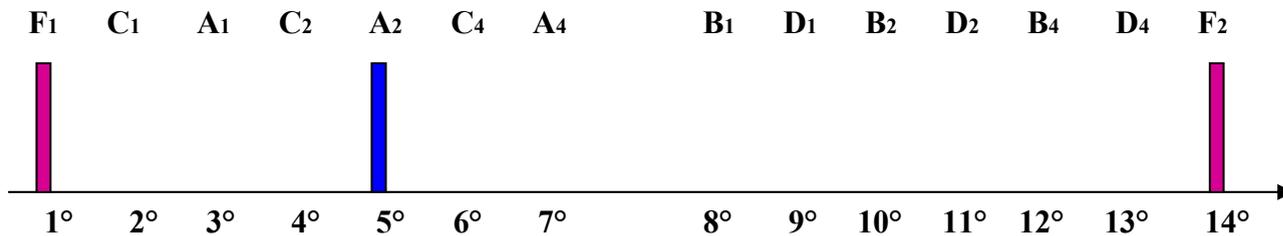
ESEMPI:



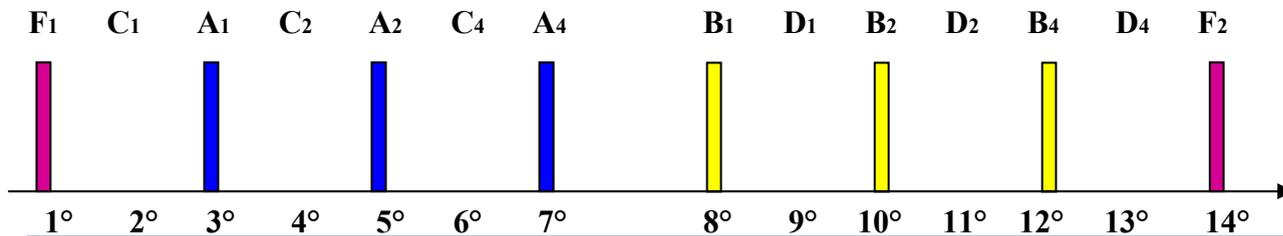
4321



4567



2000



7700

# SSR - La Quota (1/2)

Le informazioni di quota sono ricavate da un altimetro "**dedicato**" ed inviate ad un convertitore analogico-digitale (**codificatore**) che seleziona automaticamente la risposta in funzione della quota con incrementi/ decrementi di 100 feet nel campo -1000 +126.750 feet.

Sono necessarie solo 1278 differenti combinazioni (disponibili 4096) degli impulsi di risposta.

➤ L'abilitazione per la trasmissione automatica delle informazioni è effettuata dal pilota.

➤ Le informazioni di quota trasmesse sono **sempre** riferite alla pressione standard (**1013,25 hPa**).

➤ Le informazioni di quota trasmesse hanno una incertezza di **± 50 ft** ( es. nel range +9.950 e +10.050 ft, il valore della quota trasmesso nella risposta è sempre +10.000 ft.)

Al **controllore** le informazioni di quota sono presentate (*dato visualizzato nella label*):

➔ direttamente dopo la decodifica **dal livello di transizione (TL) in su**

➔ corrette per riferirle alla pressione al livello del mare (QNH) della zona interessata **al di sotto del TL**.



# SSR - Codifica della Quota

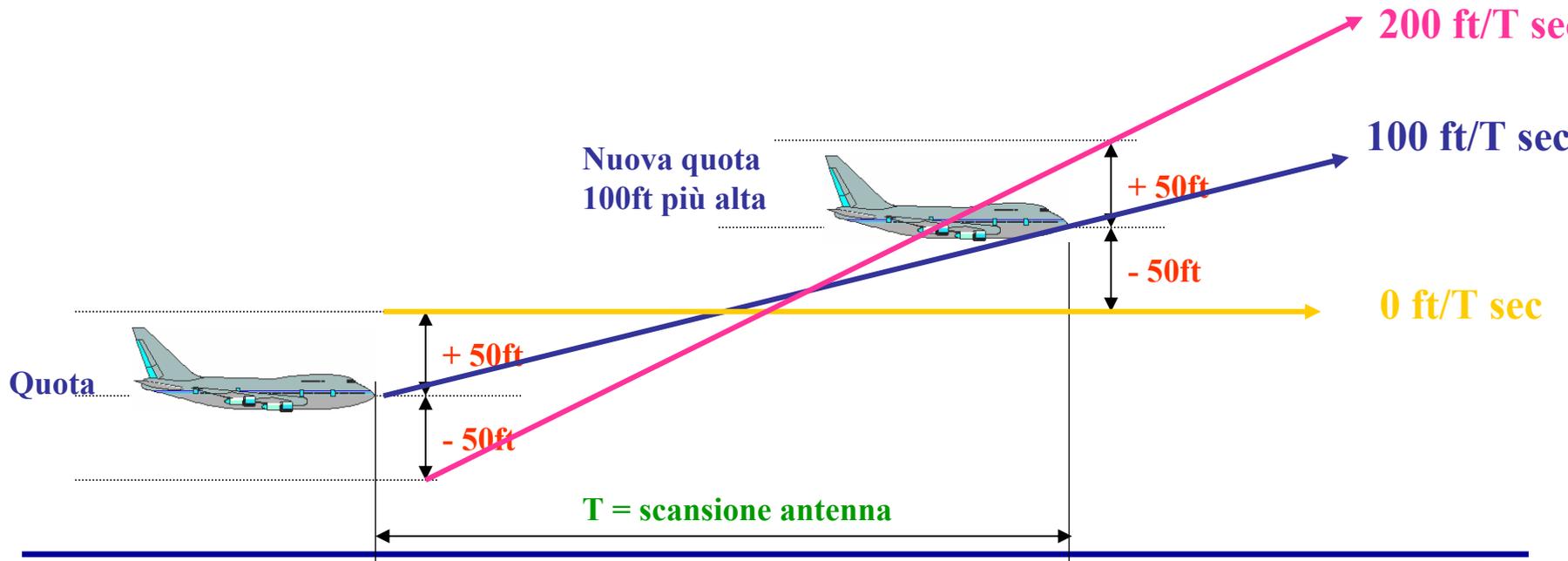
Per la trasmissione dei dati di quota sono utilizzati gli impulsi **A** e **B**, degli impulsi **C** almeno uno è sempre presente ma **C1** e **C4** non compaiono mai insieme nella stessa risposta, l'impulso **D1** non è mai usato.

RANGE	PULSE POSITIONS										
	(0 or 1 in a pulse positions denotes absence or presence of a pulse, respectively)										
INCREMENTS (Feets)	D <sub>2</sub>	D <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>4</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>
9750 to 9850	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
9850 to 9950	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1
9950 to 10050	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0
10050 to 10150	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
10150 to 10250	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
10250 to 10350	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
10350 to 10450	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
10450 to 10550	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
10550 to 10650	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
10650 to 10750	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1

# Incertezza nella Codifica della Quota

Le informazioni di quota fornite dall'SSR sono codificate in incrementi di 100ft e hanno un'incertezza di  $\pm 50$  ft, mentre gli altimetri degli aerei moderni hanno generalmente maggiore precisione e risoluzione.

La codifica con incrementi di 100 ft è sufficientemente accurata per poter essere visualizzata nella **label** associata all'aereo e presentata al controllore ma è piuttosto grossolana se si vuole determinare con precisione il rateo verticale.



# Interrogazioni Interallacciate

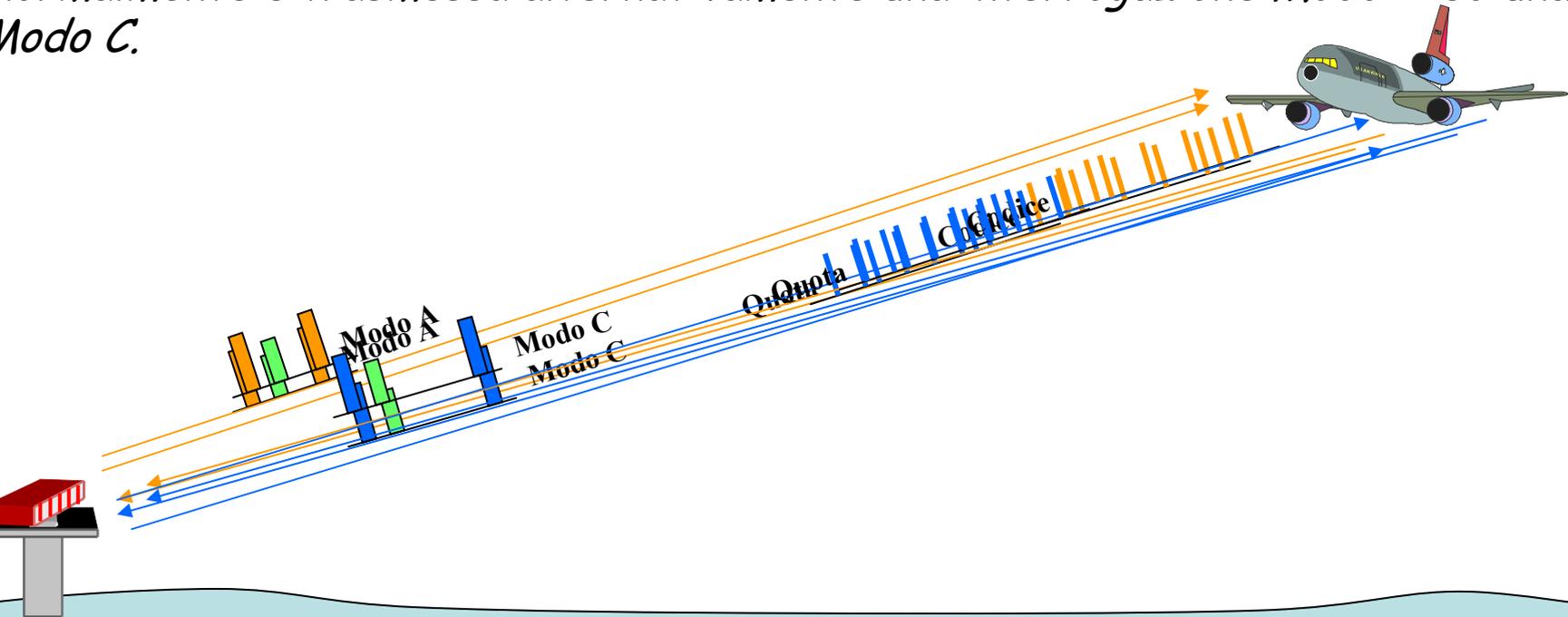
L'SSR è in grado di effettuare una interrogazione alla volta.

Le interrogazioni Modo A consentono di ottenere in risposta il Codice identificativo, quelle Modo C la quota dell'aereo.

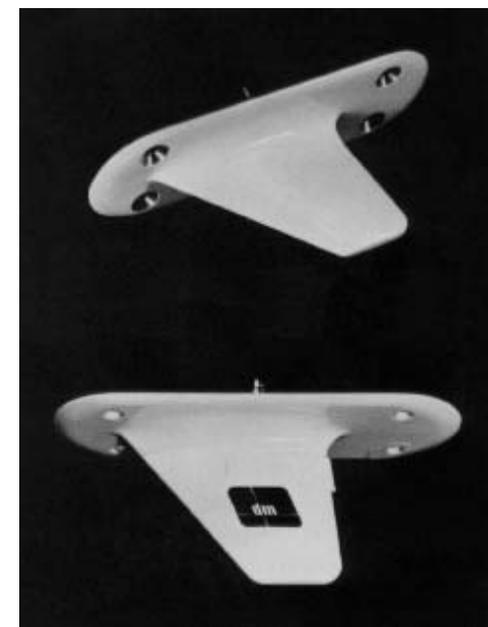
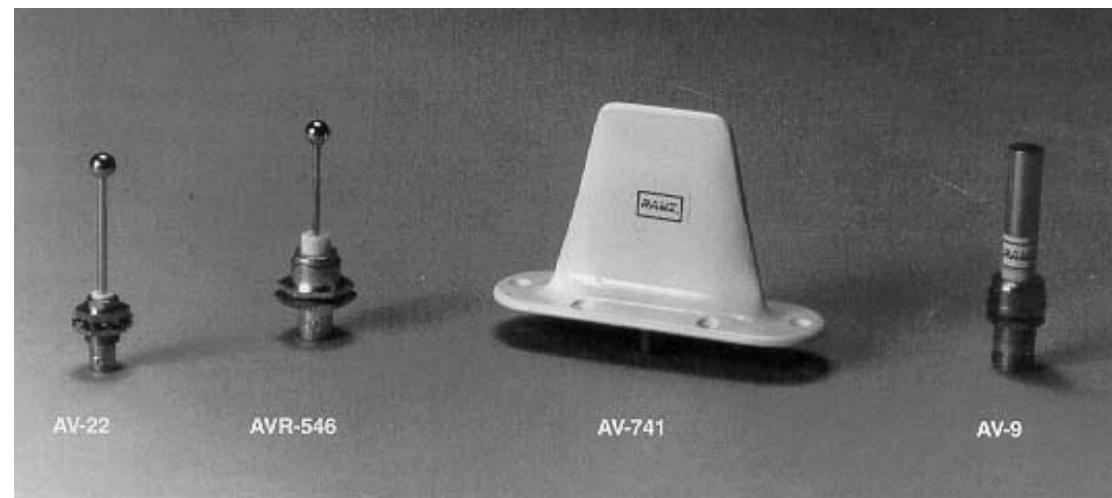
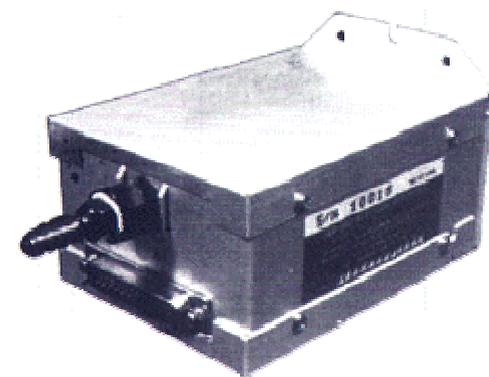
**ESIGENZE ATC** ⇒ conoscere il codice e la quota dell'aereo ad ogni rotazione dell'antenna

**LA SOLUZIONE** ⇒ interrogazioni interlacciate

L'interrogazione interlacciata alterna ciclicamente interrogazioni **Modo A** e **Modo C**.  
Normalmente è trasmessa alternativamente una interrogazione Modo A ed una Modo C.



# L'Apparato di Bordo (1/2)



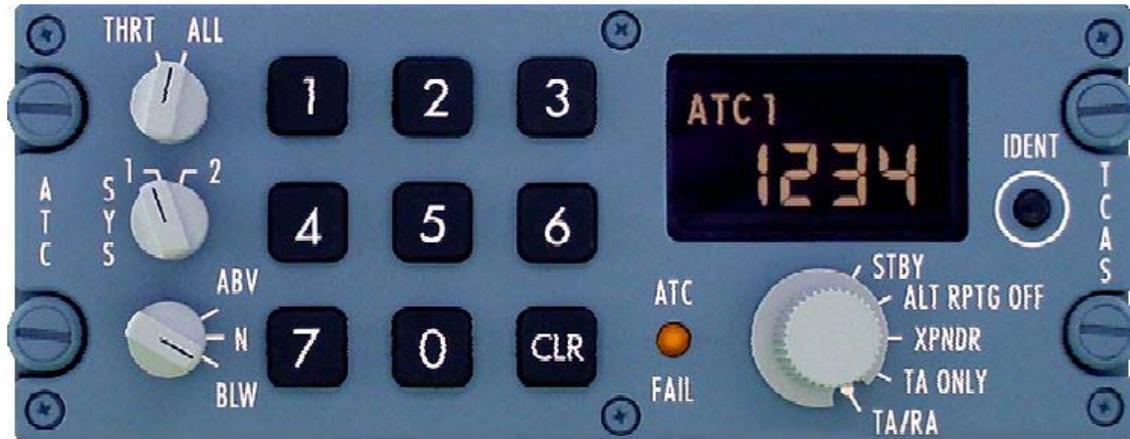
# L'Apparato di Bordo (2/2)

Versione compatta



BLIND ENCODER

# L'Apparato di Bordo - Pannello di controllo



# L'Apparato di Bordo - il Ricevitore

Il ricevitore di bordo analizza l'ampiezza e la durata degli impulsi ricevuti ed abilita la replica dopo aver effettuato i seguenti controlli:

- ✓ ampiezze di  $P_1$  e  $P_3$  non devono differire tra loro di più del 12%
- ✓ durata degli impulsi  $P_1, P_2, P_3 = 0,8 \pm 0,1 \mu\text{sec}$
- ✓ nessun impulso ricevuto nell'intervallo  $1,3 - 2,7 \mu\text{sec}$  dopo  $P_1$  o l'ampiezza di  $P_1$  di almeno 2,8 (9dB) volte maggiore di  $P_2$
- ✓ ampiezza di  $P_1, P_2, P_3$  almeno 3,2 volte (10 db) maggiore di quella di eventuali impulsi spuri ricevuti durante l'interrogazione
- ✓ l'intervallo di tempo tra  $P_1$  e  $P_3$  quello previsto per il Modo  $\pm 1 \mu\text{sec}$

Riconosciuta valida una interrogazione, il Transponder non risponde ad eventuali altre interrogazioni per un intervallo di tempo compreso tra la durata della risposta stessa e non più di  $45 \mu\text{sec}$  dall'ultimo impulso della risposta (**dead time**).

**NOTA:** Transponder di vecchia generazione avevano un "dead time" di  $125 \mu\text{sec}$

Il ricevitore, se riconosce che una interrogazione proviene dai lobi secondari, si disattiva per un tempo di  $35 \pm 10 \mu\text{sec}$ .

# L'Apparato di Bordo - il Trasmettitore

Frequenza di trasmissione 1090 MHz  $\pm$  3 MHz

Polarizzazione verticale

Potenza di trasmissione 120 - 500 W

Durata impulsi 0,45  $\pm$  0,1  $\mu$ sec

Tolleranza di separazione tra gli impulsi  $\pm$  0,1  $\mu$ sec

Capacità di 1200 repliche al secondo

## L'Apparato di Bordo - L'Antenna

L'antenna o il sistema di antenne di bordo deve avere *copertura omnidirezionale nel piano orizzontale e di almeno  $\pm 40^\circ$  nel piano verticale.*

*Per evitare angoli morti in copertura si usano due o più antenne con selezione automatica di quella con la migliore ricezione (analisi della qualità degli impulsi ricevuti).*

# L'Apparato di Terra - il Trasmettitore

Frequenza di trasmissione  $1030 \text{ MHz} \pm 0.2 \text{ MHz}$

Polarizzazione verticale

Potenza di trasmissione  $P_1/P_3 : 0,5 - 1,5 \text{ kW}$

Potenza di trasmissione  $P_2 : 0,5 - 9 \text{ kW}$

Ampiezza relativa di  $P_2 : >$  di  $P_1$  irradiato dal massimo lobo secondario  
< 9dB di  $P_1$  irradiato dal lobo principale

Durata impulsi :  $0,8 \pm 0,1 \mu\text{sec}$

Tolleranza di separazione tra  $P_1$  e  $P_3 : \pm 0,2 \mu\text{sec}$

Separazione tra  $P_1$  e  $P_2 : 2 \pm 0,15 \mu\text{sec}$

Capacità di 450 interrogazioni al secondo ( Max. PRF = 450)

# L'Apparato di Terra - il Ricevitore

**Frequenza di ricezione  $1090 \text{ MHz} \pm 3 \text{ MHz}$**

STC per ridurre segnali indesiderati a breve distanza

Durata impulsi:  $0,45 \pm 0,1 \mu\text{sec}$

Filtraggio degli impulsi del radar primario

**Circuiti di defruiting**

**Circuiti di degarbling**

**II RICEVITORE** del radar SSR deve:

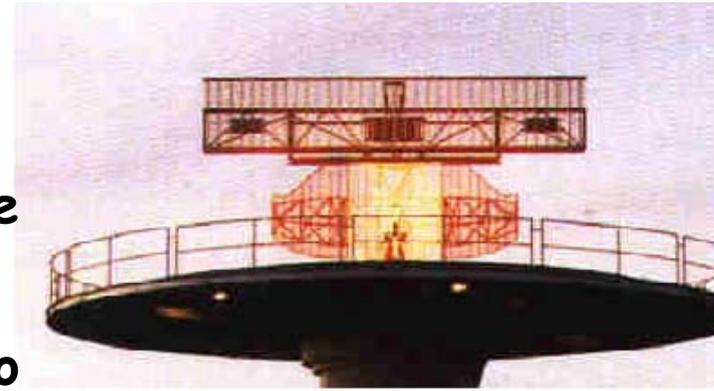
- Rilevare gli impulsi della risposta (impulsi singoli a Freq. 1090MHz)
- Demodulare gli impulsi SSR (controllo della durata e degli intervalli tra gli impulsi)
- Riconoscere gli impulsi parentesi
- Estrarre l'informazione (codice o quota)

# L'Apparato di Terra - L'Antenna (1/3)



# L'Apparato di Terra - L'Antenna (2/3)

- ◇ Coubicata e corotante con quella del radar primario
- ◇ Polarizzazione verticale
- ◇ Larghezza del fascio nel piano verticale :  $45^\circ - 55^\circ$
- ◇ Larghezza del fascio nel piano orizzontale :  $2^\circ - 4^\circ$

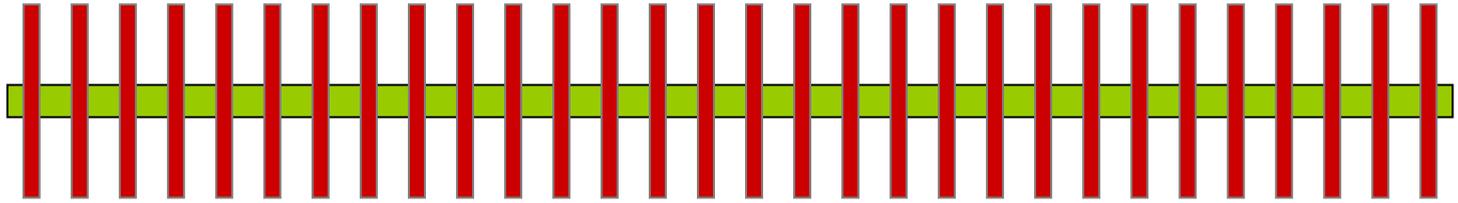


L'antenna SSR è generalmente costituita da una serie di singoli elementi disposti a schiera ("linear array") ed alimentati da una rete di distribuzione del segnale posta posteriormente.

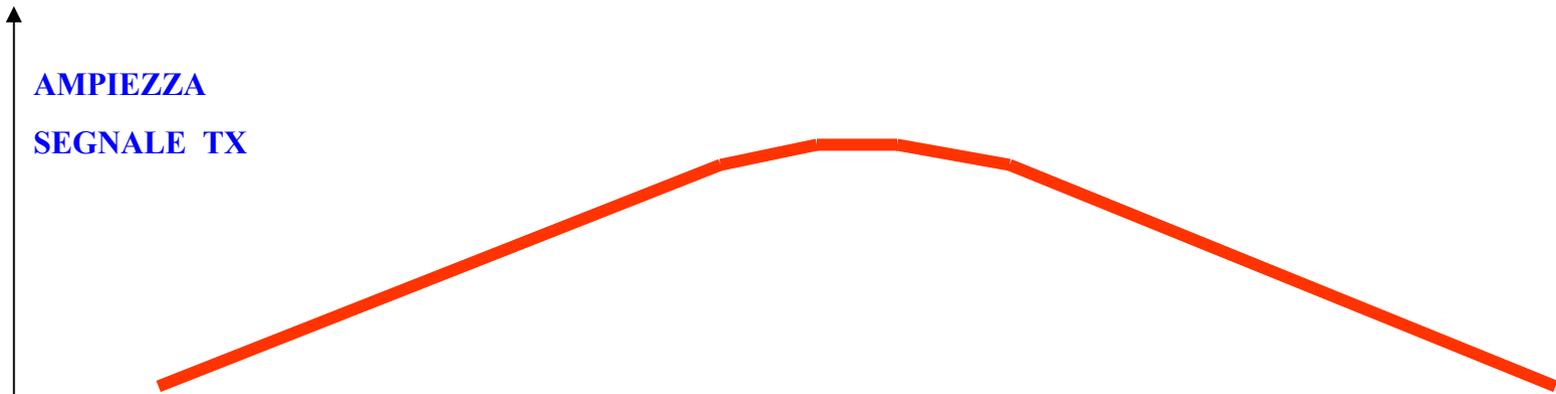
La potenza inviata a ciascun elemento non è costante lungo la lunghezza dell'antenna; normalmente ha i valori massimi per gli elementi centrali e diminuisce verso gli elementi terminali allo scopo di ottenere la direttività prevista e ridurre i livelli dei lobi secondari.

La lunghezza tipica di un'antenna SSR utilizzata in ATC è di circa 8 metri.

# L'Apparato di Terra - L'Antenna (3/3)



**DISTRIBUZIONE del SEGNALE ai SINGOLI ELEMENTI**



# RADAR PRIMARIO + RADAR SECONDARIO

Nel CTA sono utilizzate informazioni di posizione degli aerei ottenute da **PSR** e **SSR** normalmente combinate. Le informazioni provenienti dai due sensori devono essere integrate sullo schermo della CWP per fornire una posizione **univoca** dell'aereo.

I due sensori radar per ottenere i dati di distanza utilizzano la stessa tecnica.

## RADAR PRIMARIO

Distanza dell'aereo  $\Rightarrow D = c \cdot T_{PSR}/2$

## RADAR SECONDARIO

Distanza dell'aereo  $\Rightarrow D = c \cdot T_{SSR}/2$

Dove:

$T_{PSR}$  = tempo dalla trasmissione dell'impulso alla ricezione del segnale d'eco.

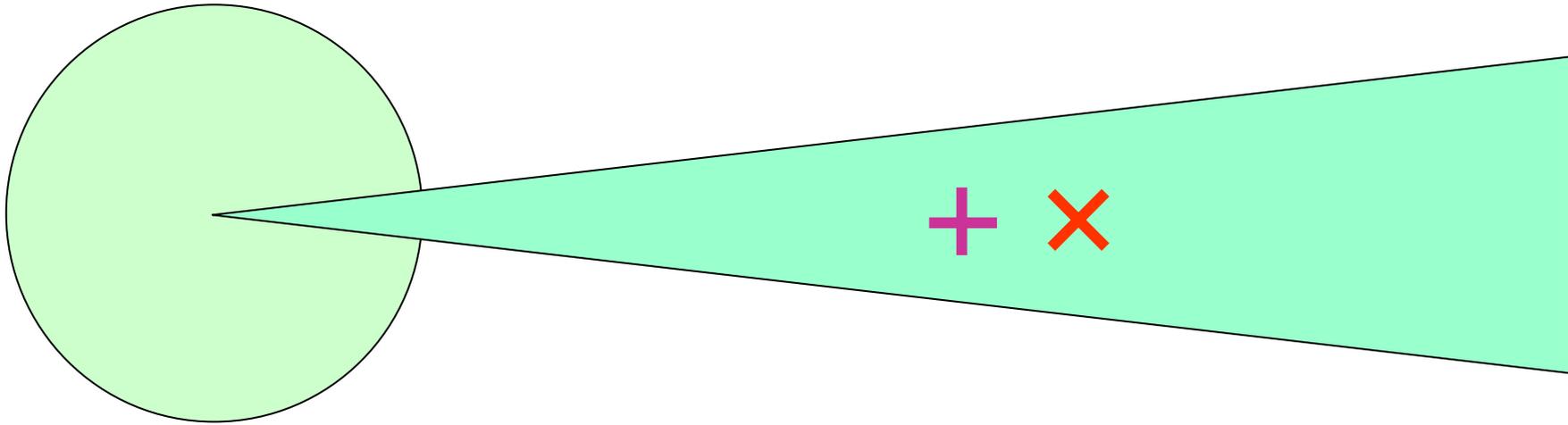
$T_{SSR}$  = tempo dalla trasmissione dell'interrogazione alla ricezione della risposta.

Per il diverso meccanismo di funzionamento del **PSR** e dell'**SSR**:

$$T_{SSR} \neq T_{PSR}$$

# RADAR PRIMARIO + RADAR SECONDARIO

## IL RISULTATO



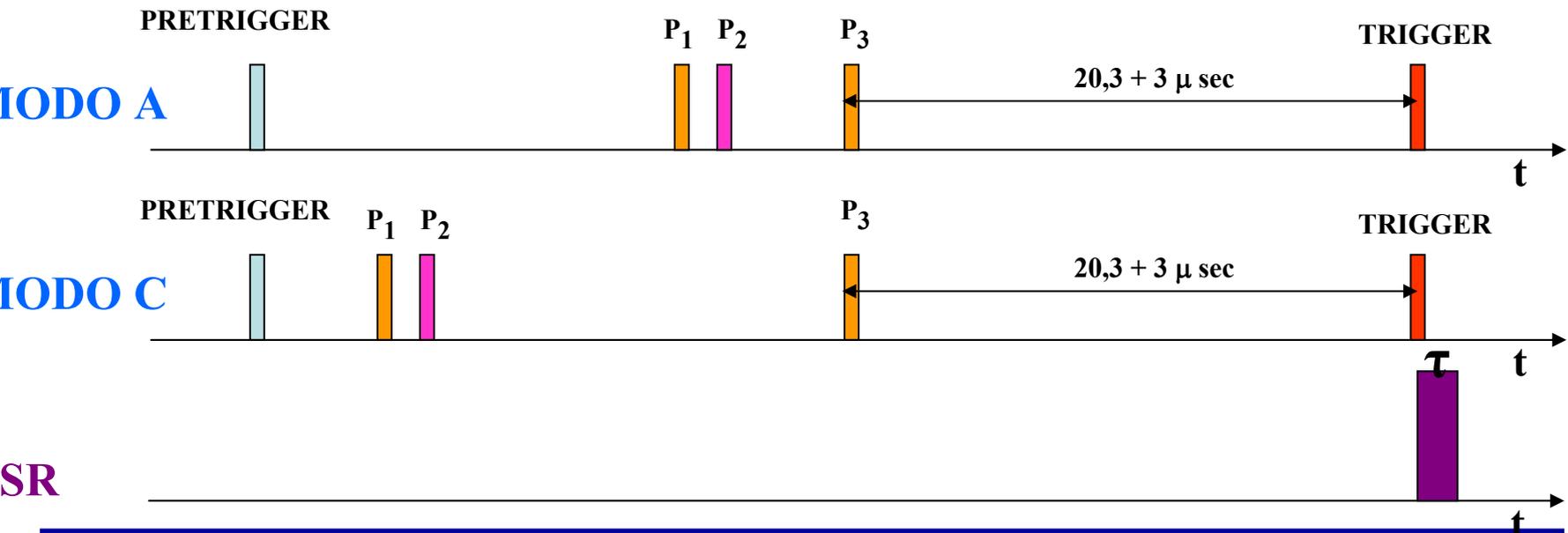
## LA SOLUZIONE

Anticipare la trasmissione dell'interrogazione del radar secondario rispetto alla trasmissione dell'impulso del radar primario.

# RADAR PRIMARIO + RADAR SECONDARIO

Per presentare sull'indicatore le tracce del radar primario e secondario coincidenti l'SSR viene sincronizzato da un impulso di "pretrigger" il cui anticipo rispetto al trigger del radar primario deve essere calcolato considerando:

- ⇒ la durata dell'interrogazione
- ⇒ il tempo di ritardo del transponder nell'elaborare l'interrogazione e predisporre la risposta
- ⇒ la durata della risposta
- ⇒ il ritardo del radar nell'elaborazione della risposta.



# SSR vs PSR

👍 **Minor potenze in trasmissione ( kW vs MW )**

PSR: Potenza Ricevuta proporzionale a  $1/r^4$

SSR: Potenza Ricevuta proporzionale a  $1/r^2$

👍 **Informazioni aggiuntive ( identificativo )**

👍 **Nessun problema di clutter**

Up-link Down-link utilizzano frequenze diverse (1030 / 1090 Mhz) -> eventuali repliche in ricezione del segnale di interrogazione (1030) non degradano la ricezione della risposta (1090)

👍 **3D (distanza, azimut, quota)**

👎 **Garbling e Fruiting**

👎 **Necessaria la presenza a bordo del transponder**

👎 **Necessaria l'efficienza del transponder**

👎 **Peggior risoluzione in distanza**

👎 **Minor precisione in azimut**

**SSR**  
**Monopulse**