

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA  
FACOLTA' DI INGEGNERIA

*Corso di Laurea Specialistica in  
Ingegneria delle Telecomunicazioni  
Elaborazione del Segnale e Telerilevamento*



*tesi di laurea*

USO DI CODICI IN RETI RADAR E  
INTERFERENZA CROSS-CANALE

*candidato:*

PIETRO STINCO

*relatori:*

PROF.SSA MARIA GRECO

PROF. FULVIO GINI

PROF. LUCIOVERRAZZANI

Anno Accademico 2006/2007



## ***Introduzione***

C'è chi dice che la prima frase di un testo è quella più importante e più difficile da scrivere in quanto è quella che colpisce il lettore e c'è chi, come me in questo momento, che cerca di aggirare il problema.

Col rapido sviluppo della *sensor fusion technology*, utilizzare una rete di radar sta diventando una tendenza nel progetto di sistemi ad alte prestazioni. Attraverso la fusione dati le prestazioni di un sistema radar possono essere significativamente migliorate. Tuttavia, per evitare interferenza, i segnali trasmessi dai singoli radar della rete devono essere tra loro ortogonali. Gli argomenti trattati nella prima parte della tesi riguardano appunto la sintesi di gruppi di forma d'onda che, oltre ad essere ad alta risoluzione, risultano tra loro ortogonali, al fine di garantire la coesistenza di più sensori attivi nello stesso scenario. Nella seconda parte della tesi si analizzeranno invece, attraverso dei risultati ottenuti tramite simulazione, le prestazioni che si ottengono quando due radar che lavorano nello stesso scenario usano o meno impulsi trasmessi tra loro ortogonali.

Nel capitolo uno verrà introdotta e definita la *Funzione di Ambiguità*, uno strumento analitico utile per l'analisi e la sintesi di forme d'onda e ne verrà calcolato l'andamento per i più comuni modelli di segnale trasmessi dai radar. Come sarà più chiaro durante la trattazione, l'andamento ideale della Funzione di Ambiguità è quello il più simile possibile ad una delta di Dirac centrata nel piano Doppler-delay e, come noto, per ottenere una tale Funzione di Ambiguità occorre effettuare una compressione di impulso attraverso una modulazione di fase o di frequenza. Nel capitolo due verranno definite e descritte le *Frequency-Coded Waveform (FCW)* ovvero delle particolari forme d'onda che, attraverso una modulazione di frequenza effettuata attraverso l'utilizzo di un codice (o sequenza), riescono ad avere delle Funzioni di Ambiguità quasi ideali. Verrà descritto il modello del segnale e verranno definiti gli strumenti analitici, come il *placement operators*, il *placement difference*, l'*array geometrico* e la *matrice dei lobi*, o *matrice degli hits*, che si utilizzano per l'analisi e la sintesi di codici per segnali *FCW*. Verranno successivamente descritte le sequenze di *Costas* comunemente usate poiché generano segnali *FCW* con Funzione di Ambiguità avente *SLL (Side Lobe Level)* pari ad  $1/N$ , con  $N$  dimensione del codice. Si tratteranno successivamente le sequenze *Pushing* che vengono utilizzate per allontanare i picchi dei lobi secondari della Funzione di Ambiguità dall'origine del piano Doppler-delay e verrà descritta la *codifica di Lee* per la sintesi di tali codici. Oltre alla sintesi di segnali con ottime proprietà della Funzione di Ambiguità, la scelta

dei codici per segnali *FCW* può essere indirizzata alla sintesi di un insieme di segnali *FCW* che, oltre ad avere delle buone proprietà dal punto di vista della funzione dei auto-ambiguità, presentano delle buone proprietà dal punto di vista della funzione di cross-ambiguità, ovvero i segnali *FCW* sintetizzati, oltre ad essere ad alta risoluzione, risultano tra loro quasi ortogonali per ogni scostamento in Doppler o in delay. Gruppi di segnali che godono di questa proprietà risultano particolarmente utili in uno scenario di lavoro dove coesistono due o più radar. Verrà quindi introdotto un algoritmo numerico (*Simulated Annealing SA*) di sintesi di segnali *FCW* ortogonali ed ad alta risoluzione che però presenta un enorme carico computazionale e verranno successivamente descritti dei metodi algebrici per la sintesi di segnali *FCW* che presentano un ottimo compromesso tra risoluzione, ortogonalità e semplicità di sintesi, ci concentreremo in particolare sui codici *EQC* (*Extended Quadratic Congruences*).

Una volta descritto il modello del segnale trasmesso, nel capitolo tre verrà trattato il modello di antenna *Phased Array* utilizzato nel sistema radar che si è implementato nelle simulazioni. Il modello d'antenna si ispira a quella del radar multifunzione *EMPAR* (*European Multifunction Phased Array Radar*) che è caratterizzata dalla presenza di quattro canali, uno *somma*, due *differenza* ed uno *doppia differenza*. Nel capitolo quattro verrà descritto il modello di ricevitore adattato al segnale *FCW* utilizzato dal radar e verrà descritto il modello di segnale in uscita dai filtri adattati, uno per ogni canale dell'antenna, fissata la cella di risoluzione in distanza. Il modello del segnale, oltre al rumore additivo gaussiano bianco *AWGN*, prevede anche la presenza di un interferente, ovvero di un segnale *FCW* trasmesso da un altro radar interferente e ricevuto dal radar in esame. Si è modellato sia il campione in uscita dal filtro adattato nel caso *single pulse*, sia la sequenza di campioni che si hanno in uscita dal filtro adattato durante il *Time on Target (ToT)*, ovvero nell'intervallo di tempo durante il quale il radar insiste sul bersaglio. Una volta modellato il modello di segnale in uscita dal filtro adattato fissata la cella di risoluzione in distanza, nel capitolo cinque verranno descritti le tecniche *Monopulse-oneshot*, *Monopulse-multishot* e *Two-Channel AML* di stima della direzione d'arrivo (*DOA*) dell'eco ricevuto. Gli stimatori che analizzati nascono tutti da un modello di segnale che non prevede la presenza di un radar interferente e, attraverso delle simulazioni, ne valuteremo le prestazioni, in termini di *RMSE* (*Root Mean Square Error*) e di  $P_P$  (Probabilità di Perdita), anche in presenza dell'interferente. Come prevedibile, le prestazioni degradano consistentemente al crescere della potenza del segnale interferente rispetto alla potenza del segnale utile ricevuto, ma sono fortemente legate al valore del rapporto  $C/A$ , ovvero il rapporto tra il valore in modulo della funzione di cross-ambiguità tra

segnale trasmesso ed interferente all'istante di campionamento  $C$  ed il valore in modulo della funzione di auto-ambiguità del segnale trasmesso all'istante di campionamento.

Quando il segnale interferente può essere controllato, come nel caso di due radar che lavorano nello stesso scenario, un metodo furbo per ottenere dei valori bassi del  $RMSE$  e della  $P_P$  è proprio quello di sintetizzare i due segnali interferenti in modo da ottenere dei rapporti  $C/A$  il più possibile tendenti a zero piuttosto di sintetizzare uno stimatore partendo da un modello di segnale che prevede la presenza dell'interferente. Si vedrà quindi come i segnali *EQC-FCW* descritti nel capitolo due, oltre ad essere dei segnali ad alta risoluzione, riescono a risolvere questo problema. Infine nell'Appendice verrà calcolato il limite di Cramér-Rao della stima della  $DOA$  per completezza e per un ulteriore confronto tra gli stimatori descritti nel capitolo cinque.

Resta infine il piacevole momento dei ringraziamenti e dei saluti, desidero ringraziare innanzi tutto la professoressa Greco per i continui suggerimenti, per la straordinaria pazienza, simpatia e disponibilità e per tutte le opportunità che mi ha offerto in questi mesi di collaborazione. Volevo ringraziare anche i ragazzi del laboratorio di *Elaborazione del Segnale* che in maniera divertente e disponibile sono stati di grande aiuto. Un enorme grazie va anche a Giacomina, la mia amatissima *Naca*, non solo per la creazione delle immagini del Phased Array ma anche e soprattutto per avermi sopportato e per aver mostrato interesse, anche se palesemente finto, per gli argomenti della mia tesi, lontani anni luce dal suo straordinario mondo. Un bacio enorme alla mia straordinaria famiglia, a Mamma, la mia *manager*, e Papà, il mio *psicoterapeuta*, per i continui incoraggiamenti e l'infinito supporto, ai miei due fratelli Francesco e Maurizio, per avermi sopportato ogni giorno ed ogni notte, alla mia super-super sorellina Mariangela per le enormi soddisfazioni e gioie che mi dà, ed al quasi fratello, ma cugino, Enrico, a cui piace la trigonometria, per avermi distratto con la sua chitarra. Un bacio dal profondo del cuore va anche ai nonni, Ciccio, Maria, Pietro e Lina, che mi hanno aiutato e sostenuto sia da qui che da là, allo straordinario ed inimitabile gruppo di amici che mi ritrovo ed infine a Cesare, quella straordinaria fonte di energia pura di nipotino che adoro.

# INDICE

## Capitolo 1

### Funzione di Ambiguità

1.1 Introduzione	Pag. 1
1.2 Funzione di Ambiguità di un impulso rettangolare	Pag. 3
1.3 Funzione di Ambiguità di un treno di impulsi rettangolari	Pag. 7
1.4 Funzione di Ambiguità dell'impulso di Barker	Pag. 11

## Capitolo 2

### Frequency Coded Waveform

2.1 Introduzione	Pag. 16
2.2 Costas Sequences	Pag. 18
2.3 Pushing Sequences	Pag. 21
2.3.1 Definizioni e proprietà	Pag. 21
2.3.2 Sintesi di sequenze pushing	Pag. 25
2.3.3 Distribuzione dei lobi laterali di una sequenza Lee-pushing	Pag. 30
2.3.4 Pattern degli hit	Pag. 31
2.3.5 Posizione dei picchi dei lobi	Pag. 31
2.3.6 Livello dei lobi	Pag. 33
2.4 Frequency-Coded Waveform per Netted Radar Systems	Pag. 33
2.4.1 Sintesi di Frequency-Coded Waveform attraverso Simulated Annealing	Pag. 34
2.5 Extended Quadratic Congruences per FCW	Pag. 43
2.5.1 Funzione <i>placement difference</i>	Pag. 47
2.5.2 Limite superiore delle funzioni di auto e cross ambiguità per segnali FCW	Pag. 49
2.5.3 Limite superiore della funzione di auto-ambiguità periodica per segnali EQC	Pag. 53
2.5.4 Limite superiore della funzione di cross-ambiguità periodica per segnali EQC	Pag. 55
2.5.5 Sottoinsiemi di codici EQC	Pag. 55
2.6 Altre famiglie di Congruence Codes	Pag. 62

## **Capitolo 3**

### **Antenna “Phased Array”**

<b>3.1 Introduzione</b>	<b>Pag. 66</b>
<b>3.2 Antenna monodimensionale</b>	<b>Pag. 67</b>
<b>3.3 Antenna bidimensionale</b>	<b>Pag. 72</b>

## **Capitolo 4**

### **Ricevitore FCW**

<b>4.1 Schema del ricevitore e modello del segnale</b>	<b>Pag. 79</b>
<b>4.2 Campioni in uscita dal filtro adattato per un treno di impulsi</b>	<b>Pag. 90</b>

## **Capitolo 5**

### **Stima della direzione di arrivo (*DOA*) in presenza di interferenti**

<b>5.1 Introduzione</b>	<b>Pag. 92</b>
<b>5.2 <i>RMSE</i> e <i>P<sub>p</sub></i> per monopulse-oneshot</b>	<b>Pag. 99</b>
<b>5.3 Monopulse multi-shot</b>	<b>Pag.105</b>
<b>5.4 Stimatore Two-Channel <i>AML</i></b>	<b>Pag.134</b>
<b>5.5 Scelta del codice</b>	<b>Pag.161</b>

## **Appendice**

### **Limite di Cramér-Rao per la stima della *DOA***

<b>A.1 Introduzione</b>	<b>Pag.167</b>
<b>A.2 Limite di Cramér-Rao per <math>\alpha</math> e <math>\beta</math> deterministici</b>	<b>Pag.173</b>
<b>A.3 Limite di Cramér-Rao per <math>\alpha</math> e <math>\beta</math> aleatori</b>	<b>Pag.177</b>
<b>A.4 Prestazioni degli stimatori <i>AML</i> e <i>Monopulse</i></b>	<b>Pag.183</b>
A.4.1 Caso Condizionato	Pag.183
A.4.2 Caso Non Condizionato	Pag.187