
Integrazione coerente

Parte 2

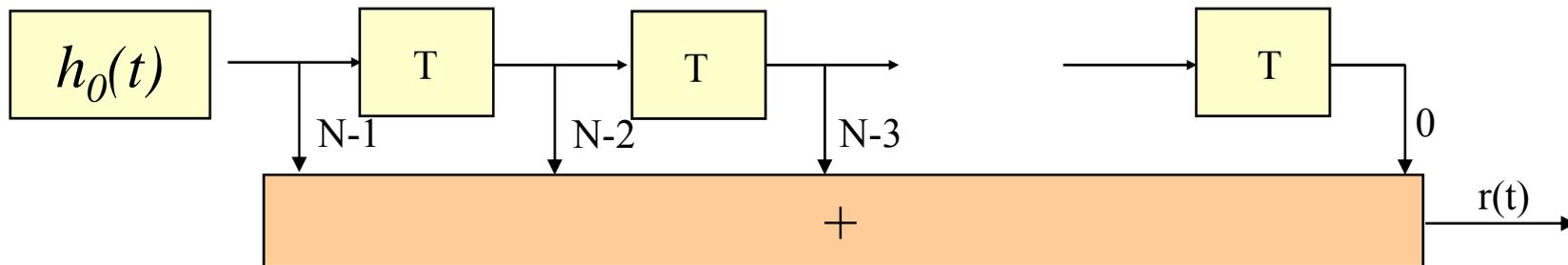
Pierfrancesco Lombardo

Filtro adattato alla sequenza (I)

$$s_{0N}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_0(t - n \cdot T) \quad \Downarrow \quad s_0(t) = \frac{1}{\sqrt{\tau_p}} e^{j\phi(t)} \text{rect}_{\tau_p} \left(t - \frac{\tau_p}{2} \right)$$

$$h(t) = s_{0N}^*[(N-1)T + \tau - t] = \sum_{n=0}^{N-1} s_0^*[(N-1)T + \tau - t - n \cdot T]$$

$$h(t) = s_0^*[\tau_p - t] * \sum_{n=0}^{N-1} \delta[t - (N-1-n)T] = h_0(t) * \sum_{n=0}^{N-1} \delta[t - (N-1-n)T]$$

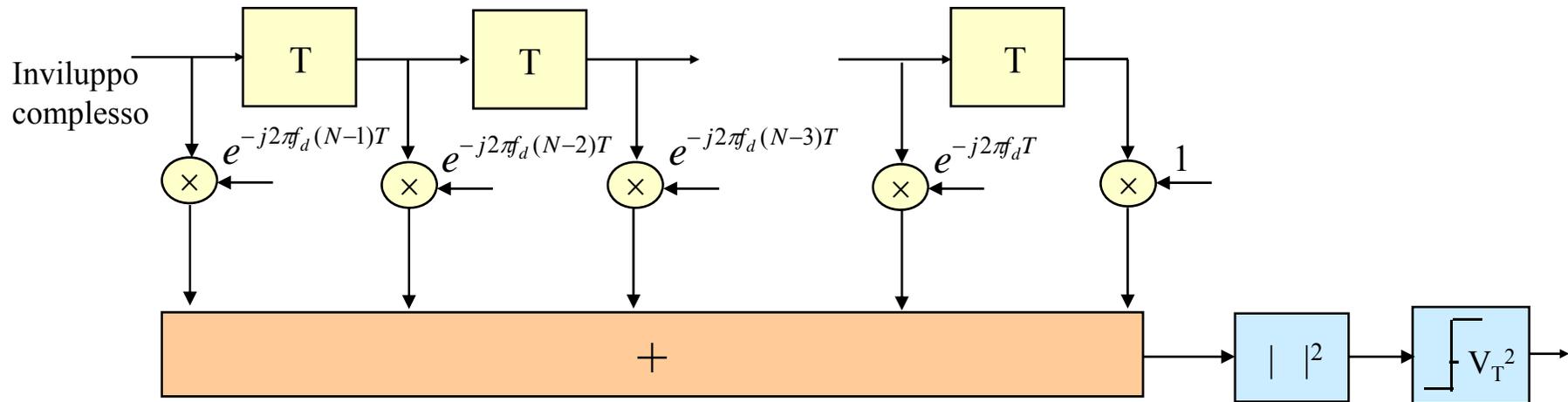


$$h_0(t) = s_0^*(\tau_p - t) = \frac{1}{\sqrt{\tau_p}} e^{-j\phi(\tau_p - t)} \text{rect}_{\tau_p} \left(\frac{\tau_p}{2} - t \right)$$

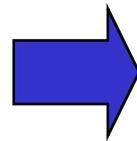
Sistemi Radar

Filtro adattato alla sequenza (V)

Per poter operare coerentemente è necessario riallineare in fase i ritorni cioè considerare lo schema (filtro):



frequenza Doppler f_d
del bersaglio incognita



- Si considera un insieme discreto di valori della frequenza Doppler e si compensano i valori selezionati

Insieme dei valori considerati i cui corrispondenti sfasamenti sono compensati (N schemi come sopra ciascuno relativo a uno degli N valori di f_d presi in considerazione: **banco di N filtri**).

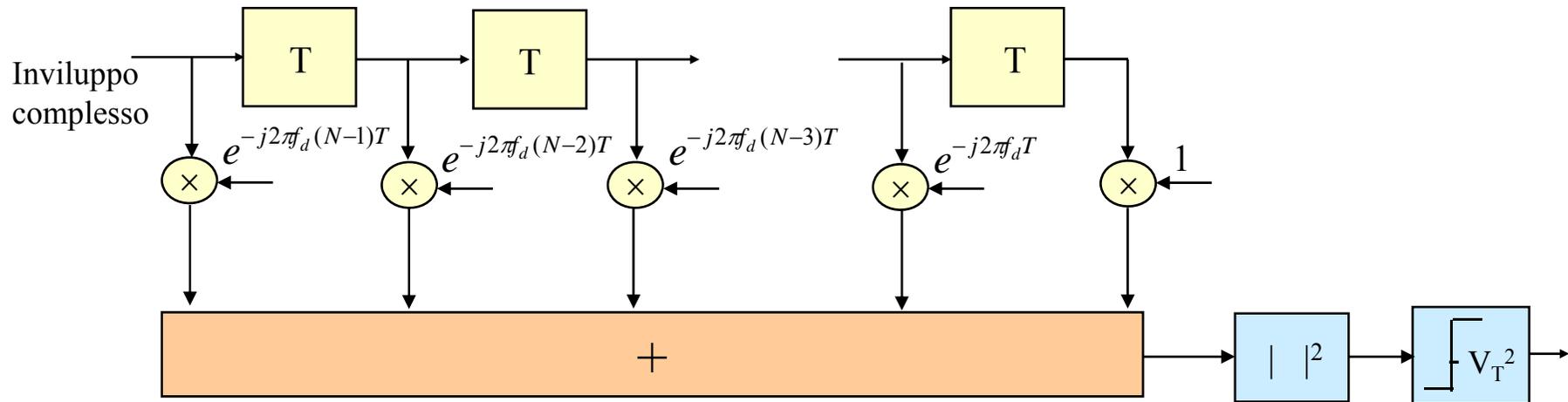
$$f_d = \frac{k}{NT} \quad k = 0 \dots N-1 \Rightarrow e^{-j2\pi f_d nT} = e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}$$

Generico termine di riallineamento della fase dell'n-esimo impulso

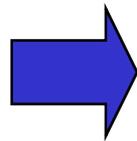
Sistemi Radar

Filtro adattato alla sequenza (V)

Per poter operare coerentemente è necessario riallineare in fase i ritorni cioè considerare lo schema (filtro):



frequenza Doppler f_d
del bersaglio incognita



- Si considera un insieme discreto di valori della frequenza Doppler e si compensano i valori selezionati

Insieme dei valori considerati i cui corrispondenti sfasamenti sono compensati (N schemi come sopra ciascuno relativo a uno degli N valori di f_d presi in considerazione: **banco di N filtri**).

$$f_d = \frac{k}{NT} \quad k = 0 \dots N-1$$

$$\Rightarrow e^{-j2\pi f_d nT} = e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}$$

Generico termine di riallineamento della fase dell'n-esimo impulso

Sistemi Radar

Filtro adattato alla sequenza (VII)

A meno della portante la forma d'onda trasmessa è del tipo:

$$\sum_{n=0}^{N-1} f(t-nT)$$

Per il nostro caso particolare $f(t)=\text{rect}_\tau(t)$ ma il discorso che segue è valido qualunque sia la forma d'onda trasmessa sulla singola interrogazione.

La funzione di trasferimento del filtro adattato è quindi data da:

$$H_{MF}(f) = F^*(f) \left[\sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi f n T} \right]^* = F^*(f) \left[\frac{1 - e^{-j2\pi f N T}}{1 - e^{-j2\pi f T}} \right]^*$$

$F^*(f) e^{j\pi f (N-1) T}$

$\frac{\sin(\pi f N T)}{\sin(\pi f T)}$

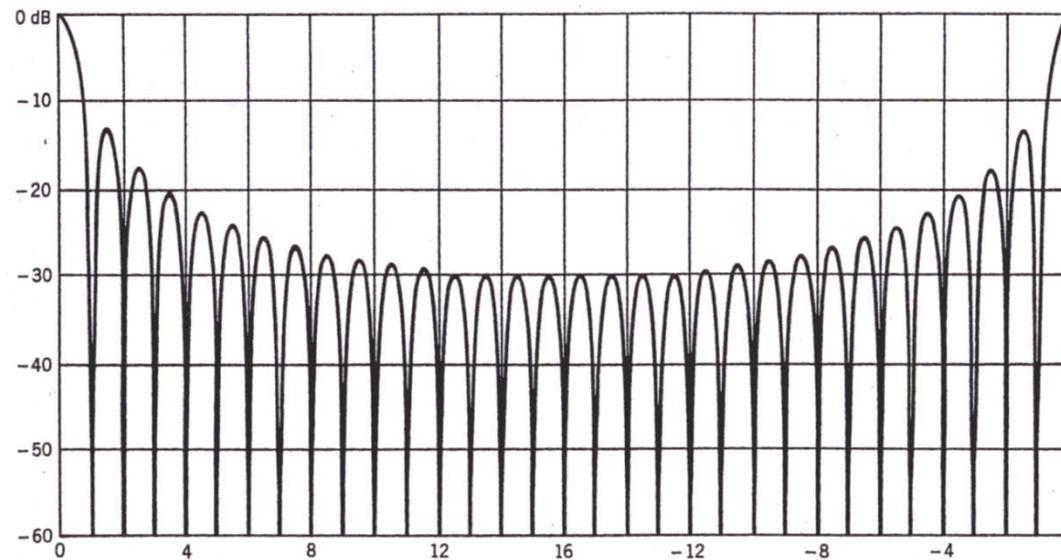
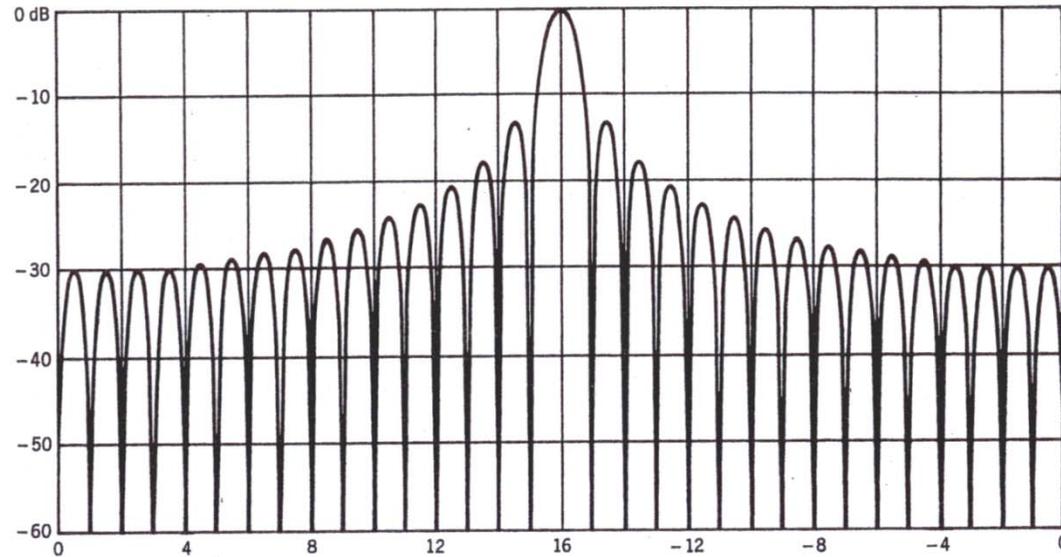
Filtraggio adattato alla
forma d'onda
trasmessa

Filtraggio
azimutale

Il filtro adattato ad un treno di interrogazioni si decompone nel filtro adattato alla forma d'onda trasmessa sulla singola interrogazione ($F^*(f)$) e nel filtro che opera l'integrazione azimutale ($\sin(\pi f N T)/\sin(\pi f T)$): nel caso che la forma d'onda trasmessa sia un impulso rettangolare si ha

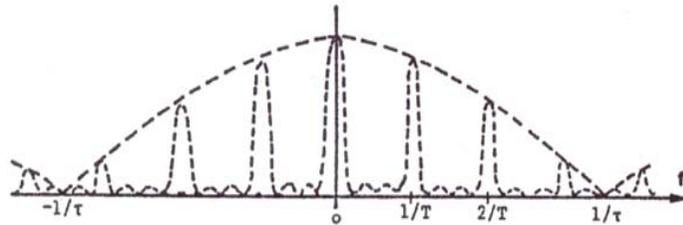
$$H_{MF}(f) = \text{sinc}(\pi f \tau) \frac{\sin(\pi f N T)}{\sin(\pi f T)}$$

Filtro adattato alla sequenza (VIII)



Filtro adattato alla sequenza (IX)

FILTRO A PETTINE



filtro adattato un treno di impulsi rettangolari con Doppler nulla \Rightarrow per tenere conto delle diverse Doppler si utilizza un banco di N filtri centrati sulle frequenze k/NT con $k=0\dots N-1$ ciascuno largo $1/NT$

Lettura in termini del teorema del campionamento:

- ▶ frequenza di campionamento PRF: lo spettro è periodico con periodo PRF (quindi si considera una sola campata tra 0 e PRF ad es.);
- ▶ campionamento tramite impulsi rettangolari di durata τ anziché impulsi di Dirac: lo spettro è involuppato dal $\text{sinc}(\pi f\tau)$;
- ▶ N campioni anziché infiniti campioni: lo spettro ha le righe costituite da forme di tipo $\text{sinc}(\pi fNT)$ (è il generico filtro del banco: quando $N \rightarrow \infty$ il $\text{sinc}(\pi fNT)$ diventa un Dirac e il potere risolutore in Doppler $\rightarrow 0$);

(sezione della FdA per ritardo nullo)

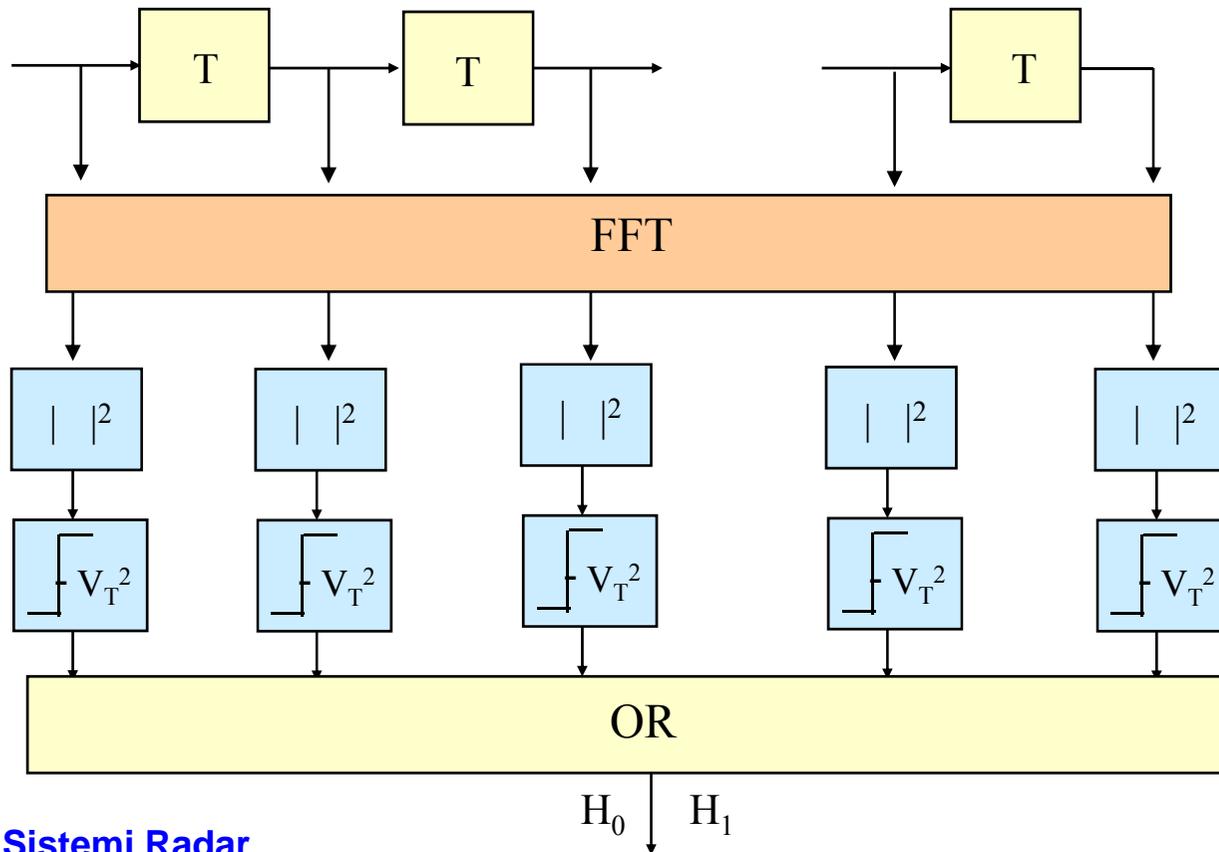
Filtro adattato alla sequenza (VI)

Sono considerati N diversi rami ciascuno dei quali calcola:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \bar{w}(t-nT) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad k = 0 \dots N-1$$

Trasformata discreta di Fourier valutata alla frequenza k/N

Lo schema di elaborazione per l'integrazione coerente diviene:

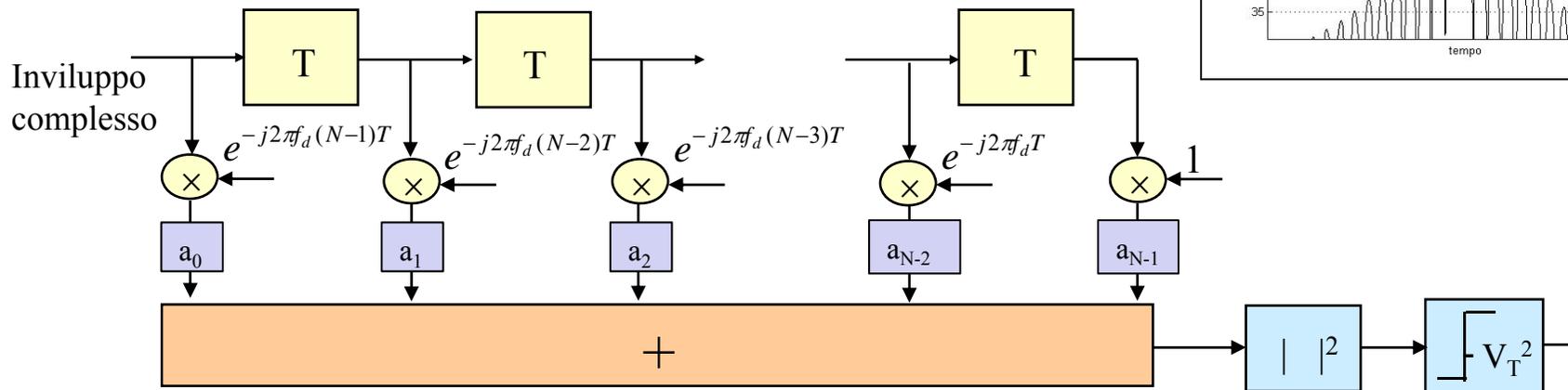
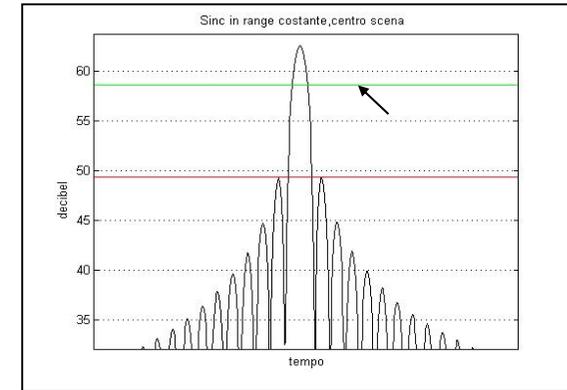


- Si decide per H_1 se almeno una delle uscite da 1 (OR)
- Dalla conoscenza dell'uscita che da 1 è possibile stimare la Doppler del bersaglio e quindi la sua velocità radiale

Frequency sidelobes: pesare la sequenza (I)

Filtro adattato = Riallineamento delle fasi = uscita FFT

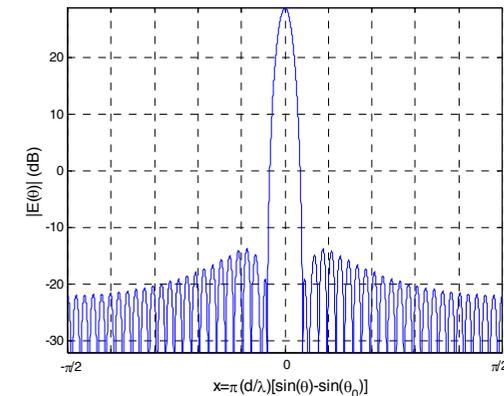
➔ Lobi laterali in frequenza a -13 dB



Pesatura di ampiezza sulla sequenza ➔

Trade-off con:

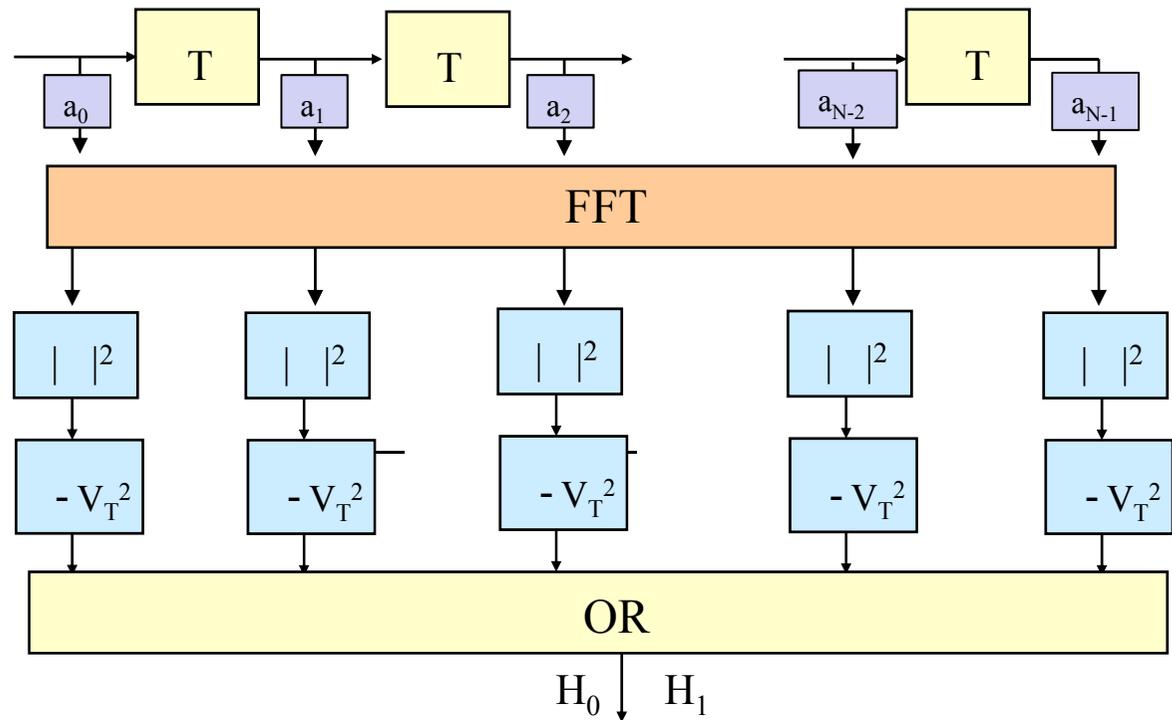
- perdita in SNR
- perdita di risoluzione in frequenza (overlap filtri)



Sistemi Radar

Frequency sidelobes: pesare la sequenza (II)

Implementazione con FFT

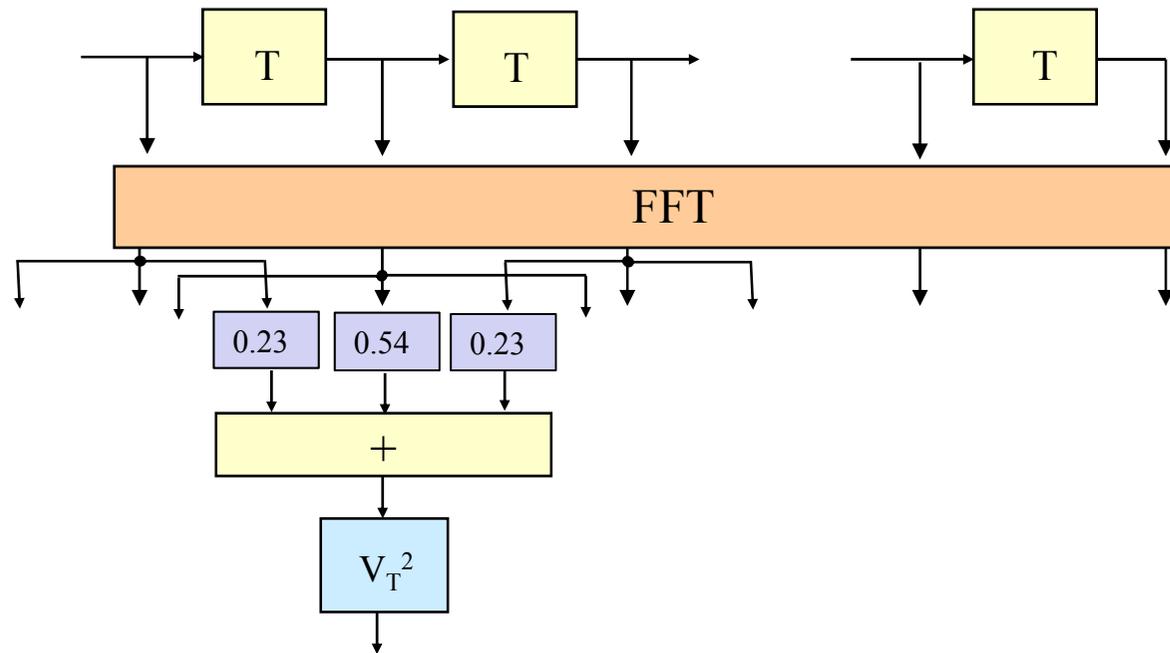


Pesatura e sfasamenti sono due prodotti e sono intercambiabili in ordine,

Quindi effettuo prima pesatura e poi FFT (sfruttando efficienza di algoritmi FFT)

Frequency sidelobes: pesare la sequenza (III)

Implementazione
con FFT
alternativa
per \cos^2 su
pedistallo

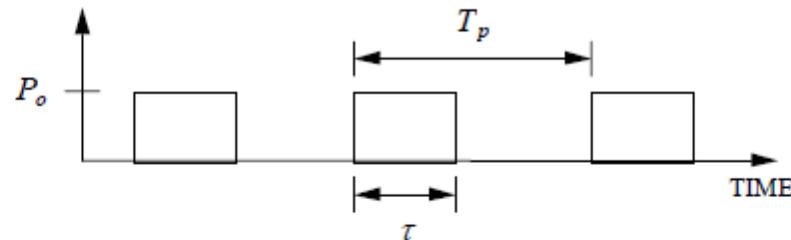


Esempio con Hamming

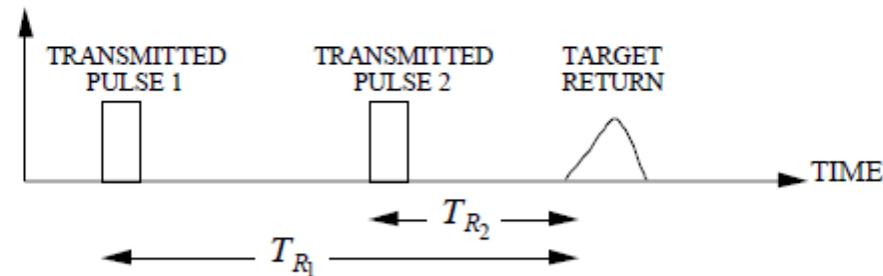
$$\text{Hamming} \left\{ \begin{aligned} w_k &= 0.54 + 0.46 \cos \left[\frac{2k}{N-1} \pi \right] & k &= -\frac{N-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2} \\ g(t_n) &= \left\{ 0.54 D(x) + \frac{1}{2} 0.46 \left[D \left(x + \frac{\pi}{N} \right) + D \left(x - \frac{\pi}{N} \right) \right] \right\} \end{aligned} \right.$$

Range Ambiguities

- For convenience we omit the sinusoidal carrier when drawing the pulse train



- When multiple pulses are transmitted there is the possibility of a range ambiguity.



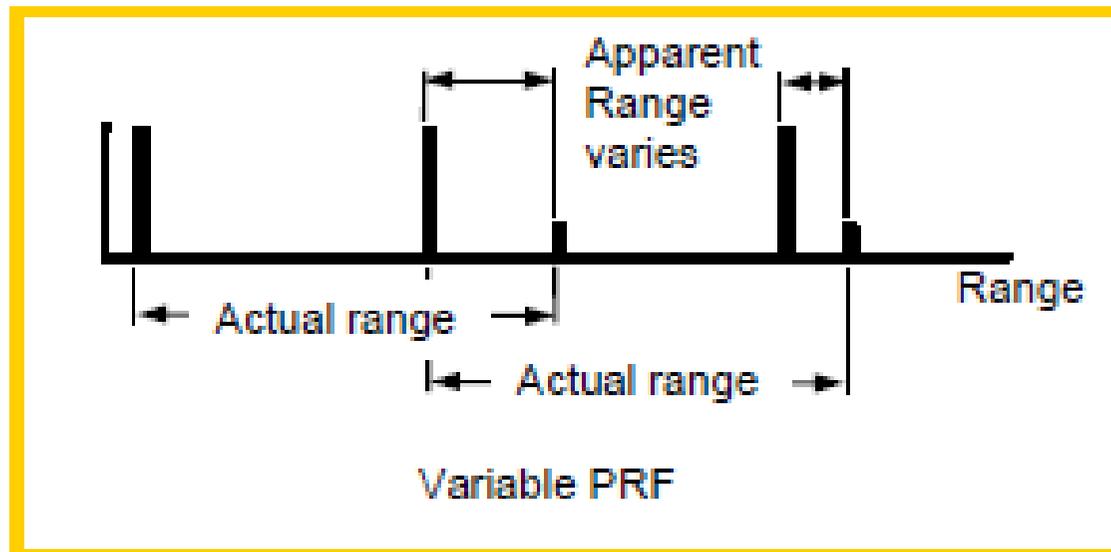
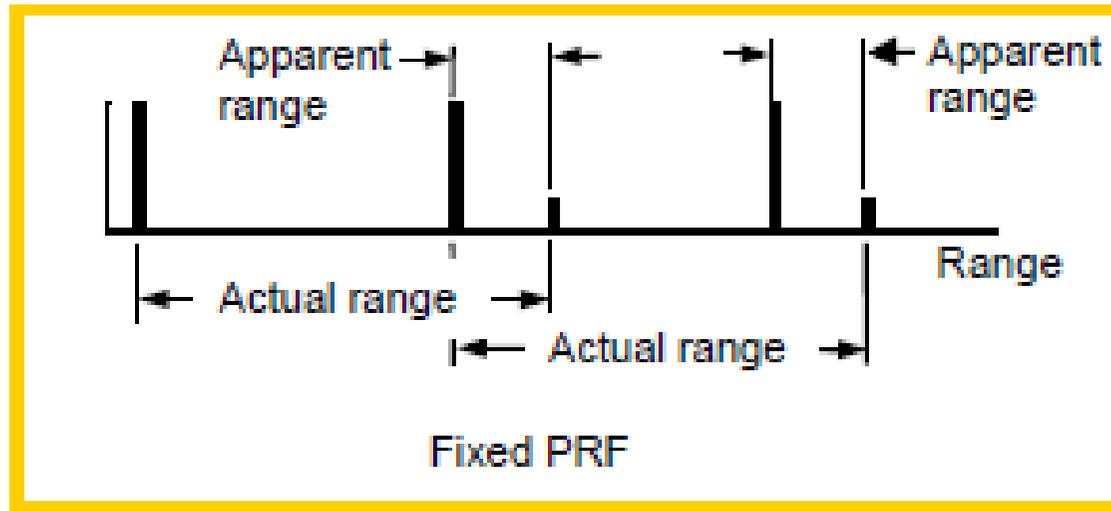
- To determine the range unambiguously requires that $T_p \geq \frac{2R}{c}$. The unambiguous range is

$$R_u = \frac{cT_p}{2} = \frac{c}{2f_p}$$

Source of Multiple-Time Around Returns

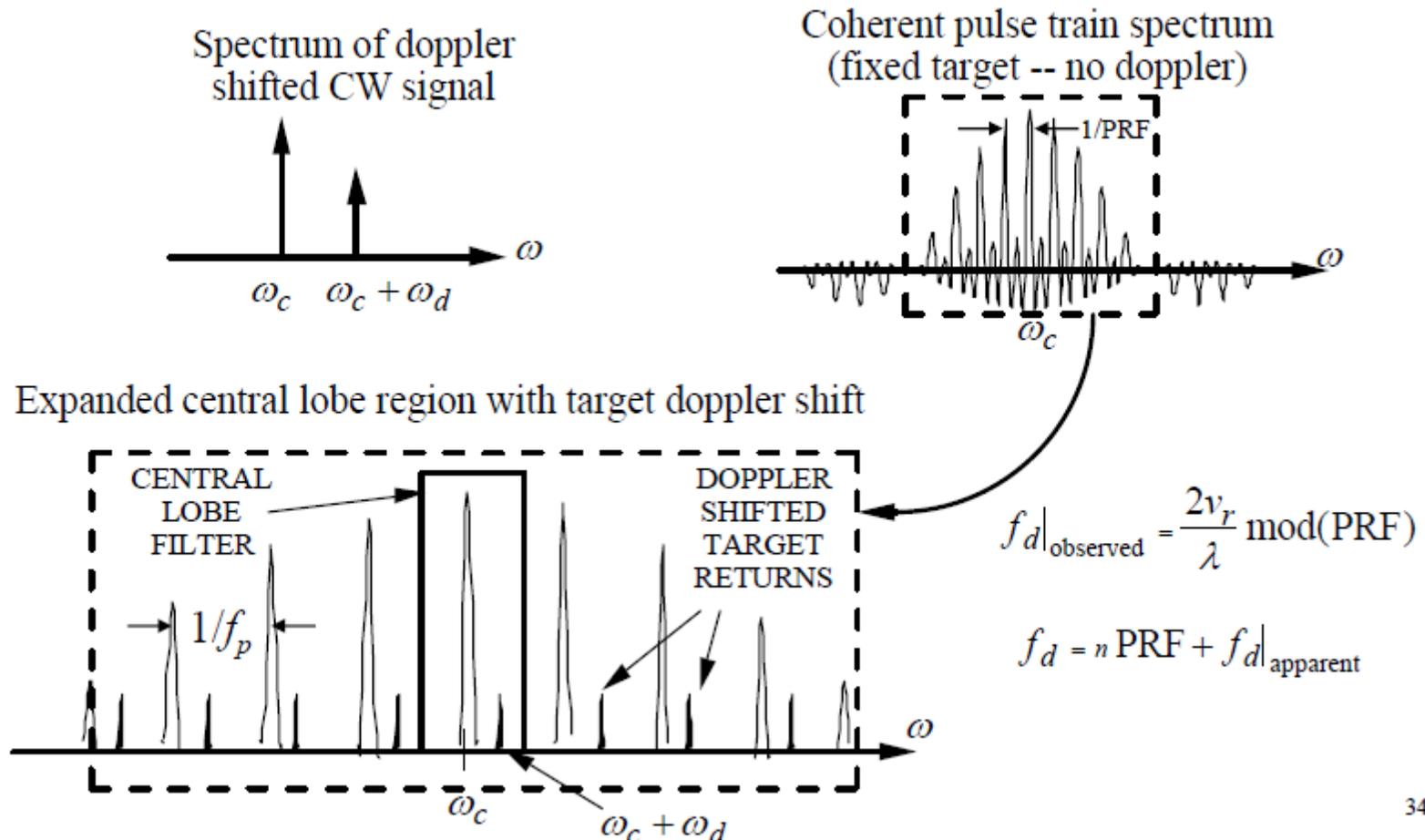
- Radar Pulses Often Transmitted at Periodic Intervals
 - Defined by the Pulse-repetition Interval
 - $PRI = 1 / PRF$
- Signal From Target at $R > c PRI / 2$ Arrives After Next Pulse Is Transmitted
 - May Be Interpreted As Return From the Later Pulse
 - Apparent Range Much Shorter Than Actual Range
- Mitigation Techniques
 - Variable PRF (Apparent Range Varies)
 - Frequency Agility (Not Applicable With Coherent Processing, e.g., MTI)

Multiple-Time Around Return & Variable PRF Mitigation



Velocity Ambiguities

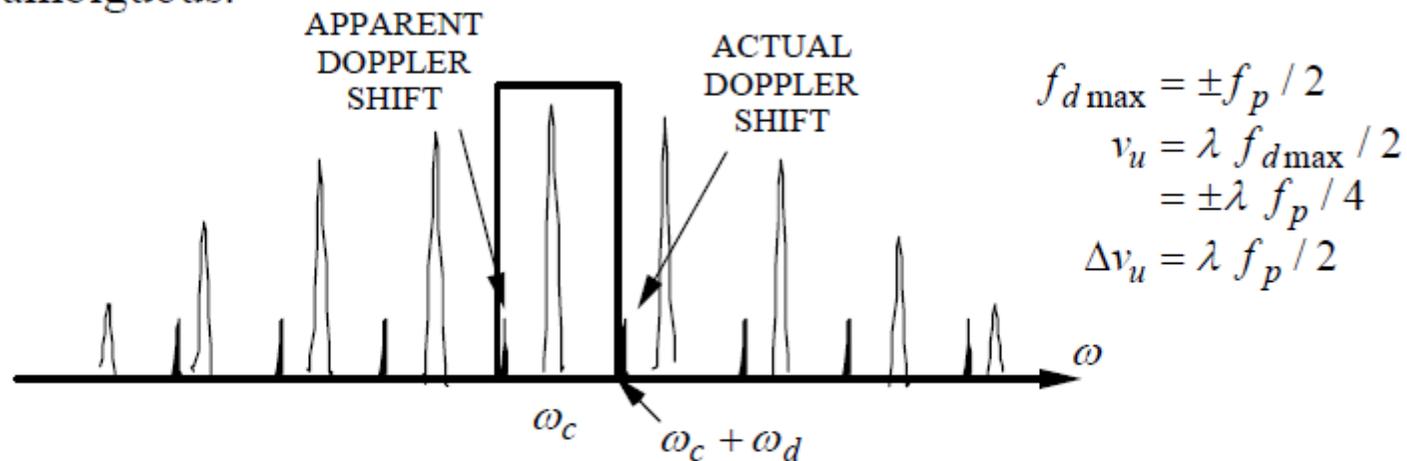
- The spectrum is the Fourier transform of the pulse train waveform.



34

Low, High & Medium PRF

- If f_d is increased the true target Doppler shifted return moves out of the passband and a lower sideband lobe enters. Thus the Doppler measurement is ambiguous.

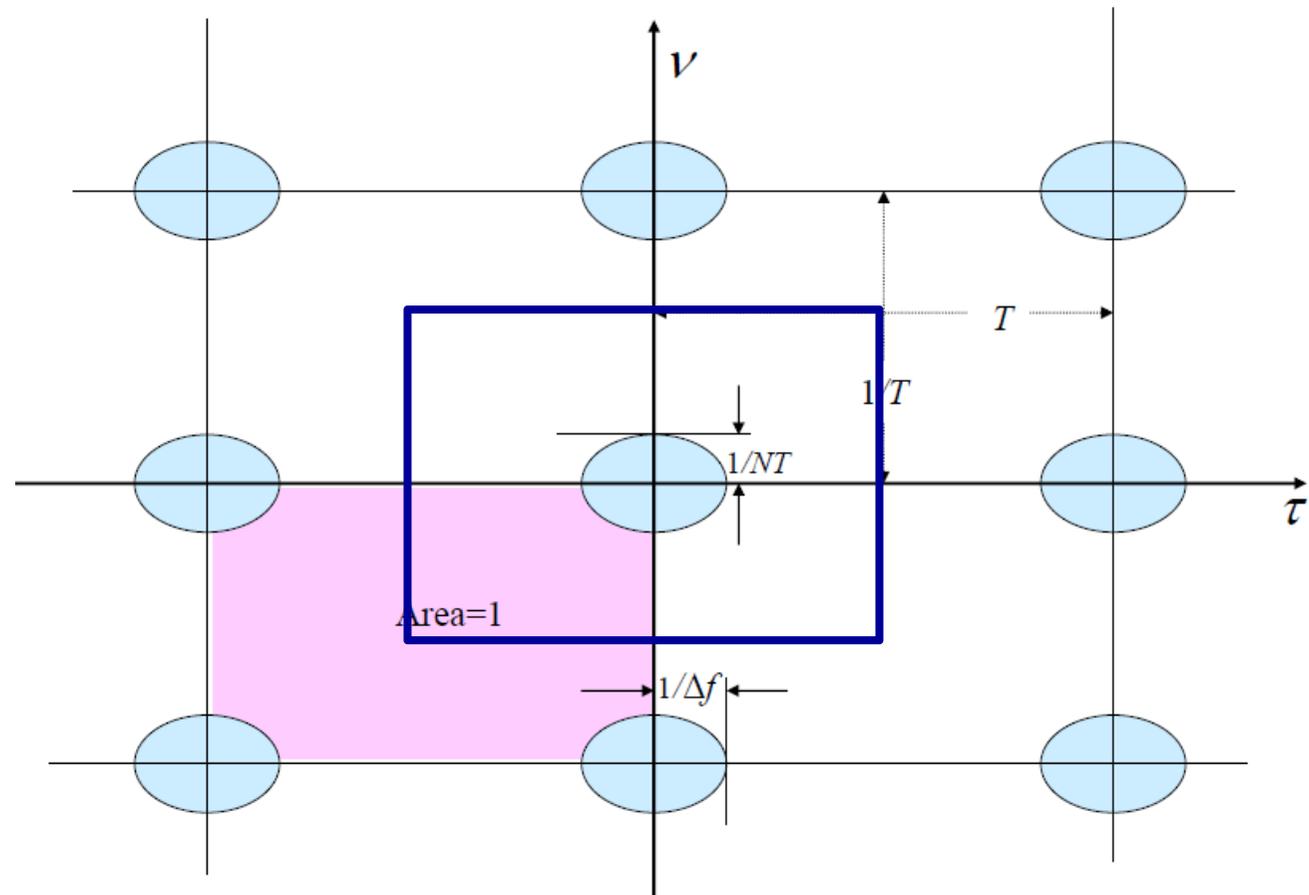


- PRF determines Doppler and range ambiguities:

<u>PRF</u>	<u>RANGE</u>	<u>DOPPLER</u>
High	Ambiguous	Unambiguous
Medium	Ambiguous	Ambiguous
Low	Unambiguous	Ambiguous

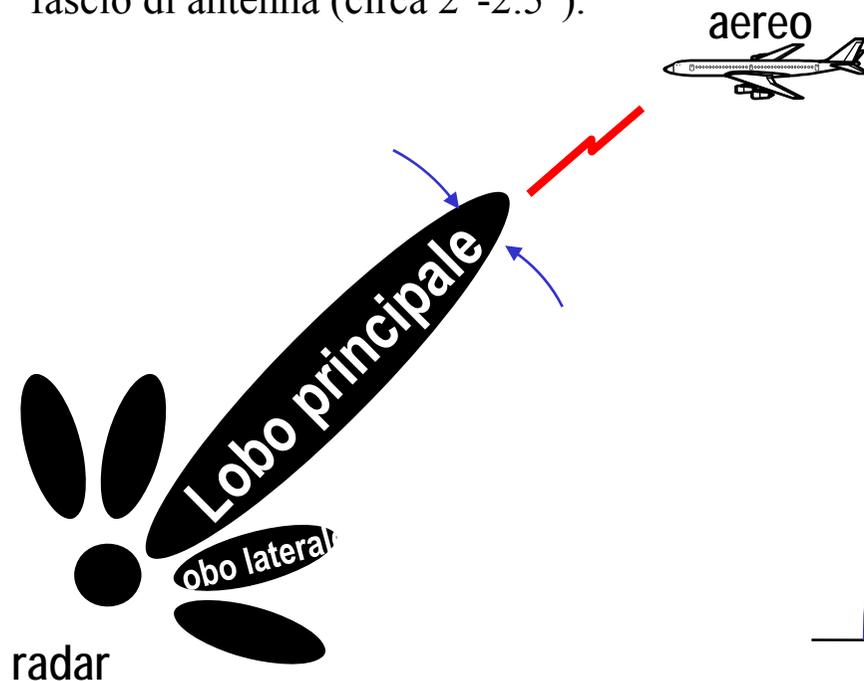
Area del piano delay-Doppler non ambigua

$N \gg 1$

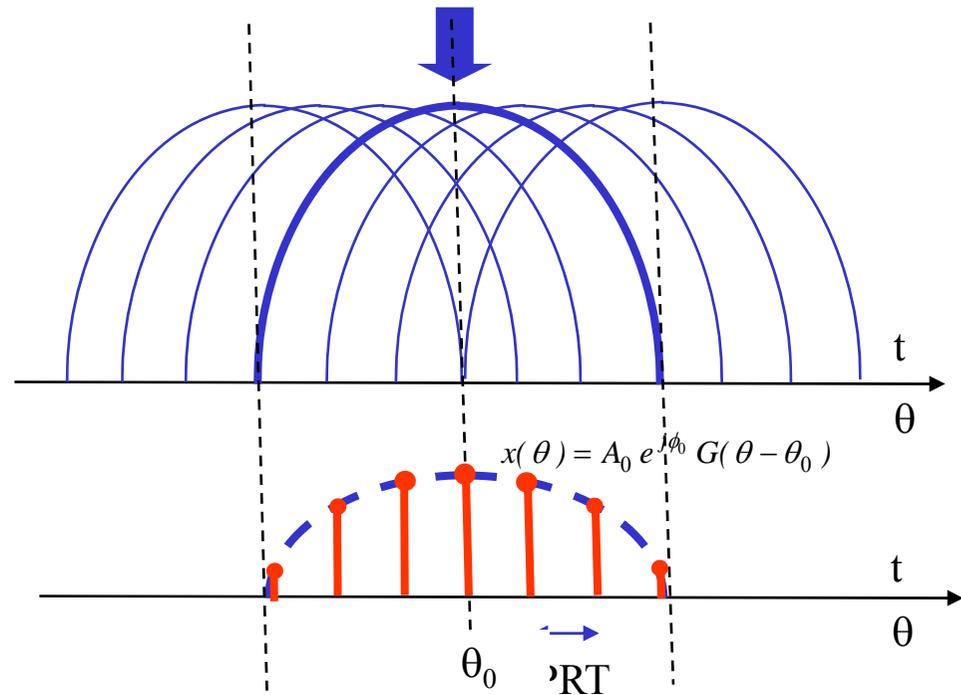


Stima di azimuth del bersaglio

- Usando il singolo ritorno, l'accuratezza di misura dell'angolo è data dalla larghezza del fascio di antenna (circa 2° - 2.5°).



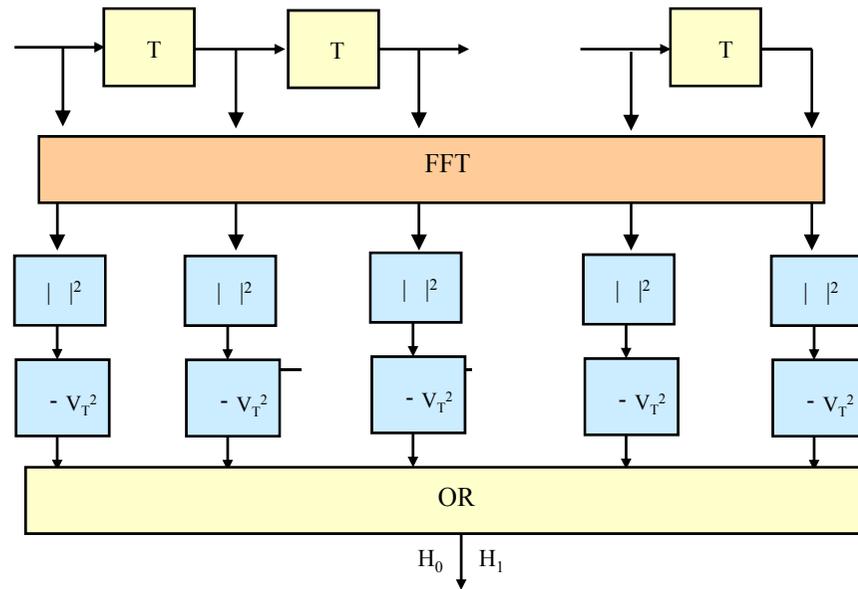
- Si può sfruttare il fatto che l'antenna ruota mentre invia interrogazioni e riceve indietro le relative risposte dal bersaglio (N impulsi nel time-on-target).



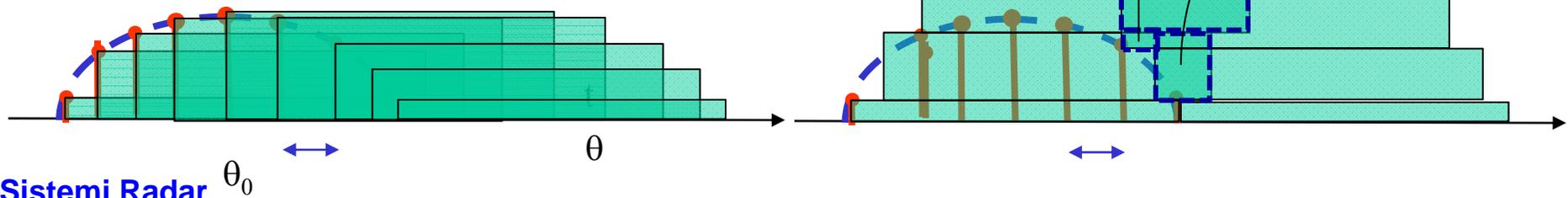
- A grande distanza dal radar, ciò implica una accuratezza di misura in azimuth scarsa.

Sistemi Radar

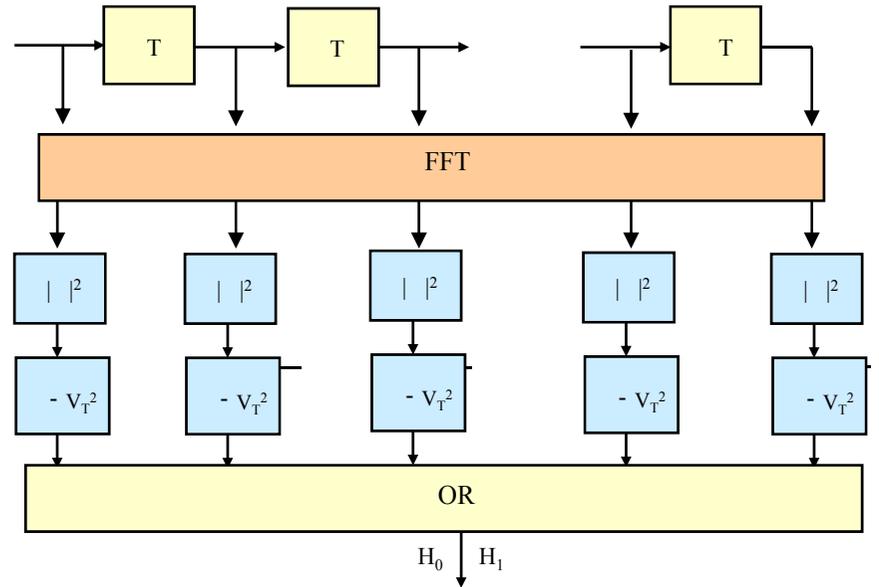
Stima di azimuth con integrazione coerente (I)



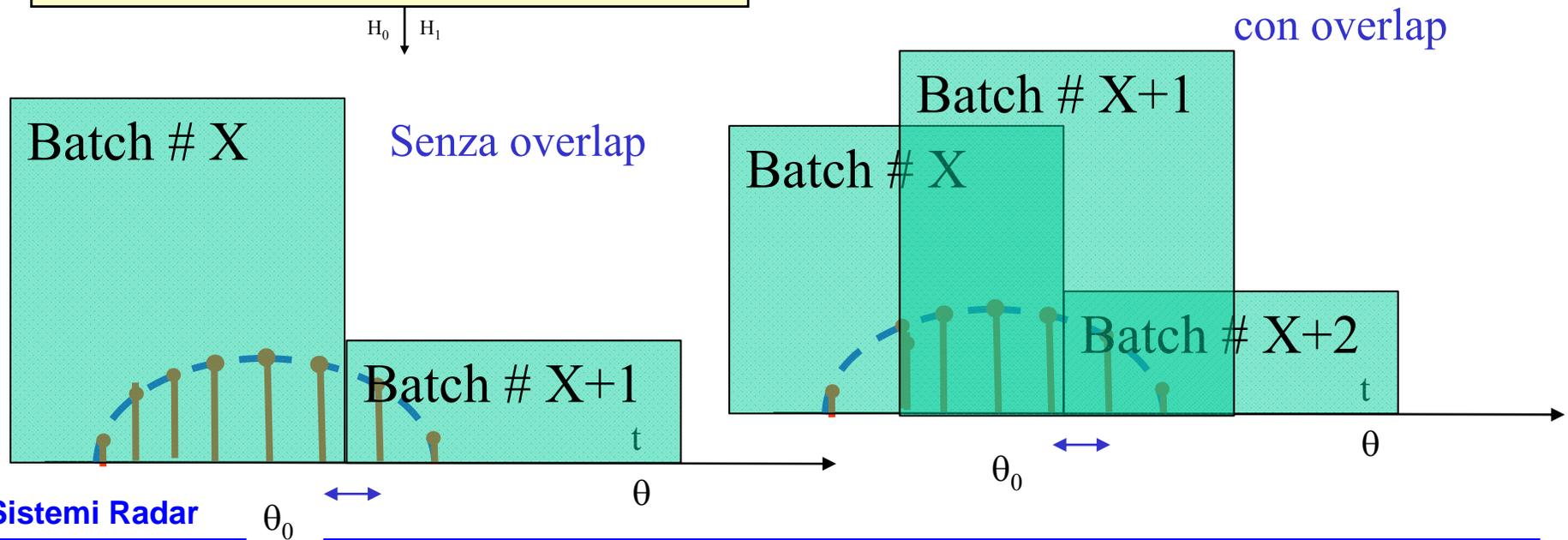
Per uso sliding dell'integratore coerente/FFT, comportamento analogo all'integratore quadratico



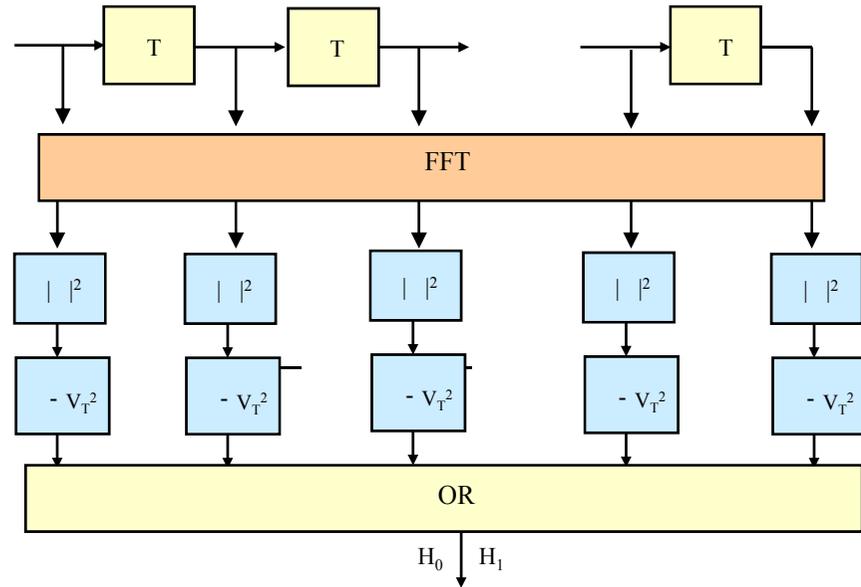
Stima di azimuth con integrazione coerente (II)



Problema per uso a batch della FFT



Stima di azimuth con integrazione coerente (III)



Uso di integrazione coerente/FFT su batch di lunghezza $< N$ (es. $N/4$) da integrare poi in modo non coerente (ad es. quadratico)

Vantaggi:

- Sui singoli sotto-batch posso usare frequenze portanti diverse (agilità di frequenza)
- Sui singoli sotto-batch posso usare PRF diverse (PRF stagger)

