



Unione Europea



Rete di Eccellenza
EMBEDDED SYSTEMS IN CRITICAL DOMAINS

***ARRAYS A SCANSIONE
ELETTRONICA DEL FASCIO***

BORSISTA
Giovanni Buonanno

TUTORE
Prof. Raffaele Solimene

RESPONSABILE SCIENTIFICO
Prof. Rocco Pierri



Obiettivi

- Mostrare una sintesi della teoria alla base delle applicazioni che fanno uso degli array di antenne
- Introdurre il concetto di controllo elettronico del fascio e discutere di alcuni problemi legati alla scansione dello stesso;
- Mostrare degli schemi di principio per l'alimentazione degli array
- Mostrare il limite fondamentale della spaziatura uniforme, giustificando l'uso di quella non-uniforme

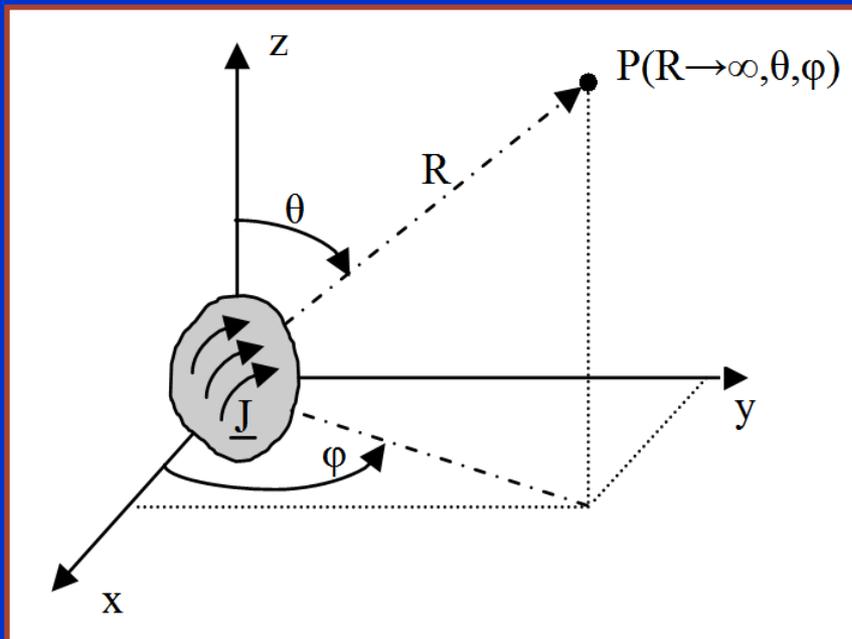


Outline della presentazione

1. Definizione di array di antenne;
2. Principio di moltiplicazione;
3. Tipologie di array e progetto dell'array
4. Array a Scansione Elettronica (Phased-Array a controllo elettronico)
5. Alimentazione
6. Sfasatori digitali
7. Sintesi di array a spaziatura uniforme
8. Formula generale per la Direttività
9. Perché la spaziatura non uniforme?
10. Esempi di scansione di array planari
11. Esempi reali

Motivo Fondamentale e Campo Irradiato da una generica antenna

PRINCIPIO (UTILITA') FONDAMENTALE: Con antenne poco direttive è possibile creare sistemi irradianti altamente direttivi con minor costi e problemi tecnici rispetto alla realizzazione di una singola antenna avente direttività elevata.



$$\underline{E}_{\infty}(\mathbf{R}, \theta, \varphi) = A \cdot \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cdot \underline{f}(\theta, \varphi)$$

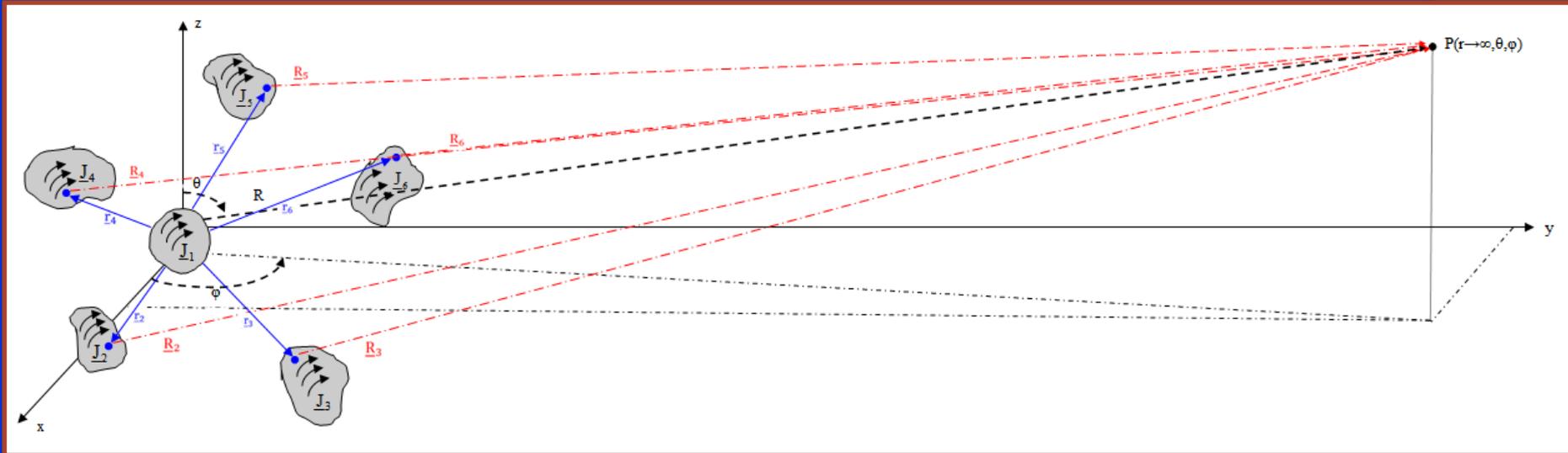
$A \Rightarrow$ Costante complessa

$\frac{e^{-j\beta R}}{R} \Rightarrow$ Fattore d'onda sferico

$\underline{f}(\theta, \varphi) \Rightarrow$ Vettore di radiazione

SI CONSIDERA CHE IL CENTRO DI FASE DELL'ANTENNA SIA IN $R=0$.

Campo Irradiato da un insieme (ARRAY) di antenne



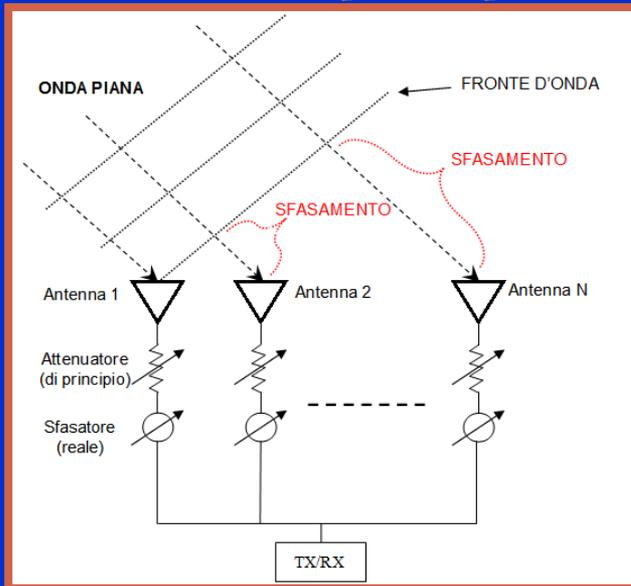
Ipotesi fondamentali:

1. Localizzazione del punto P nella zona lontana del sistema di antenne;
2. Trascurabilità delle mutue interazioni (distanza minima tra radiatori: $\lambda/2$)

$$\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{P}) = \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cdot \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{-j\beta (\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{R}})} \cdot \underline{\mathbf{f}}_n(\theta, \varphi)$$

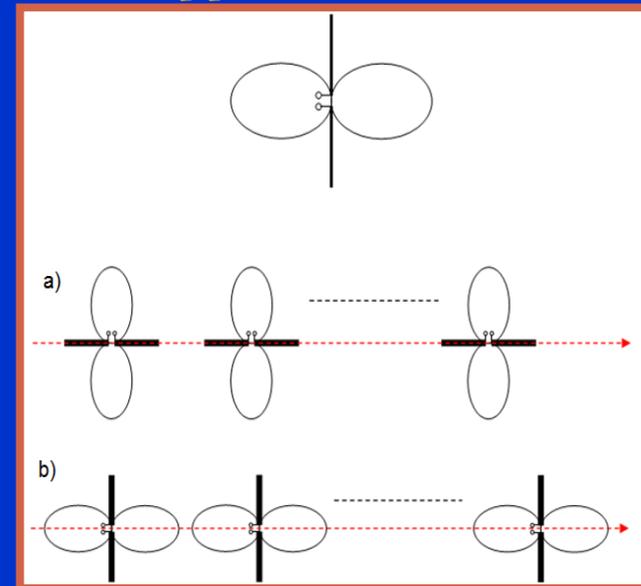
Schema di Principio e giustificazione delle ipotesi

Schema di principio



- TX/RX: ricetrasmittitore
- Sfasatori: fisicamente presenti
- Attenuatori: rappresentano i divisori di potenza

Accoppiamenti mutui



- CASO "a": in linea di principio accoppiamenti assenti
- CASO "b": maggior peso rispetto al caso "a"

Fattore di elemento, fattore di Array e Principio di Moltiplicazione

Ulteriore ipotesi: "Antenne aventi tutte lo stesso vettore di radiazione"

- Antenne uguali
- Egualmente orientate

$$\underline{\underline{E}}(\mathbf{P}) = \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cdot \underline{\underline{f}}(\theta, \varphi) \cdot \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{-j\beta (\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{R}})}$$

Fattore di elemento

Fattore di array

$$|\underline{\underline{E}}(\mathbf{P})| = \left| \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cdot \underline{\underline{f}}(\theta, \varphi) \right| \cdot \left| \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{-j\beta (\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{R}})} \right|$$

$$\angle \underline{\underline{E}}(\mathbf{P}) = \angle \frac{e^{-j\beta R}}{R} \cdot \underline{\underline{f}}(\theta, \varphi) + \angle \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{-j\beta (\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{R}})}$$

**PRINCIPIO
DI MOLTIPLICAZIONE**

Sintesi dell'Array

SINTESI DELL'ARRAY



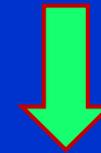
- Sintesi del fattore di elemento
- Sintesi del fattore di array

Sintesi del fattore di elemento



PROGETTO
DELL'ANTENNA

Sintesi del fattore di array



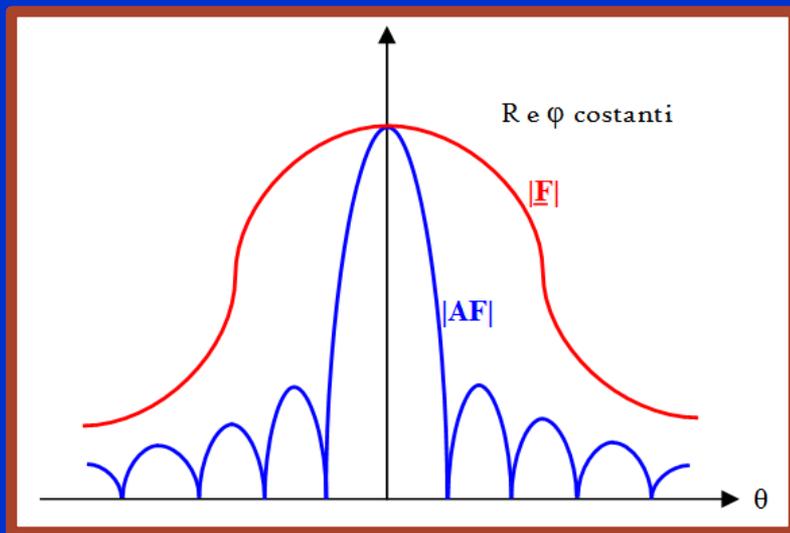
DETERMINAZIONE
DELLE ECCITAZIONI E
DELLE POSIZIONI DEI
CENTRI DI FASE DELLE
ANTENNE

Orientamento del fattore di elemento e del fattore di Array

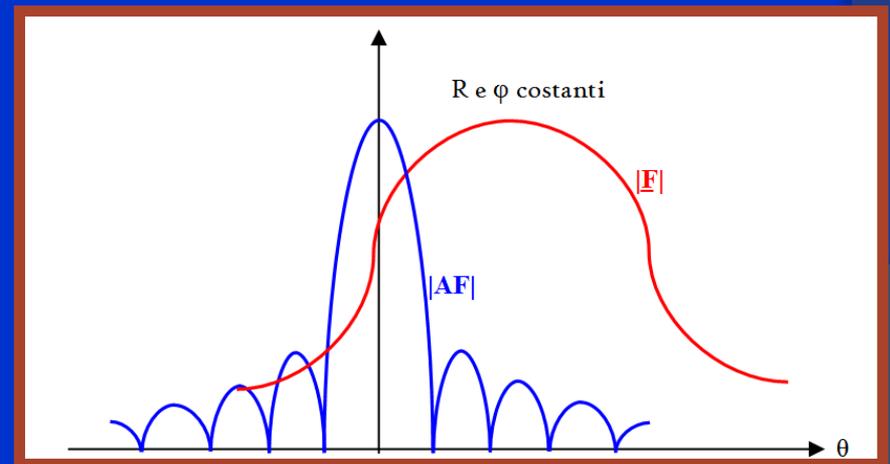
$\underline{F}(R, \theta, \varphi)$: Fattore di elemento

$AF(\theta, \varphi)$: Fattore di array

$$|\underline{E}(R, \theta, \varphi)| = |\underline{F}(R, \theta, \varphi)| \times |AF(\theta, \varphi)|$$



Desiderabile



Da evitare

Tipologie di antenne e Gradi di libertà per la sintesi

➤ Disponendo le antenne:

- *lungo un segmento di linea retta*
- *su una superficie planare*
- *su una circonferenza*
- *su linee o superfici curve*
- *in un volume*



ARRAY LINEARI



ARRAY PLANARI



ARRAY CIRCOLARI



ARRAY CONFORMI



ARRAY VOLUMETRICI

PROGETTO DELL'ARRAY



1. Geometria

2. Distanza tra gli elementi

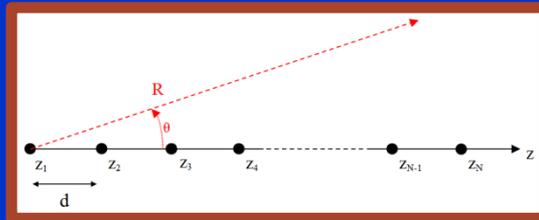
3. Ampiezze delle eccitazioni

4. Fasi delle eccitazioni

5. Andamento del fattore di elemento

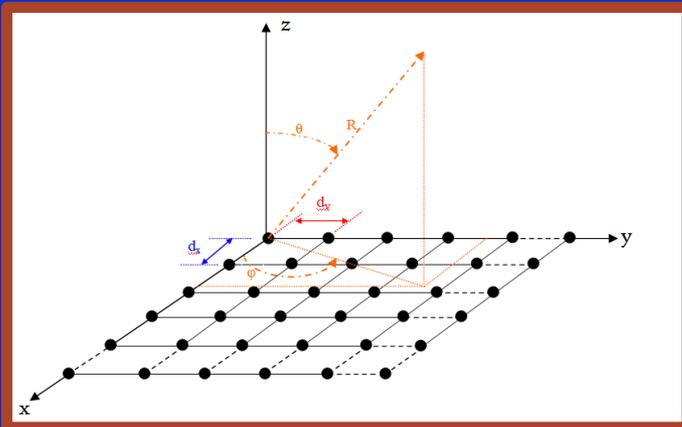
Array classici

ARRAY LINEARI



$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j(n-1)\beta d \cos\theta}$$

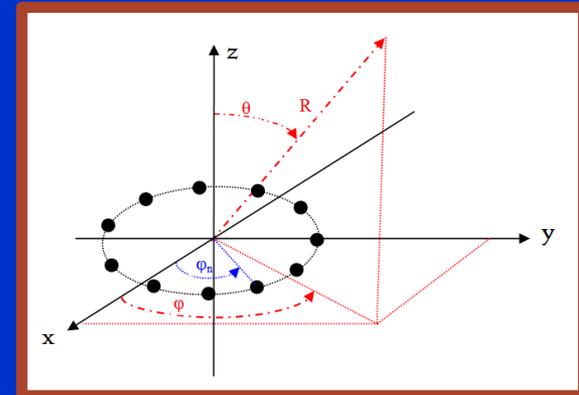
ARRAY PLANARI



$$AF(\theta, \varphi) = \left[\sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j(n-1)\beta d_x \sin\theta \cos\varphi} \right] \cdot \left[\sum_{m=1}^M A_m \cdot e^{j(m-1)\beta d_y \sin\theta \sin\varphi} \right]$$

$(n,m): A_{nm} = A_n \cdot A_m$

ARRAY CIRCOLARI



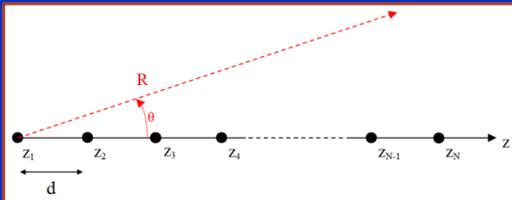
$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot e^{j\beta a \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_n)}$$

a : raggio della circonferenza

Introduzione del concetto del Controllo Elettronico della fase

$$A_n = a_n \cdot e^{j\alpha_n}$$

$$\alpha_n = (n-1) \cdot \alpha$$



• Sfasamento progressivo lineare di fase

• I coefficienti a_n possono essere complessi, reali, solo positivi.

Sfasamento tra radiatori adiacenti:

$$\alpha = -\beta d \cos \theta_0$$

SFASAMENTO TRA I SEGNALI DI ALIMENTAZIONE DELLE ANTENNE



$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{j(n-1) \beta d (\cos \theta - \cos \theta_0)}$$

SE LO SFASAMENTO E' CONTROLLATO ELETTRONICAMENTE

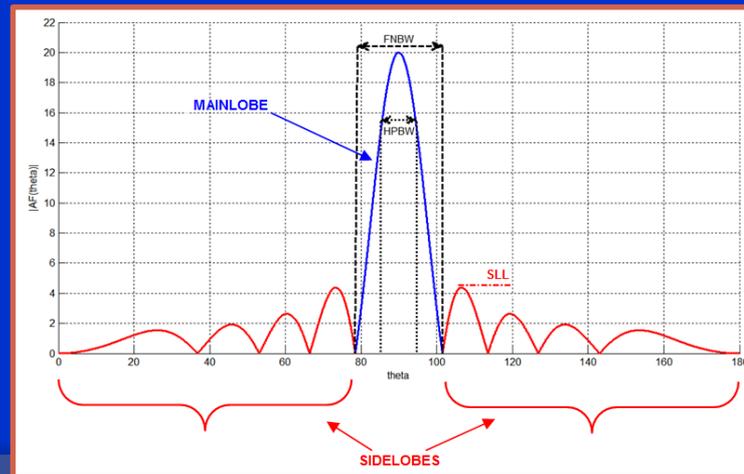
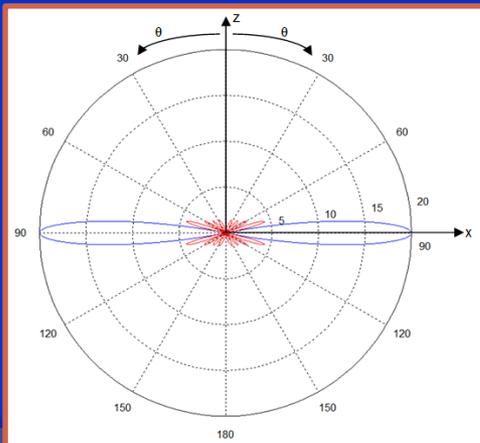
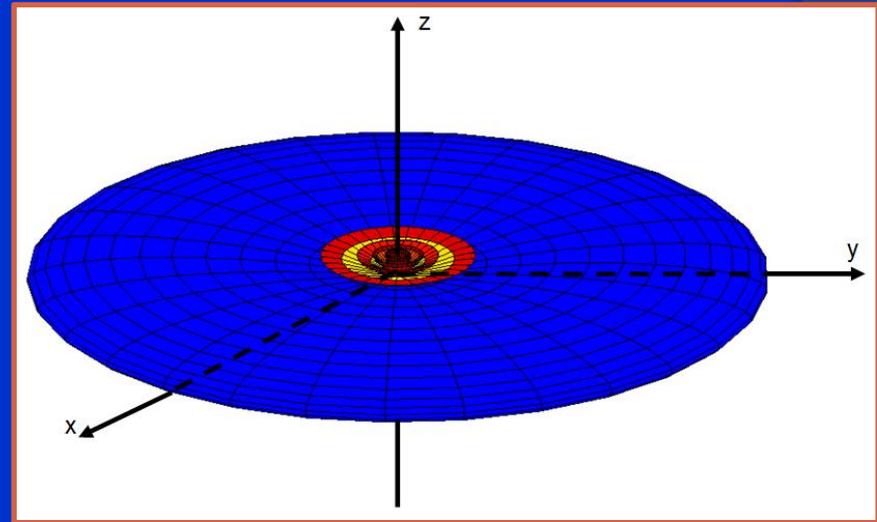
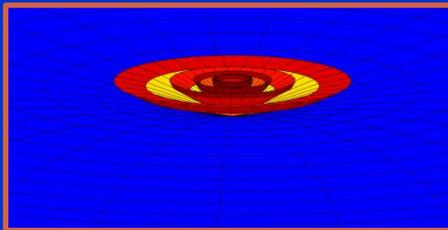
- θ_0 : ANGOLO DI STEERING
- direzione del massimo
- $\theta_0 = \theta_0(\alpha, f, d)$

Controllo elettronico del fascio

Array Uniformi e Parametri fondamentali del fascio

Ampiezze uniformi: $a_n = 1 \forall n$

$$AF(\theta) = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\beta d (\cos\theta - \cos\theta_0)}$$



FNBW: First-Null Beamwidth
HPBW: Half-Power Beamwidth

$$[\theta_1, \theta_2] = \left\{ \theta : |AF(\theta)| \geq |AF(\theta)|_{\text{MAX}} / \sqrt{2} \right\}$$

$$\Downarrow$$

$$\text{HPBW} = \theta_2 - \theta_1$$

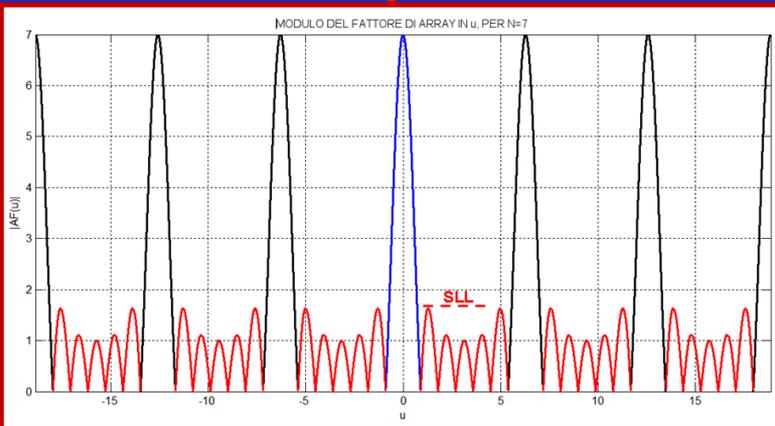
Mainlobe, Sidelobes, Grating-Lobes

$$u = \beta d (\cos \theta - \cos \theta_0)$$

$$AF(u) = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)u}$$

*Fattore di Array
nello spazio della u*

Funzione
periodica di 2π



- **Mainlobe:**

- a. centrato in $u=0$
- b. la sua larghezza è legata all'FNBW e all'HPBW

- **Sidelobes:**

- a. più bassi del mainlobe
- b. potenza irradiata in direzioni non volute

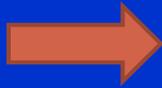
- **Grating-lobes:**

- a. stessa altezza e forma del mainlobe nel dominio della u
- b. molta potenza persa in direzioni non volute(Tx)
- c. ambiguità nell'identificazione della direzione di arrivo (Rx)

Funzione Universale degli Array

- Se $AF(u)$ viene riscritto in forma equivalente e normalizzato rispetto al valor massimo (N)

$$AF(u) = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)u}$$

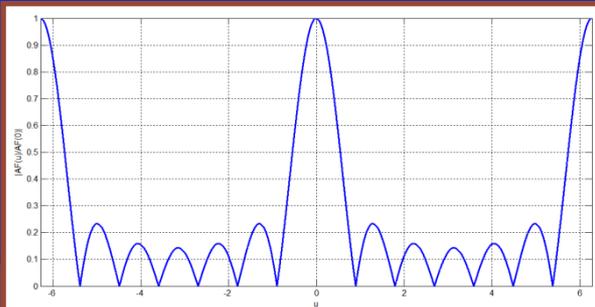


$$\frac{AF(u)}{AF(0)} = \frac{AF(u)}{N} = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}u\right)}{N \cdot \sin\left(\frac{u}{2}\right)} = AF_{\text{Norm}}(u)$$

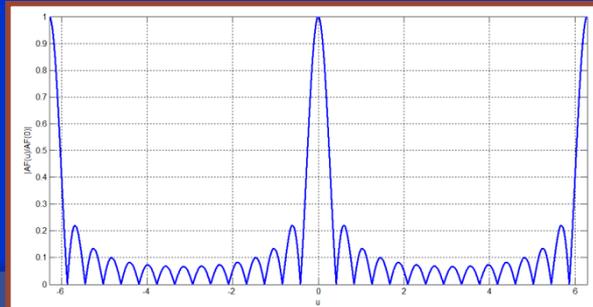
**FUNZIONE UNIVERSALE
DEGLI ARRAY**

- Periodica di 2π ;
- Ha un **mainlobe** (lobo principale) con supporto di estensione costante uguale a $4\pi/N$;
- Presenta dei lobi della stessa forma di quello centrato in $u=0$, i **grating-lobes**;
- Possiede $N-2$ lobi, aventi supporto di estensione costante uguale a $2\pi/N$, tra il mainlobe e i grating-lobes e tra grating-lobes, i **sidelobes**;
- I suoi nulli sono $N-1$ all'interno di un periodo;
- L'altezza del sidelobe adiacente al mainlobe definisce il **SideLobe-Level (SLL)**, che decresce all'aumentare di N ;

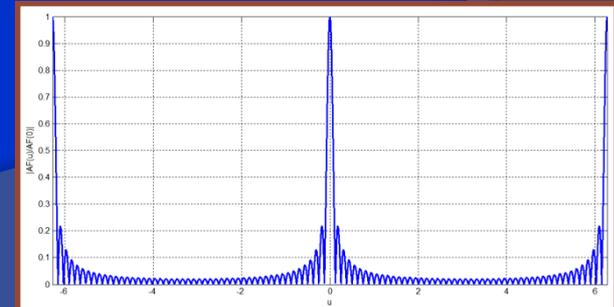
N=7; SLL=0.233



N=15; SLL=0.2205



N=50; SLL=0.2175



Spazio Visibile

$$u = \beta d (\cos \theta - \cos \theta_0)$$

$$\theta \in [0, \pi] \Rightarrow -1 \leq \cos \theta \leq 1$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{c} f$$

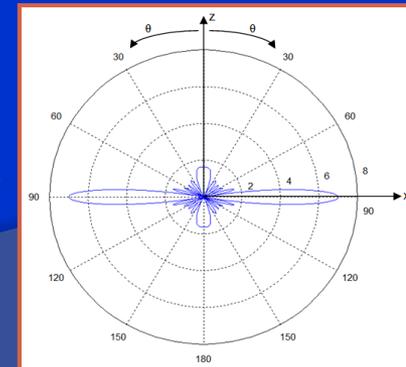
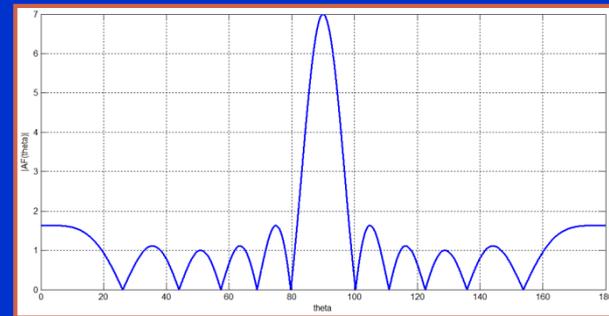
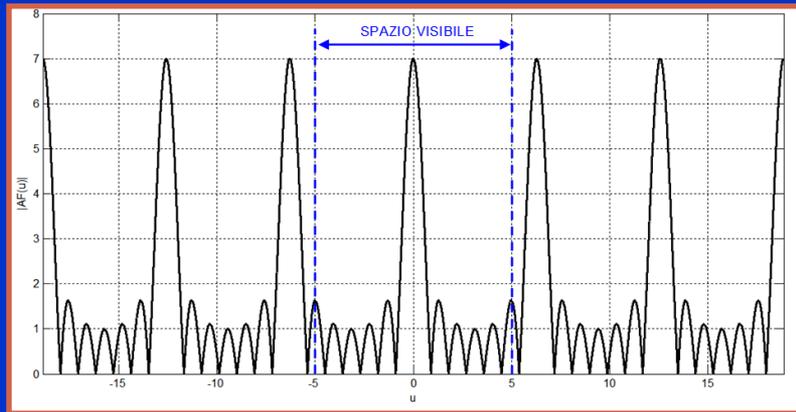
$$-\frac{2\pi}{\lambda} d (1 + \cos \theta_0) \leq u \leq \frac{2\pi}{\lambda} d (1 - \cos \theta_0)$$

Spazio Visibile

- Estensione fissa: $4\pi(d/\lambda)$
- Posizione del punto centrale: $-2\pi(d/\lambda)\cos \theta_0$

ARRAY BROADSIDE: $\theta_0=90^\circ$

$N=7$; $d=(5/2\pi)\lambda$

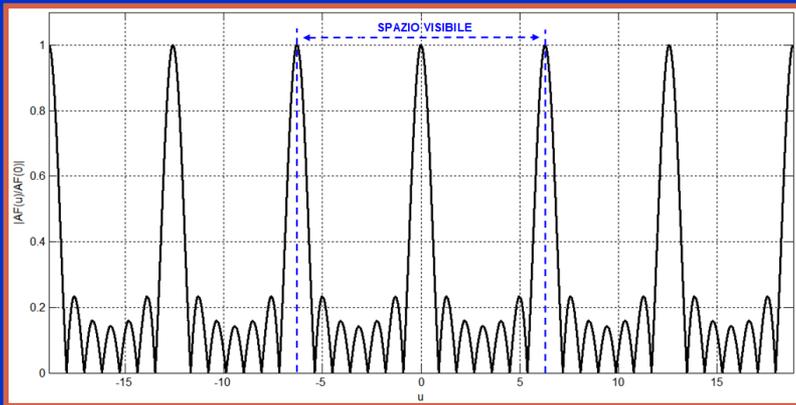


IN QUESTO CASO NON ENTRANO GRATING-LOBES NELLO SPAZIO VISIBILE

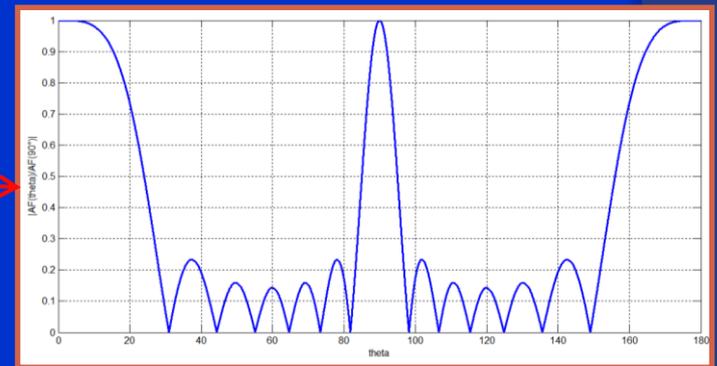
FNBW $\approx 20^\circ$

Effetto della distanza normalizzata sulla spazio visibile

Fattore di Array normalizzato nello spazio della u
 ($\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=1$)



Fattore di Array normalizzato in θ (grafico rettangolare): $FNBW \approx 16.44^\circ$



Solido di radiazione

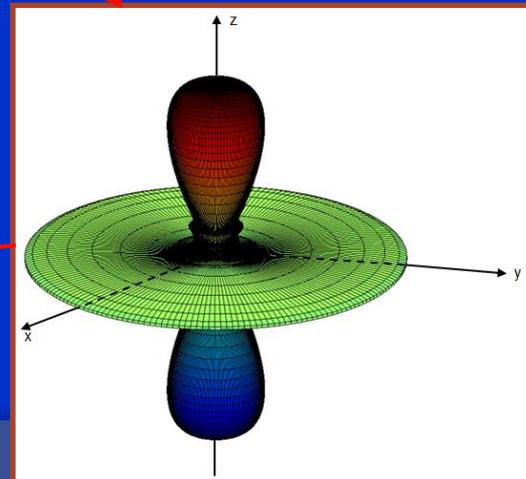
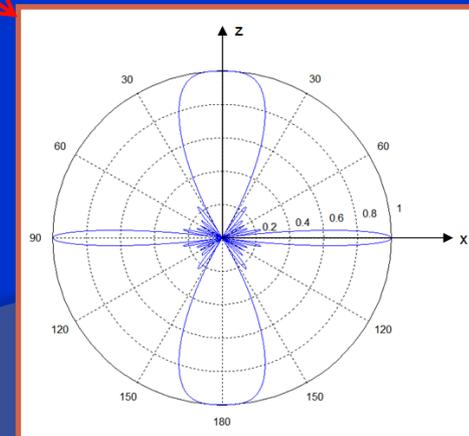
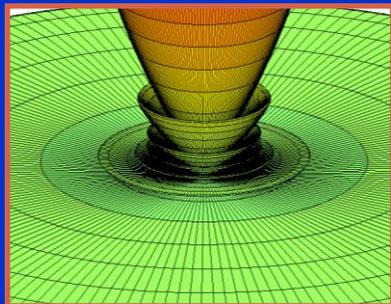


Diagramma polare in θ nel piano x - z

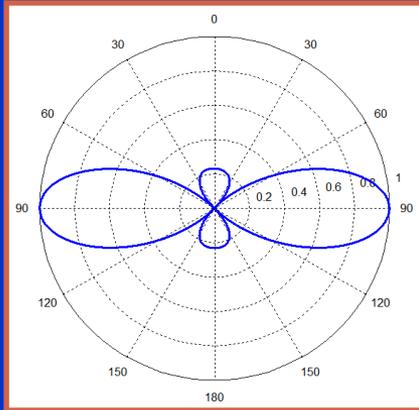


Zoom sui sidelobes

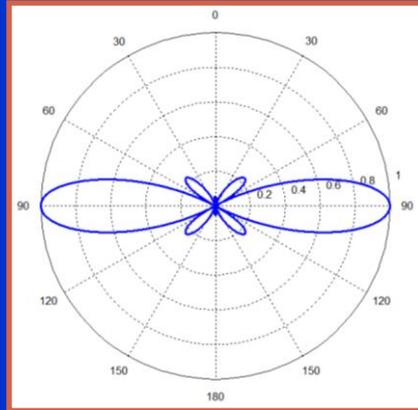


Diagrammi Polari in funzione della distanza normalizzata

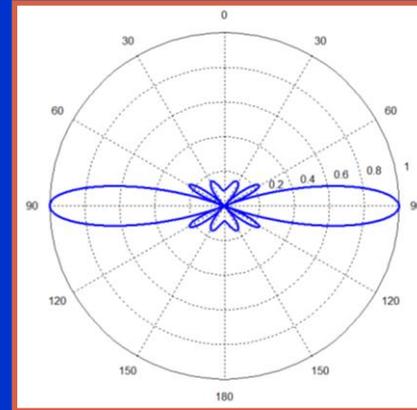
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.2$



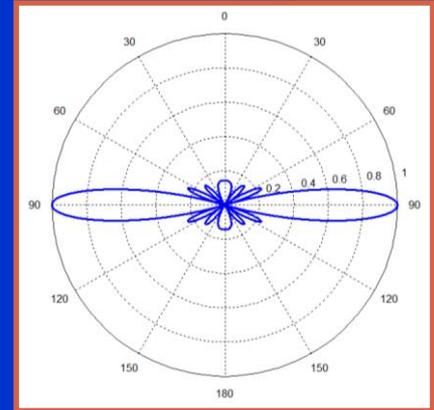
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.3$



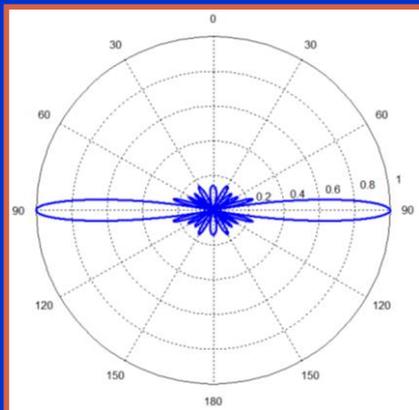
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.4$



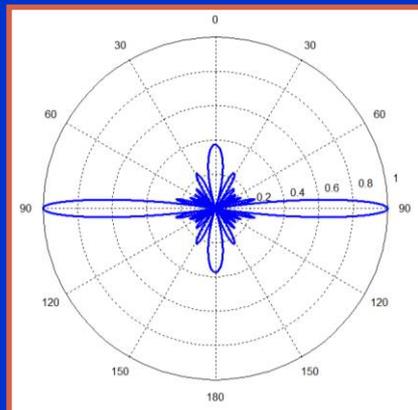
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.5$



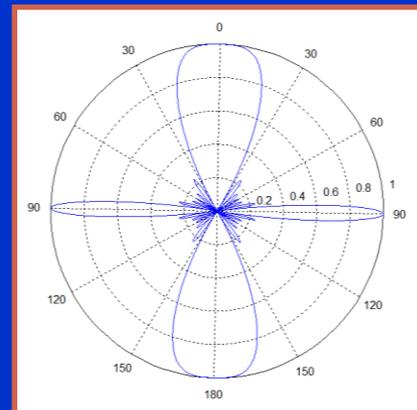
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.75$



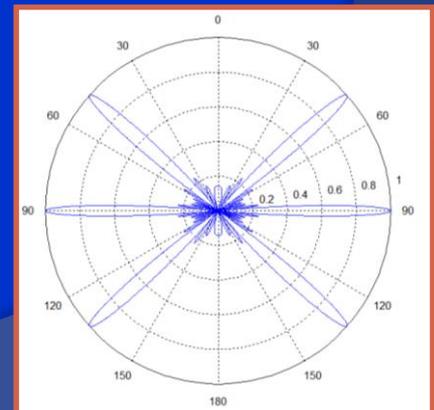
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.9$



$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=1$



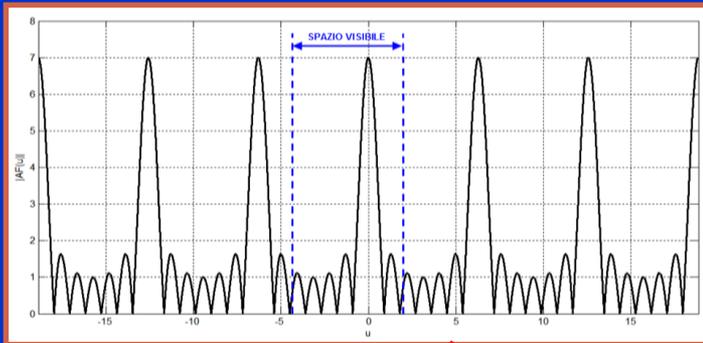
$\theta_0=90^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=1.5$



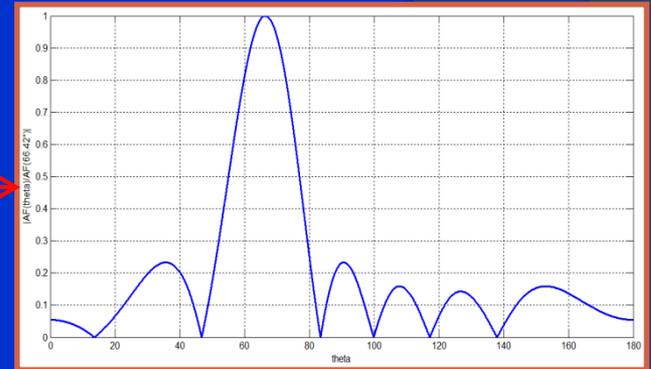
- All'aumentare del rapporto d/λ (Lunghezza o Apertura dell'array) diminuisce sia l'FNBW che l'HPBW
- quando d/λ diviene uguale ad 1 iniziano a comparire i grating-lobes (ARRAY BROADSIDE)

Effetto dello sfasamento sullo spazio visibile

Fattore di Array normalizzato nello spazio della u
 ($\theta_0 \approx 66.42^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=0.5$)



Fattore di Array normalizzato in θ (grafico rettangolare): FNBW $\approx 36.73^\circ$



Solido di radiazione

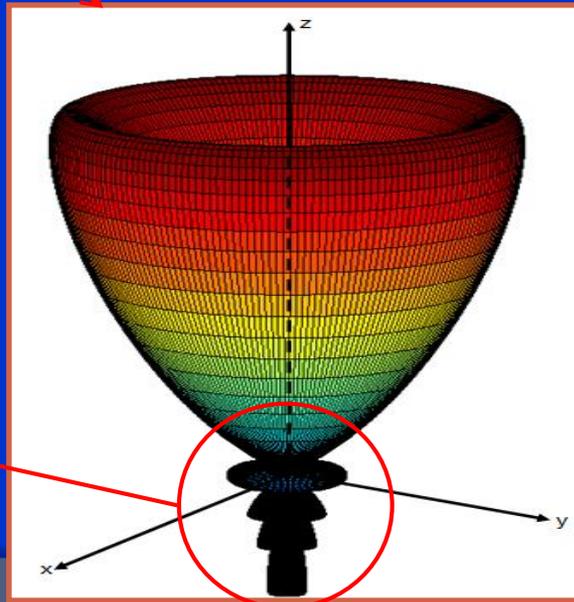
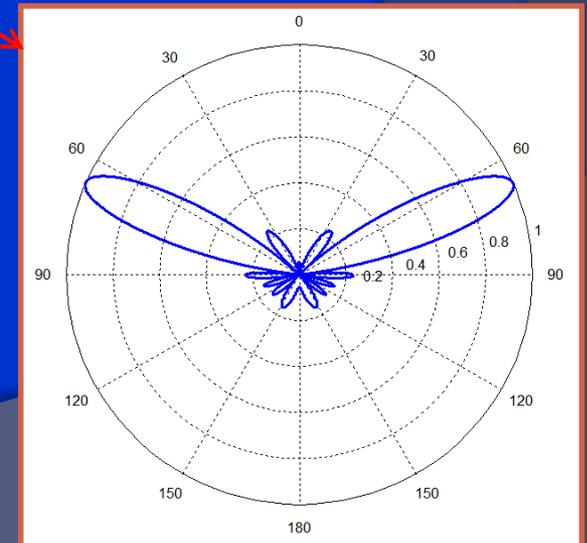
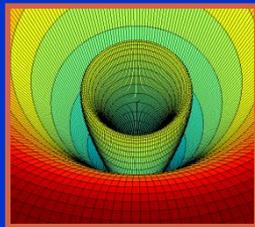


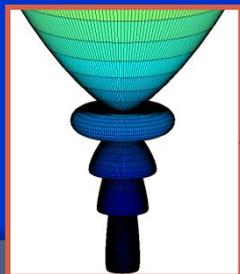
Diagramma polare in θ nel piano $x-z$



SIDELOBES
 $\theta < \theta_0$

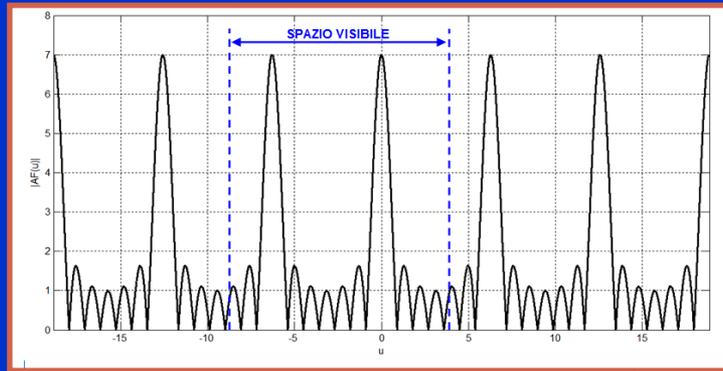


SIDELOBES
 $\theta > \theta_0$

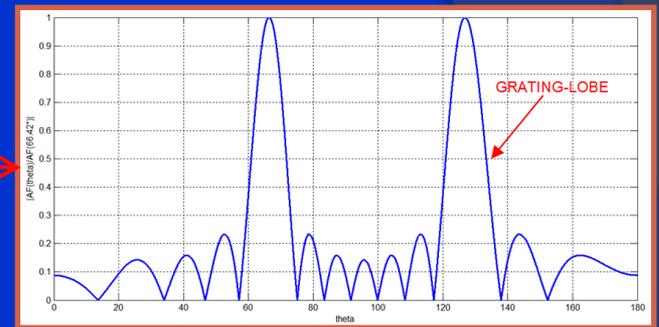


Distanza normalizzata + Sfasamento

Fattore di Array normalizzato nello spazio della u
 ($\theta_0 \approx 66.42^\circ$; $N=7$; $d/\lambda=1$)



Fattore di Array normalizzato in θ (grafico rettangolare): FNBW $\approx 17.98^\circ$



Solido di radiazione

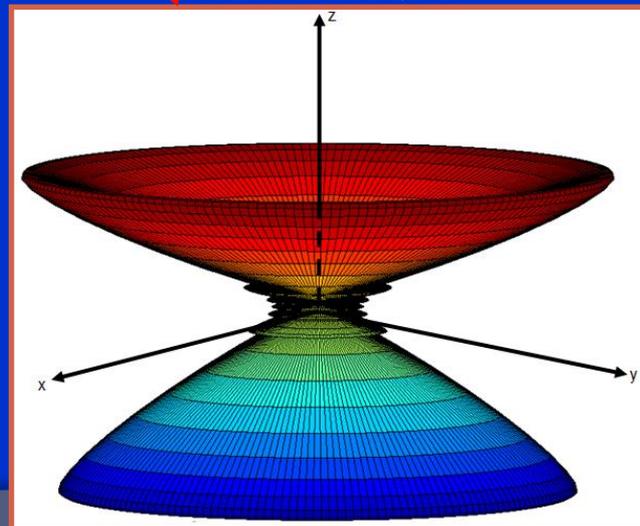
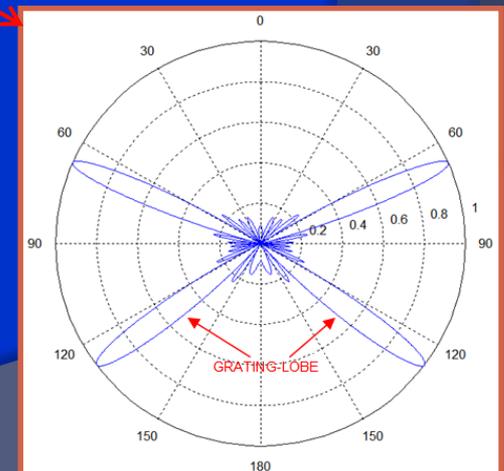
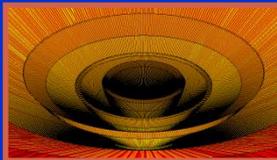


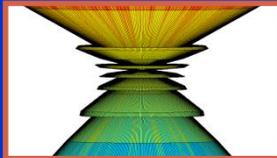
Diagramma polare in θ nel piano x-z



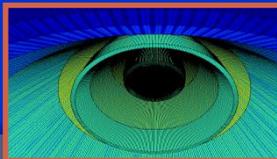
SIDELOBES
 $\theta < \theta_0$



SIDELOBES
 $\theta_0 < \theta < \theta_G$



SIDELOBES
 $\theta > \theta_G$



Distorsione del fascio durante la scansione

- Per il legame non lineare tra la variabile u e gli angoli di osservazione e di steering

$$AF_{\text{Norm.}}(u) = \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot u\right)}{\sin\left(\frac{u}{2}\right)}$$

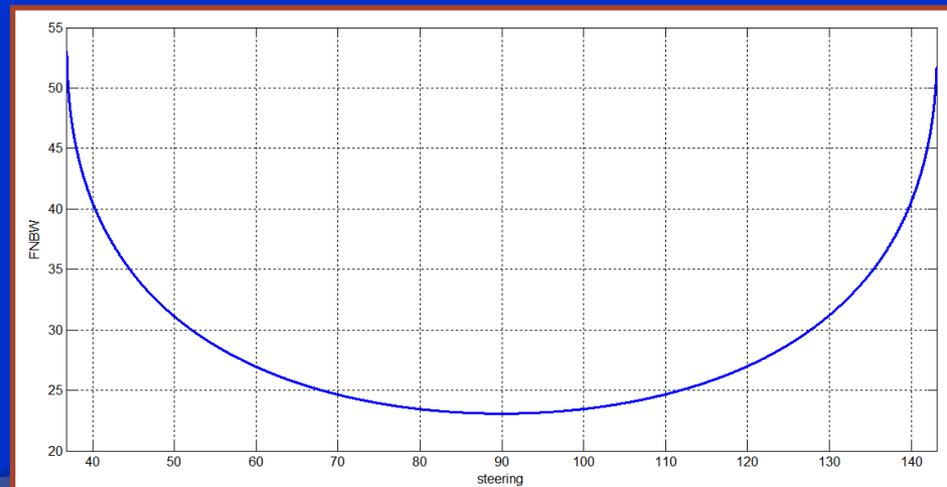


$$\text{FNBW} = \cos^{-1}\left(-\frac{c}{Nfd} + \cos \theta_0\right) - \cos^{-1}\left(\frac{c}{Nfd} + \cos \theta_0\right)$$

$$u = \frac{2\pi}{c} f d (\cos \theta - \cos \theta_0)$$

Vi è *distorsione* del fascio durante la scansione

- AVENDO POSTO: $(c/Nfd)=0.2$
- $-0.8 \leq \cos \theta_0 \leq 0.8$



Time-Delay VS. Phase-Steering

APPROCCIO DI TIPO TIME-DELAY

$$\alpha(f) = -\frac{2\pi}{c} f d \cos \theta_0$$

- La direzione di puntamento del mainlobe non varia con la frequenza
- La rete di alimentazione è più complicata rispetto alla metodologia di tipo phase-steering
- Comporta perdite in quanto i segnali percorrono lunghi percorsi prima di arrivare alle antenne
- Di norma unità Time Delay sono incorporate in configurazioni di tipo *subarrays*

APPROCCIO DI TIPO PHASE-STEERING

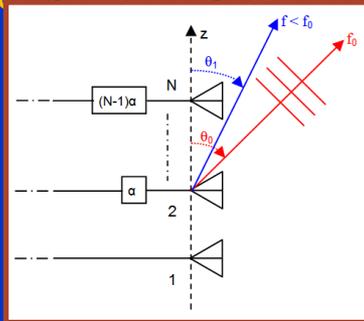
$$\alpha = -\frac{2\pi}{c} f_0 d \cos \theta_0$$

- f_0 è la frequenza di centro banda
- La direzione del massimo del mainlobe cambia con la frequenza
- Molti array utilizzano questa metodologia di sfasamento per la semplicità della rete di alimentazione
- Limita la banda di funzionamento dell'array

LE DUE METODOLOGIE SONO
EQUIVALENTI SE SI LAVORA A
SINGOLA FREQUENZA

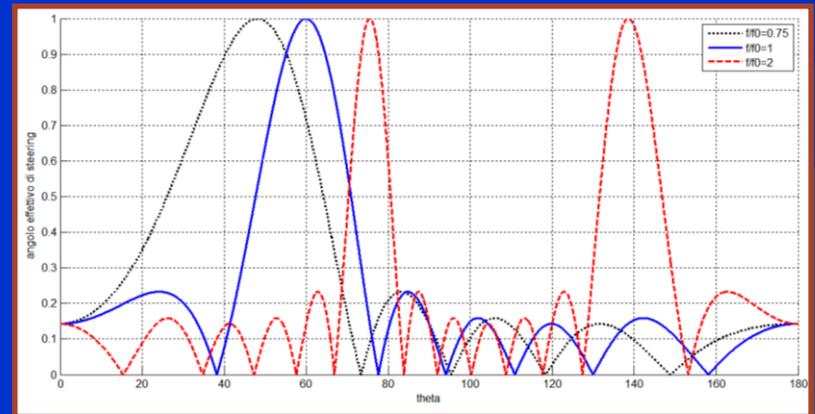
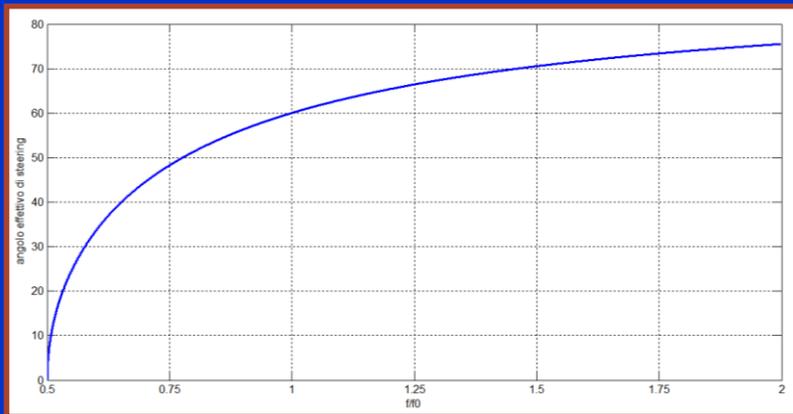
Spostamento della direzione dovuto al Phase-Steering

- In un array con approccio di tipo **phase-steering** il fronte d'onda è orientato nella direzione data dall'angolo di steering soltanto in corrispondenza di una singola frequenza;
- A frequenza diversa il massimo del mainlobe sarà orientato in una direzione diversa



$$\frac{2\pi}{c} f d \cos \theta_{\text{eff}} - \frac{2\pi}{c} f_0 d \cos \theta_0 = 0$$

$$\theta = \cos \left(\frac{f_0}{f} \cdot \cos \theta_0 \right)$$

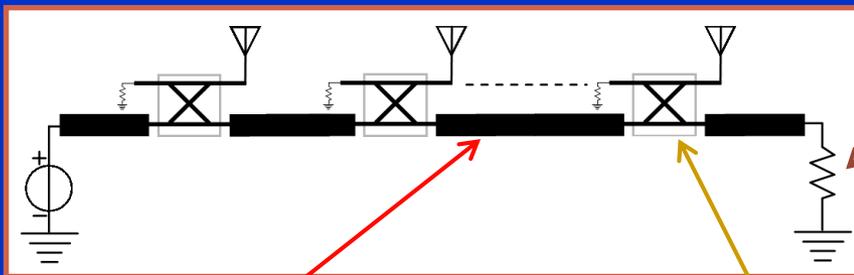


Banda: $[0.5 \cdot f_0; 2 \cdot f_0]$; Angolo di Steering desiderato: 60° ; $N=7$;

Alimentazione serie (base)

- L'alimentazione degli array può essere divisa in tre classi fondamentali:
1. Alimentazione serie;
 2. Alimentazione parallela;
 3. Alimentazione di spazio.

1.a Alimentazione serie



Lo sfasamento tra i coefficienti di eccitazione dipende dalla lunghezza della linea che separa le antenne

L'alimentazione delle antenne avviene tramite un accoppiatore direzionale

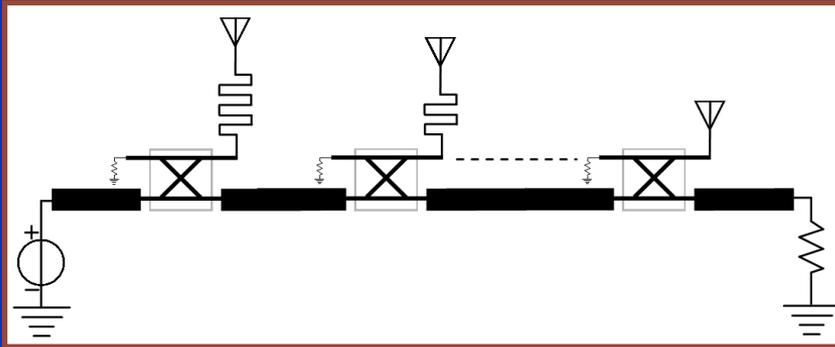
La terminazione resistiva della linea principale serve per evitare eventuali riflessioni

SVANTAGGI:

- La versione base non permette di fare scansione del fascio
- La direzione del massimo cambia al variare delle frequenza (Approccio tipo phase-steering)

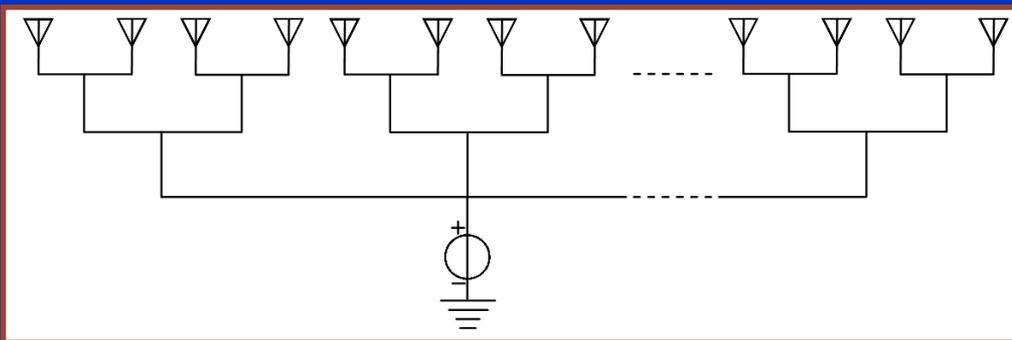
Alimentazione serie con recupero di fase e Alimentazione parallela

1.b Alimentazione serie con recupero di fase



- Facendo uso di linee a serpentina si rendono le lunghezze fisiche dei percorsi generatore-antenne tutte uguali
- In questo caso si ha un array broadside
- Bisogna utilizzare degli sfasatori per fare un phased-array

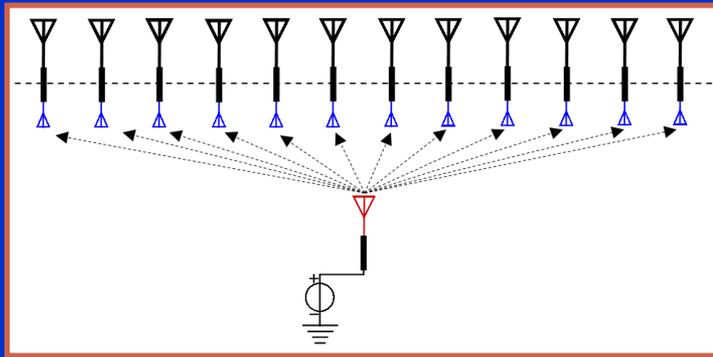
2. Alimentazione parallela



- Divisori di potenza in corrispondenza delle diramazioni
- Percorsi di segnale uguali
- Necessità di sfasatori per costituire un phased-array
- Ampiezze dei coefficienti dipendenti dai divisori di potenza

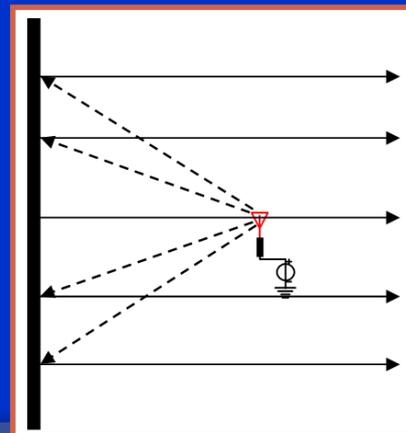
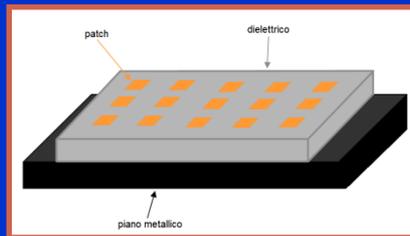
Alimentazione di spazio

3.a Alimentazione di spazio



- Ampiezze dei coefficienti controllate dal pattern dell'antenna trasmittente principale
- Fase controllata dalla lunghezza delle linee di trasmissione
- Isolamento galvanico tra generatore e antenne trasmittenti dell'array
- Perdite minimizzate per la breve lunghezza delle linee di trasmissione

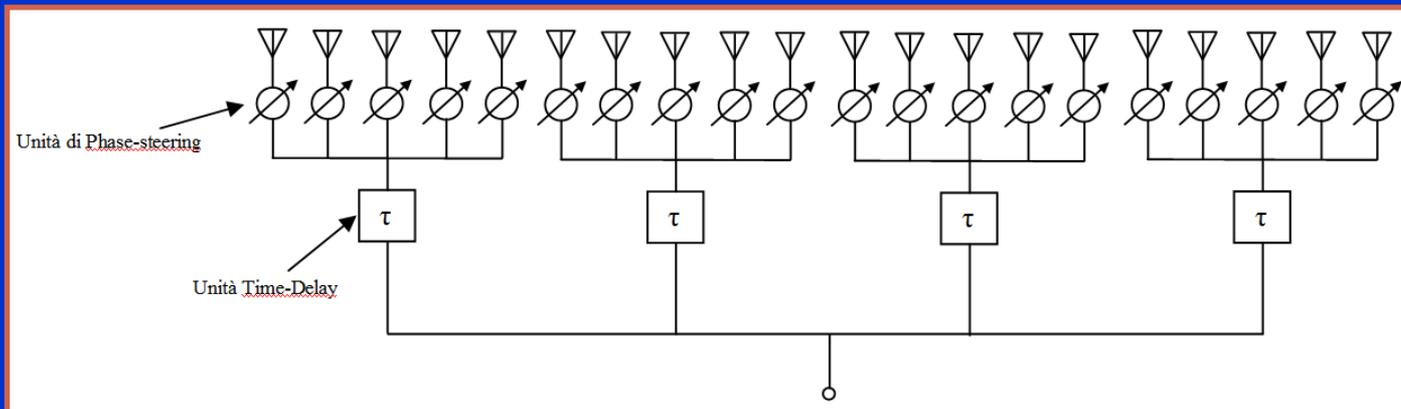
3.b Alimentazione di spazio (Reflect-Array)



- Il campo prodotto dall'array è per reirradiazione (scattering)
- Il modulo delle correnti sui patch dipende maggiormente dal pattern dell'antenna principale
- Il controllo dell'orientazione del fascio dipende dalle dimensioni dei patch

Time-Delay + Phase-Steering in Subarrays

- Combinando l'alimentazione parallela con organizzazione di tipo subarray con sfasamento time-delay+phase-steering...



- In modo equivalente è come se ogni antenne fosse collegata ad un'unità Time-Delay con un numero discreto di frequenze
- Un nuovo principio di moltiplicazione...

$$AF_{TOT}(\theta, \varphi) = AF_{SUB}(\theta, \varphi) \times AF_{ARRAY}(\theta, \varphi)$$

- $AF_{SUB}(\theta, \varphi) \leftarrow$ FATTORE DI SUBARRAY
- $AF_{ARRAY}(\theta, \varphi) \leftarrow$ FATTORE DELL'ARRAY DI SUBARRAYS

Sfasatori a diodi

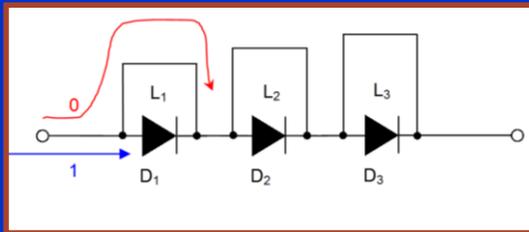
➤ SFASAMENTO DISCRETO

$$\alpha = m \cdot \alpha' = m \cdot \frac{2\pi}{2^B}$$

- m : Numero Intero
- B : numero di bit dello sfasatore

➤ SFASATORI A DIODI

- Sono realizzati con tecnologia a microstriscia
- Supportano bassa potenza
- Lavorano a bassa frequenza, poiché i diodi sono a radiofrequenza



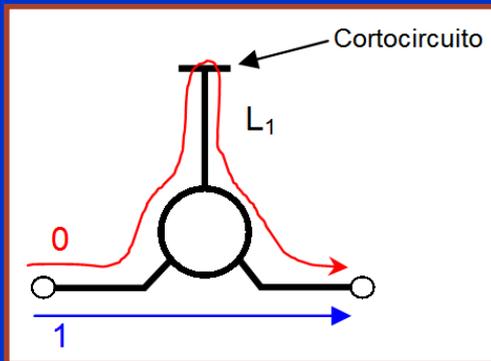
$$L_1 = \lambda/8; L_2 = \lambda/4; L_3 = \lambda/2$$

D3	D2	D1	ϕ
1	1	1	0
1	1	0	45°
1	0	1	90°
1	0	0	135°
0	1	1	180°
0	1	0	225°
0	0	1	270°
0	0	0	315°

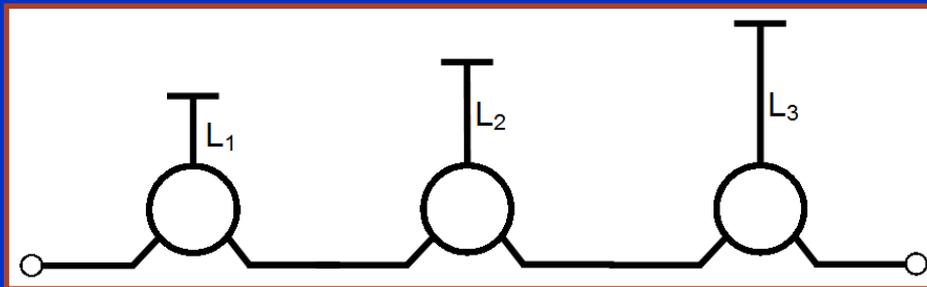
$$B \cong \log_2(N)$$

Sfasatori a circolatori

- Se si necessita di sfasatori con potenza più elevata e a più alta frequenza



- Sono realizzati in guida d'onda
- Supportano un elevato livello di potenza
- Sono controllati andando ad agire sulla ferrite



$$L_1 = \lambda/8; L_2 = \lambda/4; L_3 = \lambda/2$$

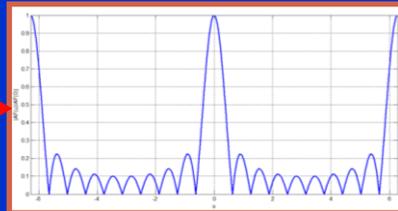
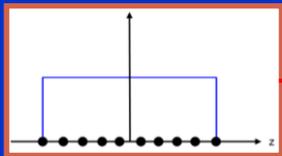
**SFASATORE A
CIRCOLATORI A 3 BIT**

Classificazione delle tecniche di sintesi di array a spaziatura uniforme

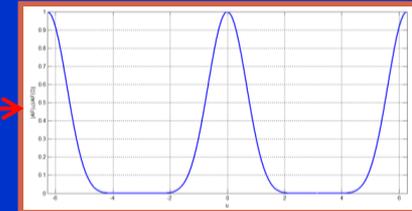
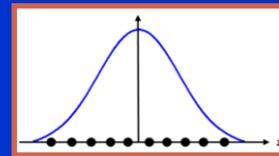
- La sintesi del fattore di array è più conveniente farlo nel dominio della u ;
- Per array a spaziatura uniforme si possono identificare 3 categorie di metodi di sintesi:
 1. Sintesi della “taperatura” di ampiezza e fase (*Shaping*)
 - Sintesi di Fourier
 - Sintesi di Woodward-Lawson
 - Sintesi ai minimi quadrati
 2. Sintesi analitica della “taperatura” dell’ampiezza (Soluzioni *Low Sidelobe-level*)
 - Taper Binomiale
 - Taper Triangolare
 - Taper Cosinusoidale
 - Taper alla Dolph-Chebyshev (per array piccoli; metodo di Tseng-Cheng per array planari)
 - Taper alla Taylor (one-parameter e Chebyshev-error)
 - Taper alla Bickmore-Spellmire
 - Taper alla Bayliss (Difference-Pattern)
 - Formulazione polinomiale alla Shelkunoff
 - Taperatura Parziale
 3. Sintesi per mezzo di metodi numerici

“Taperature” di Ampiezza Classiche

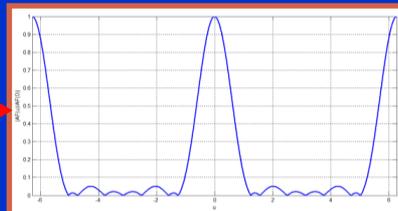
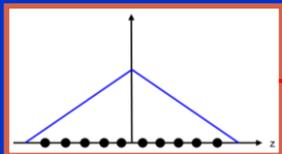
DISTRIBUZIONE UNIFORME



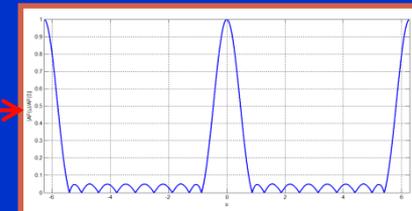
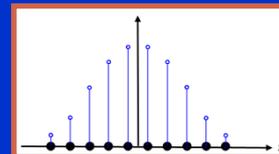
DISTRIBUZIONE BINOMIALE



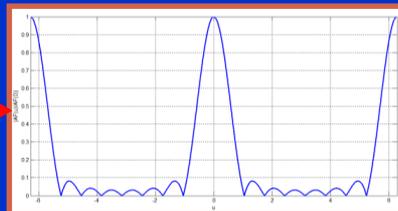
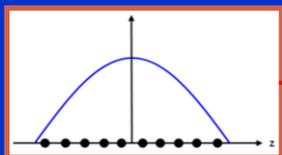
DISTRIBUZIONE TRIANGOLARE



DISTRIBUZIONE ALLA CHEBYSHEV



DISTRIBUZIONE COSINUSODALE



DISTRIBUZIONE	SLL (scala lineare)	SLL(dB)
uniforme	≈ 0.22	-13.3
triangolare	≈ 0.047	-26.5
cosinusodiale	≈ 0.0708	-23
binomiale	0	$-\infty$
Chebyshev	≈ 0.05	-26

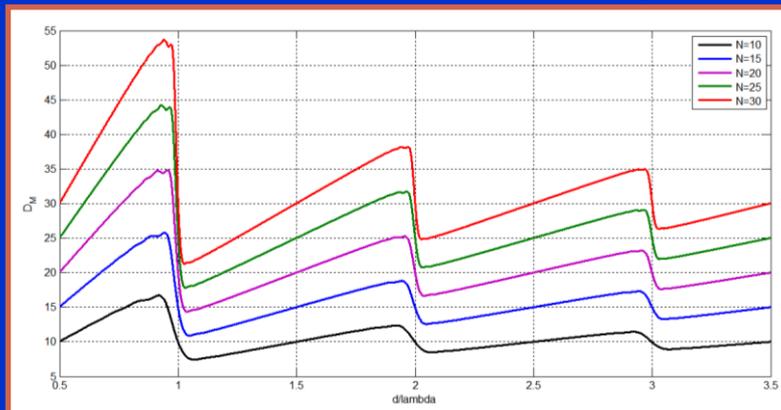
Direttività in funzione di N e confronto tra “taperature”

➤ Per la direttività, in generale...

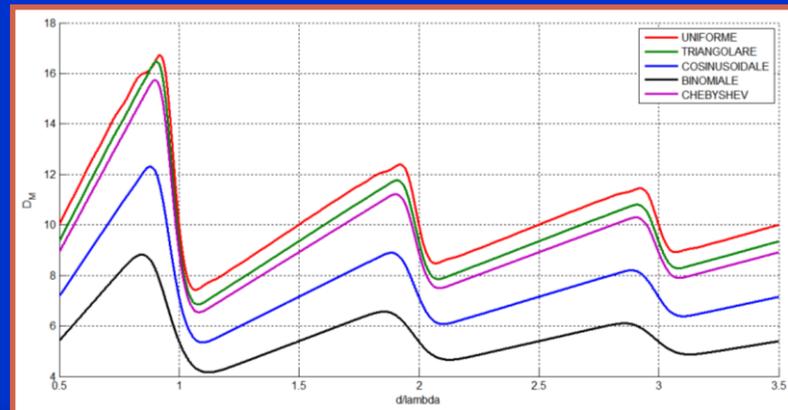
$$D_M = \frac{\left| \sum_{n=0}^{N-1} a_n \right|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} a_n \cdot a_m \cdot e^{j(\alpha_n - \alpha_m)} \cdot \text{sinc} \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot (z_n - z_m) \right]}$$

a_n : coefficienti
reali

Direttività Array Uniforme Parametrizzata rispetto ad N



Confronto della Direttività tra Taperature diverse (N=10)



Problema della spaziatura uniforme

- Condizione “Free Grating-Lobes” per qualunque Steering $\rightarrow d \leq \lambda/2$;
- Condizione di validità dell’ipotesi dei Accoppiamenti-Mutui $\rightarrow d \geq \lambda/2$;
- Contraddizione nell’assicurare la validità delle due condizioni contemporaneamente
- Inoltre, per le applicazioni a larga banda...

Array di tipo
broadside ($\theta_0 = \pi/2$)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2\pi}{c} f_{\text{MAX}} d \cos \theta \rightarrow d \leq \frac{c}{f_{\text{MAX}}} \\ \frac{d}{\lambda_{\text{MAX}}} \geq \frac{1}{2} \Rightarrow d \geq \frac{c}{2f_{\text{min}}} \end{array} \right.$$

$$\frac{c}{f_{\text{MAX}}} \geq \frac{c}{2f_{\text{min}}}$$

$$\frac{f_{\text{MAX}}}{f_{\text{min}}} \leq 2$$

...ma nelle applicazioni si ha bisogno di elevati rapporti di banda ($f_{\text{MAX}}/f_{\text{min}}$)

Giustificazione della spaziatura non uniforme

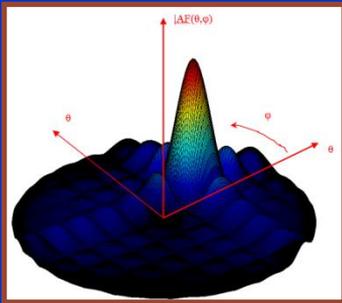
- Allo stato attuale è chiaro che...



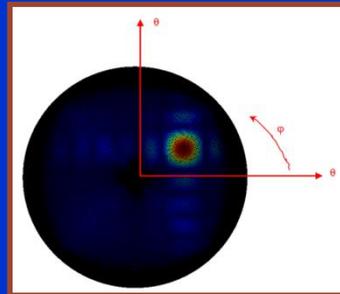
Array planare uniforme e di Tseng-Cheng

➤ ARRAY PLANARE UNIFORME : 10 x 10, $(\theta_0, \varphi_0) = (30^\circ, 30^\circ)$

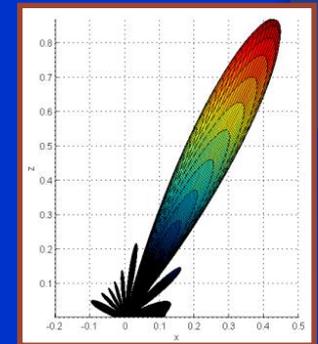
Rapp. Assonometrica



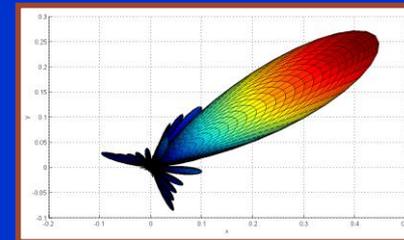
Vista in θ - φ



Solido di radiazione in x-z



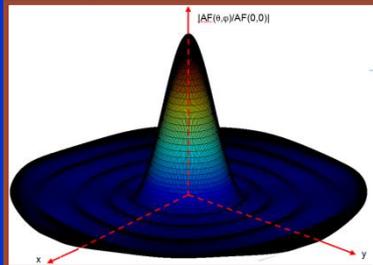
Solido di radiazione in x-y



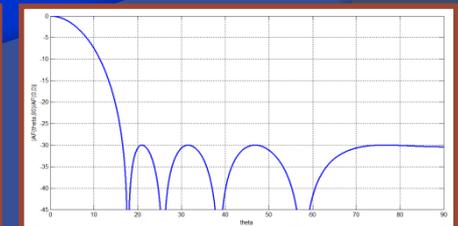
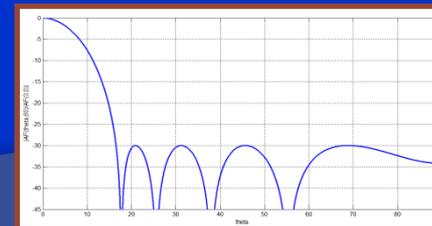
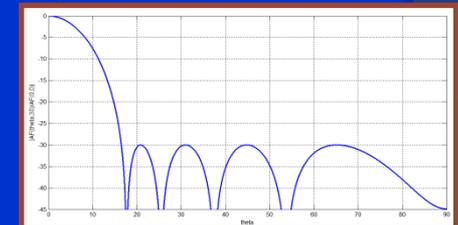
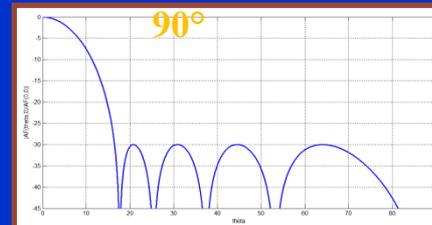
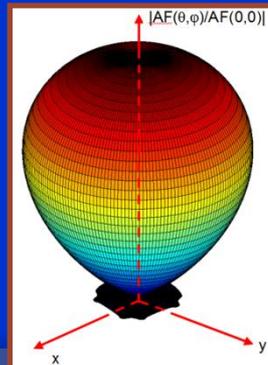
➤ ARRAY PLANARE DI TSENG-CHENG : 10 x 10, SLL = -30 dB per ogni φ

Solido di radiazione per $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

Rapp. Assonometrica



Solido di radiazione



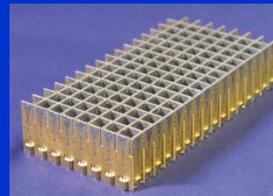
Esempi di Array nella pratica

➤ Alcuni esempi di array...

Array di fessure



Array di antenne Vivaldi



Array di antenne

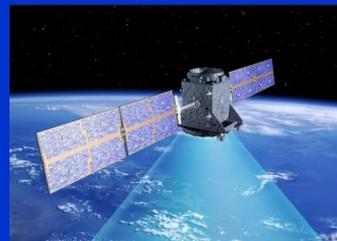
A parabola



AESA (Active Electronically Scanned Array)



Radar ad apertura sintetica



Antenna Yagi-Uda

