

2^η Προαιρετική Εργασία
(Προθεσμία Παράδοσης 7 Ιουλίου 2025)

Η εργασία πραγματοποιείται την **σχεδίαση διατάξεων διαμόρφωσης δέσμης (Beamformers)** με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab. Το λογισμικό μπορείτε να το βρείτε ελεύθερα από τον παρακάτω σύνδεσμο (προτιμήστε έκδοση μεταγενέστερη της R2023b):

https://it.auth.gr/service/matlab/?tab=service_procedure

Άσκηση 1η:

Στο υπόμνημα που ακολουθεί θα βρείτε έναν κώδικα εντολών Matlab για την διαμόρφωση και την στροφή μιας δέσμης ακτινοβολίας. Η δέσμη αυτή δημιουργείται από μια ομοιόμορφη γραμμική στοιχειοκεραία επτά στοιχείων που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $d = \lambda/2$ και λειτουργεί στην συχνότητα $f = 1GHz$.

Ο κώδικας εντολών συμπεριλαμβάνει τον ορισμό των παραμέτρων της προσομοίωσης, τον υπολογισμό της πεδιακής μεταβολής ως προς τον χρόνο και την θέση και τον υπολογισμό του παράγοντα της στοιχειοκεραίας καθώς και τις απεικονίσεις αυτών.

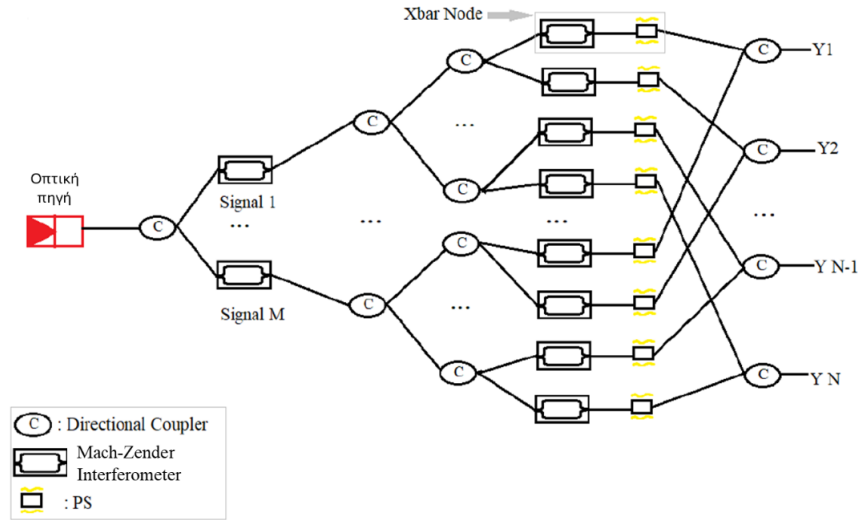
A) Χρησιμοποιώντας τον κώδικα εντολών, απεικονίστε την πεδιακή κατανομή και τον παράγοντα της στοιχειοκεραίας για τέσσερις διαφορετικές γωνίες στροφής της δέσμης της επιλογής σας (μεταξύ 0° και 180°) σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Δοκιμάστε έπειτα για τις τέσσερις γωνίες που επιλέξατε να απεικονίσετε την δέσμη ακτινοβολίας αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ των στοιχείων σε $d = \lambda/4$. Τι παρατηρείτε?

B) Προσπαθήστε να τροποποιήσετε τον κώδικα εντολών, ώστε να προσομοιώσετε δύο ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες με πέντε και εννέα στοιχεία αντίστοιχα. Υποθέστε και πάλι απόσταση μεταξύ των στοιχείων $d = \lambda/2$ και λειτουργία στην συχνότητα $f = 1GHz$. Απεικονίστε την πεδιακή κατανομή και τον παράγοντα της στοιχειοκεραίας για τις κεραίες των πέντε και εννέα στοιχείων σε δύο διαφορετικές γωνίες στροφής της δέσμης της επιλογής σας (μεταξύ 0° και 180°). Τι παρατηρείτε ως προς την παραγόμενη δέσμη σε κάθε περίπτωση?

Γ) Επιλέξτε οποιαδήποτε από τις παραπάνω στοιχειοκεραίες (πέντε, επτά ή εννέα στοιχεία), την λειτουργία των οποίων προσομοιώσατε, και εφαρμόστε διωνυμική κατανομή στα σχετικά πλάτη του παράγοντα της στοιχειοκεραίας. Τι παρατηρείτε ως προς την παραγόμενη δέσμη? Υποθέστε και πάλι απόσταση μεταξύ των στοιχείων $d = \lambda/2$ και λειτουργία στην συχνότητα $f = 1GHz$.

Άσκηση 2η:

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ένα δίκτυο διαμόρφωσης δέσμης μιας φασικής στοιχειοκεραίας που λειτουργεί στις οπτικές συχνότητες (Optical Phased Array).

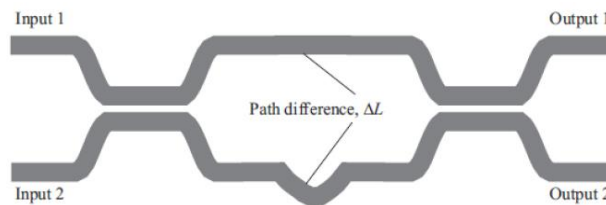


Εικόνα 1: Δίκτυο Διαμόρφωσης Δέσμης

Το δίκτυο αυτό υποστηρίζει τον σχηματισμό και την διαμόρφωση M ανεξάρτητων δεσμών ακτινοβολίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δίκτυο τροφοδοσίας μιας οποιασδήποτε στοιχειοκεραίας N στοιχείων. Η λειτουργία του ως δίκτυο διαμόρφωσης δέσμης βασίζεται στην χρησιμοποίηση των «κόμβων Xbar» ως σημεία καθορισμού του πλάτους και της φάσης του διερχόμενου σήματος πριν αυτό οδηγηθεί ως σήμα τροφοδοσίας σε κάθε στοιχείο της στοιχειοκεραίας. Κάθε κόμβος Xbar αποτελείται από ένα συμβολόμετρο Mach-Zehnder και ένα στοιχείο ολίσθησης της φάσης (φασιθέτης).

Ο φασιθέτης (phase shifter) εισάγει μια ολίσθηση στην φάση του διερχόμενου σήματος της μορφής $e^{j\varphi}$.

Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Εικόνα 2) παρέχει την δυνατότητα αλλαγής του πλάτους των εξερχόμενων σημάτων από αυτό, όταν τα οπτικά μήκη των δύο βραχιόνων από τους οποίους αποτελείται διαφέρουν μεταξύ τους (ΔL). Μάλιστα η διαφορά των δύο οπτικών μηκών καθορίζει και το πλάτος των εξερχόμενων σημάτων.



Εικόνα 2: Mach-Zehnder Interferometer

Η παρακάτω σχέση περιγράφει τις εκφράσεις του ηλεκτρικού πεδίου στις εξόδους του συμβολομέτρου συναρτήσει των πεδίων εισόδου, έχοντας θεωρήσει ότι τόσο ο διαχωριστής ισχύος στην είσοδο, όσο και ο συζεύκτης στην έξοδο έχουν λόγο σύζευξης/διαχωρισμού 1:2/2:1.

$$\begin{bmatrix} E_{01}(f) \\ E_{02}(f) \end{bmatrix} = e^{-j\beta(2l+L)} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & j/\sqrt{2} \\ j/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\beta\Delta L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & j/\sqrt{2} \\ j/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{bmatrix}$$

Ένας τρόπος να προκύψει διαφορά στο οπτικό μήκος μεταξύ των δύο κλάδων του συμβολομέτρου είναι η εφαρμογή ολίσθησης φάσης (μέσω κατάλληλου φασιθέτη-phase shifter) σε κάποιον από τους κλάδους. Σε αυτή την περίπτωση, ο δείκτης διάθλασης του υλικού κατασκευής του συμβολομέτρου μεταβάλλεται τοπικά οδηγώντας σε ολίσθηση την φάση του διερχόμενου κύματος.

Ας θεωρήσουμε ότι ο παράγοντας μιας γραμμικής στοιχειοκεραίας N στοιχείων, η οποία βρίσκεται επί του άξονα x ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων δίνεται από την έκφραση:

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N |a_n| e^{j\varphi_n} e^{jnk d_x \cos\varphi \sin\theta}$$

Όπου οι όροι $|a_n|$ και φ_n εκφράζουν τα πλάτη και τις φάσεις των σημάτων τροφοδοσίας των επιμέρους στοιχείων ενώ θ είναι η πολική και φ η αζιμουθιακή γωνία ενός σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων. Ο όρος d_x περιγράφει την απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε γειτονικών στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Τηρώντας την γενικότητα για την μεγιστοποίηση του πεδίου σε μία κατεύθυνση θ_0 (επί του επιπέδου $\varphi=0^\circ$), οι φάσεις τροφοδοσίας ορίζονται ως εξής:

$$\varphi_n = -nk d_x \sin\theta_0$$

Τα μιγαδικά βάρη $a_n = |a_n| e^{j\varphi_n} = |a_n| e^{-jnk d_x \sin\theta_0}$ εφαρμόζονται στα σήματα τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας επιτυγχάνοντας μέγιστο της δέσμης ακτινοβολίας σε συγκεκριμένη συχνότητα και κατεύθυνση $(0, \theta_0)$. Ο παράγοντας της στοιχειοκεραίας σε αυτή την περίπτωση γίνεται:

$$AF(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N |a_n| e^{jnk d_x (\sin\theta - \sin\theta_0)}$$

Α) Χρησιμοποιώντας την λογική προσομοίωσης με κώδικα εντολών της Άσκησης 1, αποδείξτε ότι σε ένα σύστημα διαμόρφωσης μίας οπτικής δέσμης 1:8 (ένα σήμα τροφοδοσίας και 8 στοιχεία ακτινοβολίας, με βάση την Εικόνα 1), οι φάσεις που πρέπει να τεθούν στους φασιθέτες (έξω από το συμβολόμετρο), ώστε να προκύψει στροφή της δέσμης κατά 30° , 60° και 90° είναι αυτές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Αποτυπώστε σε πολικά διαγράμματα το μέτρο του παράγοντα της στοιχειοκεραίας όπου φαίνονται οι παραπάνω στροφές της δέσμης.

Πίνακας 1: Τιμές των φασιθετών (PS) όλων των διαδρομών για κάθε κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας.

Κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας (degrees):	Πρώτη έξοδος (rad):	Δεύτερη έξοδος (rad):	Τρίτη έξοδος (rad):	Τέταρτη έξοδος (rad):	Πέμπτη έξοδος (rad):	Έκτη έξοδος (rad):	Έβδομη έξοδος (rad):	Όγδοη έξοδος (rad):
0°	0	0	0	0	0	0	0	0
30°	0	2,657	2,1724	1,6878	1,2032	0,7186	0,234	5,5319
60°	0	2,9921	5,9842	2,6931	5,6852	2,3941	5,3862	2,0951
90°	0	1,4077	2,8153	4,2230	5,6307	0,7551	2,1628	3,5705

Θεωρήστε ότι τα στοιχεία της στοιχειοκεραίας βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις από τα γειτονικά τους $d=\lambda/2$ και το σύστημα λειτουργεί στα 1550nm.

Β) Περιγράψτε ποιοτικά ποια διαδικασία θα ακολουθούσατε ώστε να εφαρμόσετε διωνυμική κατανομή στα πλάτη των σημάτων τροφοδοσίας της στοιχειοκεραίας. Πως θα μπορούσε να υλοποιηθεί κάτι τέτοιο στην πράξη?

Σημείωση: Σε κάθε άσκηση αναφέρετε όλα τα βήματα της διαδικασίας σχεδίασης και της δημιουργίας κώδικα εντολών.

Τέλος συντάξτε ένα σύντομο report για κάθε σειρά ασκήσεων με κείμενο, κώδικες και διαγράμματα σε μορφή .pdf και αποστείλετε το με e-mail στο dketzaki@ece.auth.gr.

Υπόμνημα Άσκησης 1

```
clear all; clc;

%% Simulation parameters
freq = 1e9;      % Hz
c = 3e8;         % free space speed
lambda = c/freq;
T = 1/freq;
omega = 2*pi*freq;
k = 2*pi/lambda;
az = 7;          % Number of array elements

Ns = 30;         % Number of samples per wavelength
ds = lambda/Ns;  % Spatial Discretization

Nt = 35;         % Number of time samples per period
dt = T/Nt;       % Temporal discretization
t = 0:dt:(1*T);  % Increase the number of periods here for longer simulations

R = (0*lambda):ds:(8*lambda);
Ntheta = 240;    % Number of angular discretization
dtheta = 2*pi/Ntheta;

theta = 0:dtheta:(2*pi);

deltaAll=0:dtheta:2*pi;

%% Generate Domain
x=R.*cos(theta);
y=R.*sin(theta);

%% Output properties
teal = [ 0 0.5 0.5]; % maps for unconventional coloring
origBrownColor=[114/256 70/256 43/256];

%% Animate
for ps=1:length(deltaAll) % Sweep through angles

    delta=deltaAll(ps);

    % for it=1:length(t) % Sweep through time
    for it=1:1 % For t=0

        % --- d=lambda/2 -----
        d = lambda/2;
        %=== Update the distances below when adding/removing array elements===
        r1y=0; r1x=-3*d;
        r2y=0; r2x=-2*d;
        r3y=0; r3x=-d;
        r4y=0; r4x=0;
        r5y=0; r5x=d;
        r6y=0; r6x=2*d;
        r7y=0; r7x=3*d;

        %=== Update below when adding/removing array elements===
        for ix=1:length(R)
            for iy=1:length(theta)
                R1=sqrt( (x(ix,iy)-r1x)^2 + (y(ix,iy)-r1y)^2 );
                E1(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R1 + delta*-3) ;

                R2=sqrt( (x(ix,iy)-r2x)^2 + (y(ix,iy)-r2y)^2 );
                E2(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R2 + delta*-2) ;

                R3=sqrt( (x(ix,iy)-r3x)^2 + (y(ix,iy)-r3y)^2 );
```

```

E3(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R3 + delta*-1) ;

R4=sqrt( (x(ix,iy)-r4x)^2 + (y(ix,iy)-r4y)^2 );
E4(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R4 + delta*0) ;

R5=sqrt( (x(ix,iy)-r5x)^2 + (y(ix,iy)-r5y)^2 );
E5(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R5 + delta*1) ;

R6=sqrt( (x(ix,iy)-r6x)^2 + (y(ix,iy)-r6y)^2 );
E6(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R6 + delta*2) ;

R7=sqrt( (x(ix,iy)-r7x)^2 + (y(ix,iy)-r7y)^2 );
E7(ix,iy) = cos(omega * t(it) - k*R7 + delta*3) ;

end
end

E=E1+E2+E3+E4+E5+E6+E7;

% -----

% Array factor
f1=figure (10); clf; set(gcf,'Color',[1 1 1]); Fs=10;
sp1=subplot(1,2,1); set(gca,'FontSize',Fs);
d = lambda/2;
A = ones(1,az); % (Relative) Amplitude distribution for each array element

Fa=zeros(1,length(theta));
for i=0:(length(A)-1)
    temp = (A(i+1) * exp(-1i*i*delta + 1i*k*(i*d-((length(A)-1)/2)*d)*cos(theta)));
    Fa = Fa + temp;
end

Fa=abs(Fa);
kk=polar(theta,-Fa/max(Fa)); hold on; axis off

% Remove ticks from graph
set(findall(gca,'String','210'),'String',' ');
set(findall(gca,'String','240'),'String',' ');
set(findall(gca,'String','270'),'String',' ');
set(findall(gca,'String','300'),'String',' ');
set(findall(gca,'String','330'),'String',' ');

%%
pcolor(x/max(max(x)),y/max(max(y)),E); shading interp;
pbaspect([1 1 1]); %axis off;
ylim([0 1])

kk=polar(theta,-Fa/max(Fa),'k'); set(kk,'LineWidth',2); hold on;
set(sp1,'Position',[0 0 1 1])

xlabel(['Antenna separation: d=\lambda/2'],'FontSize',Fs+2,'FontName','Century Gothic')
text(-0.85,1.15,['{\bf Relative phase difference: \delta=' num2str(floor(delta/pi*180))
'^{\circ}'],'FontSize',Fs+2,'Color',teal,'FontName','Century Gothic')

% Array locations (For visualization)
%=== Update the text(...) commands below when adding/removing array elements===
yoffset=0.04;
xloc=-0.02; yloc=0.067;
text(xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)
text(d/max(max(x))+xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)
text(2*d/max(max(x))+xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)
text(3*d/max(max(x))+xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)
text(-d/max(max(x))+xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)
text(-2*d/max(max(x))+xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)
text(-3*d/max(max(x))+xloc,yloc-yoffset,1,'.','FontSize',Fs+12)

end

end

```