



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

***BEAMFORMING RADAR PHASED MIMO DENGAN
UKURAN SUBARRAY TRANSMIT SERBASAMA***

Aris Sanjaya Nst
NRP 2212 100 121

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***BEAMFORMING PHASED MIMO RADAR WITH EQUAL
TRANSMIT SUBARRAYS***

Aris Sanjaya Nst
NRP 2212 100 121

Supervisors
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

BEAMFORMING RADAR PHASED MIMO DENGAN UKURAN SUBARRAY TRANSMIT SERBASAMA



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

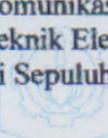
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada

Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Jurusan Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Menyetujui :



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Dosen Pembimbing,



ITS

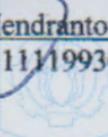
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Prof. Ir. Gamantyo Hendranto, M.Eng, Ph.D.

NIP. 197011111993031002

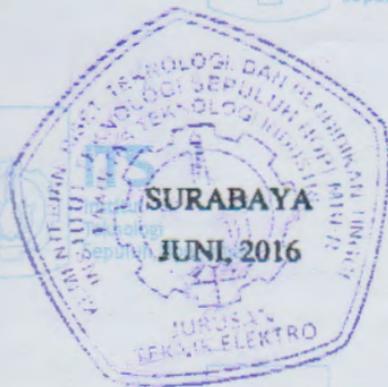
ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SURABAYA

JUNI, 2016

JURUSAN
TEKNIK ELEKTRO



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Beamforming Radar Phased MIMO dengan Ukuran Subarray Transmit Serbasama

Nama : Aris Sanjaya Nst
Pembimbing : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Beberapa tahun terakhir ini banyak penelitian untuk meningkatkan performa radar. Salah satu teknik yang digunakan adalah teknik radar *phased-array* dan radar MIMO (*Multi Input Multi Output*). Radar yang menggunakan teknik ini, disamping memiliki kelebihan masih banyak terdapat kekurangan pada masing-masing metode. Lemahnya *gain*, kemampuan deteksi target yang terbatas, tidak tahan terhadap interferensi merupakan contoh-contoh kekurangan teknik tersebut.

Pada penelitian ini diperkenalkan teknik baru dalam MIMO radar dengan menggunakan *colocated* antena yang disebut dengan radar *phased MIMO*. Radar ini berawal dari ide untuk pengelompokan beberapa elemen antena kedalam beberapa *subarray* dan diperbolehkan saling *overlap*. Teknik baru ini mengambil keuntungan radar MIMO tanpa mengorbankan keunggulan utama radar *phased-array* yang menggunakan pemrosesan *gain* koheren. Setiap *subarray* digunakan sebagai elemen MIMO yang memiliki jumlah elemen yang sama banyak. *Subarray* tersebut digunakan untuk mentransmisikan sinyal yang saling *orthogonal* terhadap sinyal yang ditransmisikan *subarray* lain. Pemrosesan *gain* koheren dapat diperoleh dengan mendesain sebuah vektor bobot untuk setiap *subarray* untuk membentuk *beam* pada arah tertentu.

Keunggulan yang dimiliki teknik radar *phased MIMO* akan dibandingkan dengan teknik radar *phased-array* dan radar MIMO dengan melakukan simulasi menggunakan *software MatLab* untuk menganalisis pola beam (*beampatterns*) dan SINR yang diperoleh.

Kata Kunci : pola beam, radar MIMO, radar *phased-array*, SINR

Beamforming Phased-MIMO Radar with Equal Transmit Subarrays

Name : Aris Sanjaya Nst
Advisors : Prof. Ir. Gamantyo Hendratoro, M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

In a few years later a lot of research has been to improve the performance of the radar. One technique used is the technique of phased *array* radar and MIMO radar (Multi Input Multi Output). Radar using this technique, besides having the advantages there are still have many weakness in each method. Weak gain, target detection capabilities are limited, not resistant to interference are examples of such techniques deficiency.

In this research proposed a new techniques in MIMO radar using the colocated antenna which called phased MIMO radar. Radar originated from the idea of grouping multiple antenna elements into several *subarray* and allowed to overlap. The new technique takes advantage of MIMO radar without compromising the main advantages of phased *array* radar which is the coherent processing gain at the transmitting side. Then, each *subarray* used as MIMO element that has the same number. The *subarray* used to transmit waveform which is orthogonal to the waveform transmitted by other *subarray*. Coherent processing gain can be obtained by designing a weight vektor for each *subarray* to form a beam towards a certain direction.

The advantages of phased MIMO radar technique will be compared with phased *array* radar techniques and MIMO radar by simulations using MatLab software through analyzing the corresponding beampatterns and the achievable output Signal to Interference and Noise Ratio

Key Word : beampattern, MIMO radar, phased *array* radar, SINR

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
ABSTRAK.....	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Pembahasan	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Terminologi Antena [4].....	7
2.2 Antena <i>Array</i> [3]	9
2.2.1 <i>Uniform Linear Array</i>	10
2.3 <i>Gain</i> Antena	13
2.4 Pola Radiasi dan Faktor <i>Array</i> [3].....	14
2.5 Parameter Pola Radiasi [4].....	19
2.5.1 Perkalian Pola	20
2.6 Sistem Radar	21
2.7 Sistem MIMO [2].....	22

2.8 Model Matematika radar <i>phased-</i> MIMO [1]	23
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Spesifikas Sistem Radar	31
3.2 Pemodelan Sinyal <i>Transmit</i>	33
3.3 Pemodelan Sinyal Pantul dari Target [1]	35
3.4 Pemodelan Sinyal pada <i>receiver</i> [1]	35
3.5 Beamforming [1].....	36
3.6 SINR [1].....	37
3.7 Simulasi MatLab	39
BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI	41
4.1 Analisis Kinerja radar	41
4.1.1 <i>Transmit Beampattern</i>	41
4.1.2 Pemodelan <i>Diversity Beampattern</i>	45
4.1.3 Pemodelan Overall <i>Beampattern</i>	50
4.1.4 Pengujian Kinerja SINR	54
4.2 Pengujian lebih lanjut (<i>Subarray S= 1-10</i>)	56
4.2.1 Pengujian <i>Main beam width</i> dengan (<i>S = 1-10</i>).....	56
4.2.2 Trend Line <i>Mainbeam width</i>	59
4.2.3 Pengujian <i>Side lobe level</i> dengan (<i>S = 1-10</i>)	60
4.2.4 Trend Line <i>Side lobe level</i>	62
4.2.5 Pengujian <i>Level Gain</i> dengan (<i>S = 1-10</i>).....	63
4.3 Sintesis	66
BAB 5 PENUTUP	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69
RIWAYAT PENULIS	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram alir pengerjaan Tugas Akhir	4
Gambar 2.1 <i>Array</i> Linier. Arus output	9
Gambar 2.2 <i>Array</i> linier X-elemen	10
Gambar 2.3 Konfigurasi <i>array</i> linear dengan sumber isotropis [3].	11
Gambar 2.4 Pola Radiasi <i>Endfire</i> [3]	14
Gambar 2.5 Pola Radiasi <i>Broad side</i> [3].....	15
Gambar 2.6 Pola Radiasi <i>Intermediate</i> [3].....	15
Gambar 2.7 Pola radasi diplot pada bidang <i>rectangular</i> [4]	17
Gambar 2.8 Pola radasi diplot pada bidang <i>polar</i> [4]	18
Gambar 2.9 Polar plot pola radiasi suatu antena	18
Gambar 2.10 Cara menentukan AF sebagai fungsi polar[3]	18
Gambar 2.11 (a) collinier array, (b) Paralel array[3].....	21
Gambar 2.12 Sistem Radar [5].....	22
Gambar 2.13 Diagram Blok Radar [5]	22
Gambar 3.1 Ilustrasi <i>subarray</i> (a) Radar <i>phased array</i> ,.....	32
Gambar 3.2 Sinyal radar <i>phased array</i>	33
Gambar 3.3 Sinyal Radar MIMO	33
Gambar 3.4 Sinyal Radar <i>Phased</i> MIMO (S=5).....	34
Gambar 4.1 Hasil Simulasi Beamforming pada sisi <i>Transmit</i>	41
Gambar 4.2 Kinerja <i>Main beam width</i> radar pada 10°	42
Gambar 4.3 Kinerja <i>Side lobe level</i> , target terletak pada 10°	43
Gambar 4.4 Kinerja <i>Level Gain</i> dari ketiga metode <i>subarray</i>	44
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Beamforming dengan <i>diversity</i>	46
Gambar 4.6 Kinerja <i>Main beam width</i> radar pada 10°	47
Gambar 4.7 Kinerja <i>Side lobe level</i> , target terletak pada 10°	48
Gambar 4.8 Kinerja <i>Level Gain</i> dari ketiga metode <i>subarray</i>	49
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Beamforming pada <i>receiver</i>	50
Gambar 4.10 Kinerja <i>Main beam width</i> radar pada 10°	51
Gambar 4.11 Kinerja <i>Side lobe level</i> , target terletak pada 10°	52
Gambar 4.12 Kinerja <i>Level Gain</i> dari ketiga metode <i>subarray</i>	53
Gambar 4.13 Kinerja SINR (INR=30 dB)	55
Gambar 4.14 Kinerja SINR (INR= -30 dB)	56
Gambar 4.15 <i>Transmit Beam width</i> dengan <i>Subarray</i> S (S=1-10).....	57
Gambar 4.16 <i>Diversity Beam width</i> dengan <i>Subarray</i> S (S=1-10)	58
Gambar 4.17 Overall <i>Main Beam width</i> dengan <i>Subarray</i> (S=1-10)....	59
Gambar 4.18 Kurva <i>Main beam width</i> terhadap Jumlah <i>Subarray</i>	59

Gambar 4.19 <i>Transmit Side lobe level</i> dengan <i>Subarray</i> (S=1-10)	60
Gambar 4.20 <i>Diversity Side lobe level</i> dengan <i>Subarray</i> (S=1-10)	61
Gambar 4.21 <i>Overall Side lobe level</i> dengan <i>Subarray</i> S (S=1-10).....	62
Gambar 4.22 Kurva <i>Side lobe level</i> terhadap Jumlah <i>Subarray</i>	62
Gambar 4.23 <i>Transmit Gain</i> dengan <i>Subarray</i> S (S=1-10)	63
Gambar 4.24 <i>Diversity Gain</i> dengan <i>Subarray</i> S (S=1-10)	64
Gambar 4.25 <i>Overall Gain</i> dengan <i>Subarray</i> S (S=1-10).....	65
Gambar 4.26 Kurva <i>Level Gain</i> terhadap Jumlah <i>Subarray</i>	66

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Parameter Simulasi	31
Tabel 4.1 Kinerja <i>Main beam width</i> dari Pemancar menuju target	42
Tabel 4.2 Kinerja SLL dari Pemancar menuju target.....	44
Tabel 4.3 Kinerja <i>Gain</i> dari Pemancar menuju target.....	45
Tabel 4.4 Kinerja <i>Beam width Diversity</i>	47
Tabel 4.5 Kinerja <i>Side lobe level Diversity</i>	48
Tabel 4.6 Kinerja <i>Gain Diversity</i>	49
Tabel 4.7 Kinerja <i>Beam width</i> dari target menuju Penerima.....	51
Tabel 4.8 Kinerja SLL dari target menuju Penerima	53
Tabel 4.9 Kinerja <i>Gain</i> dari target menuju Penerima.....	54

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan di bidang teknologi berkembang dengan pesat. Kemajuan tersebut menuntut kemajuan dalam segala bidang, termasuk juga dalam bidang radar. Teknologi radar yang pada awalnya diciptakan untuk tujuan pertahanan terus dikembangkan. Tujuan baru yang dikembangkan untuk kemajuan teknologi radar telah diarahkan dan didorong radar skala mikro yang diaplikasikan dalam teknik biomedik, sampai ke radar skala makro yang digunakan dalam ilmu astronomi. Pengembangan terbaru dalam teknologi radar didasarkan pada ide bahwa sinyal dapat diolah secara koheren pada antenna pengirim atau antenna penerima jika sinyal koheren bisa dipertahankan. Teknik radar yang demikian dikenal dengan nama *phased array* radar.

Beberapa dekade terakhir, muncul ide baru untuk pengembangan teknik yang lebih bagus dalam radar dikenal dengan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) radar yang menjadi fokus penelitian. Konsep utama dari MIO radar adalah penggunaan beberapa antenna untuk memancarkan sinyal *orthogonal* dan menggunakan beberapa antenna untuk menerima sinyal yang dipantulkan oleh target. Penggunaan konsep MIMO radar dalam mentransmisikan sinyal *orthogonal* dari antenna yang berbeda, biasa disebut dengan *waveform diversity*.

Dalam menanggapi kemajuan tersebut banyak penelitian yang dilakukan dalam bidang radar. Radar (*Radio Detection and Ranging*) merupakan sistem elektromagnetik untuk mendeteksi posisi dan kecepatan dari suatu objek, bekerja dengan memancarkan sinyal elektromagnetik dan menerima sinyal *echoes* dari objek (target). Radar banyak dikembangkan terutama untuk meningkatkan akurasi posisi dan kecepatan objek (target) yang diamati. Pengembangan, pada umumnya dilakukan dengan mengganti *waveform* atau bentuk sinyal dan jumlah antenna yang digunakan.

Metode MIMO ini terinspirasi dari penggunaannya pada sistem seluler. Dengan menggunakan antenna MIMO bisa meningkatkan performa dari sistem yang ditunjukkan dengan akurasi dalam mendeteksi target, meningkatkan DoF (*Degree of Freedom*), dan menguatkan kemampuan dalam menahan fluktuasi RCS target terhadap sinyal yang

berbeda. Radar MIMO ini sangat berbeda dengan teknologi yang terdahulu yaitu sistem radar SISO (*Single Input Single Output*), yang hanya mengirimkan satu bentuk gelombang pada saat yang bersamaan. Pengukuran kecepatan radial (*radial velocity*) dari sebuah target yang bergerak, direalisasikan dengan cara mengukur pergeseran frekuensi Doppler (Doppler frequency shift), yang diproduksi oleh target, dimana perbedaan sinyal yang dipancarkan dan sinyal yang diterima akan dihitung. Kekuatan dan bentuk pulsa dari radar juga akan membawa informasi tentang karakteristik bentuk dan materialnya, dari target yang dipantulkan. Seluruh target menghasilkan pantulan yang berpenyerakan, dan pantulan ini disebarkan ke segala arah. Sinyal direfleksikan disebut juga *scattering*. *Backscatter* merupakan hasil refleksi yang berlawanan dengan pancaran yang terjadi. Pantulan ini akan diterima kembali oleh radar untuk dianalisis dan diolah.

Di sisi lain, phased-array dengan penggabungan sinyal secara koheren dan pembobotan elemen yang tepat mampu mengarahkan main beam pada arah tertentu dengan gain yang tinggi tanpa harus memutar array.

Sinyal radar dapat ditampilkan pada *plan position indicator* (PPI) atau pada tampilan sistem radar yang lain. Sebuah radar memiliki sebuah vektor rotasi dengan radar pada sumber, dimana mengindikasikan arah tujuan dari antena dan sudut awal target.

Pada tugas akhir ini akan dirancang simulasi radar dengan antena MIMO radar yang dikombinasikan dengan *phased array* antena untuk menghasilkan teknik baru yang dinamakan dengan *phased MIMO* radar. Hasilnya akan dibandingkan antara penggunaan *array transmit* sebasama dengan radar *phased-array* dan radar MIMO. Keunggulan dari MIMO radar ini nantinya akan lebih baik lagi karena penggunaan teknologi *phased array* dan MIMO.

1.2 Permasalahan

Penelitian pada tugas akhir ini dilakukan melalui perumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana melakukan pemodelan antena *Uniform Linear Array* (ULA) pada beberapa teknik *array* antena.
2. Bagaimana metode analisis kinerja *phased MIMO* radar (Main *beam width*, *Side lobe level*, *Gain*, dan SINR) dengan elemen *transmit* serbasama kemudian dibandingkan dengan kinerja dua metode lain yaitu : *Phased Array* radar, dan MIMO radar.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Software simulasi yang digunakan adalah MatLab.
2. Parameter yang digunakan adalah radar antenna 10 elemen yang dibagi menjadi S subarray. ($S= 1,2,3,\dots,10$)
3. Setiap subarray antenna memiliki karakteristik dan jumlah yang sama, subarray yang berdekatan saling overlapping.
4. Bentuk gelombang radar yang digunakan adalah gelombang pulsa (pulsed radar) yang mentransmisikan gelombang elektromagnetik secara berkala.
5. Parameter yang diukur adalah *level gain*, lebar main lobe, *Side lobe level*, dan SINR.

1.4 Tujuan

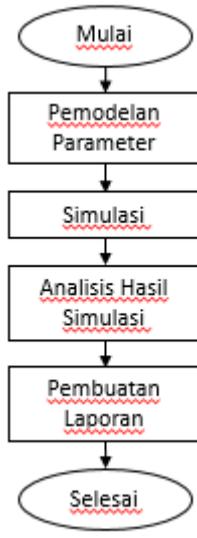
Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Memperkenalkan karakter teknik baru pengembangan MIMO radar dengan antenna colocated yang disebut dengan *Phased MIMO radar* dengan melakukan simulasi MatLab.
2. Menganalisa performansi dari *Phased MIMO Radar* dengan subarray transmit/receive serbasama dibandingkan dengan *Phased Array Radar* dan *MIMO Radar* melalui simulasi yang dilakukan.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur *Phased Array Radar*, *MIMO Radar*, *Phased MIMO Radar*.
2. Melakukan pemodelan awal, didalamnya termasuk menentukan parameter parameter yang akan disimulasikan. Parameter tersebut diantaranya adalah jumlah antenna *transmit*, antenna *receive*, jumlah subarray, dan berbagai parameter lainnya.
3. Mensimulasikan desain dengan menggunakan software MatLab. Software yang digunakan adalah MatLab 2014a, versi yang digunakan sudah mumpuni untuk penelitian ini.
4. Menganalisa performansi hasil simulasi yang dilakukan, kemudian membandingkannya untuk memperoleh kesimpulan.
5. Menyusun buku Tugas Akhir



Gambar 1.1 Diagram alir pengerjaan Tugas Akhir

1.6 Sistematika Pembahasan

Pembahasan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan sistematika pembahasan sebagai berikut:

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi tugas akhir ini.

BAB 2 Dasar Teori

Bab ini berisikan tentang teori-teori yang mendasari antenna *array* linier, *phased array* radar, MIMO radar, dan *Phased MIMO* radar

BAB 3 Metode Simulasi

Bab ini menjelaskan tentang pemodelan sistem dari simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini.

BAB 4 Analisis dan Hasil Simulasi

Bab ini berisikan hasil simulasi dan analisis dari hasil simulasi yang dilakukan.

BAB 5 Kesimpulan dan saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Tugas akhir ini dapat dijadikan acuan untuk membandingkan antara penggunaan *phased array* radar, MIMO radar, dan *phased* MIMO radar dalam pembentukan beam antena *array* linier. Sistem ini dapat diterapkan dalam sistem yang lebih kompleks.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Terminologi Antena [4]

Antena di definisikan sebagai suatu perangkat yang digunakan untuk meradiasikan atau menerima gelombang radio. Pada sistem komunikasi nirkabel (*wireless*), antena dipakai untuk proses transmisi dan deteksi. Antena didefinisikan juga sebagai peralatan peralatan untuk proses coupling frekuensi radio dari transmisi kabel menuju ruang bebas, meradiasikan daya ke ruang bebas, dan sebaliknya. Antena memiliki desain yang beragam mulai dari yang sederhana seperti sepotong kabel, sampai dengan desain yang rumit dengan komponen elektronik aktif. Karena merupakan perangkat perantara antara saluran transmisi dan udara, maka antena harus memiliki sifat yang sesuai (*match*) dengan saluran pencatunya.

Dari definisi diatas antena dapat diterapkan dalam beberapa fungsi sebagai berikut :

- Antena pemancar *broadcast* untuk memancarkan sinyal dari satu titik menuju area yang sangat luas, misalnya antena pemancar radio FM, antena pemancar Televisi, antena GPS (*Global Positioning System*) dan sebagainya.
- Antena komunikasi *point to point* untuk mentransfer sinyal dari suatu tempat ke tempat yang lain, misalnya antena sistem transmisi *terrestrial*, antena sistem satelit, dan sebagainya.
- Antena penerima yang difungsikan untuk menerima sinyal, baik dari pemancar buatan manusia (dalam kasus *broadcast* ataupun *point to point*) atau menerima sinyal bebas dari langit (dalam kasus radiometer, pengukuran *noise temperature* atmosfer, atau radio *sonde* untuk mencari bintang di langit).

Secara umum, antena dibedakan menjadi antena *isotropis*, antena *omnidirectional*, antena *directional*, antena *phased- array*, antena optimal, dan antena adaptif. Antena *isotropis* merupakan titik yang memancarkan daya ke segala arah dengan intensitas yang sama, seperti permukaan bola. Antena ini tidak ada dalam dunia nyata dan hanya dipergunakan sebagai dasar untuk merancang dan menganalisis antena yang lebih kompleks. Antena *omnidirectional* adalah antena yang memancarkan daya ke segala arah, dan bentuk pola radiasinya digambarkan sebagai bentuk donat (*doughnut*) dengan pusat berimpit.

Antena ini ada dalam kenyataan dan dalam pengukuran sering digunakan sebagai pembandingan terhadap antena yang lebih kompleks. Contoh antena ini adalah antena *dipole* setengah panjang gelombang. Antena *directional* adalah antena yang memancarkan daya menuju arah tertentu. *Gain* antena dari antena ini relatif lebih besar dibandingkan dengan antena *omnidirectional*. Contoh, suatu antena dengan *gain* 10 dBi (kadang kadang dinyatakan dengan “dBic” atau disingkat “dB” saja). Artinya antena ini pada arah tertentu memancarkan daya 10 dB lebih besar dibandingkan dengan antena *isotropis*. Ketiga jenis antena diatas merupakan antena tunggal, dan bentuk pola radiasinya tidak dapat berubah tanpa merubah fisik antena atau memutar secara mekanik dari fisik antena.

Selanjutnya adalah antena *phased-array*. Antena yang merupakan gabungan atau konfigurasi *array* dari beberapa elemen antena sederhana dan menggabungkan sinyal yang menginduksi masing-masing antena tersebut untuk membentuk pola radiasi tertentu pada keluaran *array*. Setiap antena yang menyusun konfigurasi *array* dinamakan dengan elemen *array*. Arah *gain* maksimum dari antena *phased-array* dapat ditentukan dengan pengaturan fase antar elemen-elemen *array*. Dengan penggabungan sinyal secara koheren dan pembobotan elemen yang tepat akan diperoleh arah *main beam* pada sudut tertentu dengan *gain* yang tinggi tanpa mengubah posisi *array* antena.

Antena optimal merupakan antena dimana penguatan (*gain*) dan fase relatif setiap elemennya diatur sedemikian rupa untuk menghasilkan kinerja (*performance*) pada keluaran yang seoptimal mungkin. Kinerja yang dimaksud adalah antara lain *Signal to Interference Ratio* (SIR) atau *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR). *Optimasi* kinerja dapat dilakukan dengan menghilangkan atau meminimalkan penerimaan sinyal-sinyal yang tidak dikehendaki (interferensi) dan mengoptimalkan penerimaan sinyal yang dikehendaki.

Antena adaptif merupakan pengembangan dari antena *phased-array* maupun antena optimal, pengembangannya memungkinkan arah *gain* maksimum diatur sesuai dengan gerakan dinamis (*dynamic fashion*) objek yang dituju. Antena ini sangat cocok untuk *tracking* suatu objek, yang sangat berguna pada dunia militer. Antena ini dilengkapi dengan *Digital Signal Processor* (DSP), sehingga secara dinamis mampu mendeteksi dan melacak berbagai macam tipe sinyal, meminimalkan interferensi serta memaksimalkan penerimaan sinyal yang diinginkan.

2.2 Antena Array [3]

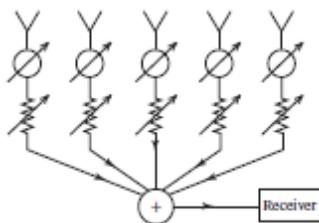
Diagram radiasi dari sebuah antena secara tersendiri (*single antena*) biasanya relatif lebar, misalnya dipole setengah panjang gelombang ($1/2 \text{ lambda}$) memiliki *beam width* 78° , atau *dipole* dengan panjang lambda 48° . Antena yang memiliki *beam width* lebar akan memiliki direktivitas dan *gain* yang relatif rendah.

Pada komunikasi jarak jauh seperti radar, dibutuhkan antena yang memiliki *gain* yang tinggi. Dengan *gain* yang tinggi ini, bisa didapatkan nilai *Equivalent Isotrop Radiated Power* (EIRP) yang juga tinggi, yang otomatis membuat jangkauan (*range*) yang lebih besar.

Pada aplikasi radar digunakan antena yang memiliki *beam width* yang sangat sempit, yang akan menentukan resolusi sudut dari radar tersebut, sehingga bisa mendeteksi objek-objek yang berdekatan sebagai objek deteksi yang terpisah.

Untuk mendapatkan antena yang seperti ini, kita bisa memperbesar ukuran dari antena itu sampai melebihi panjang gelombangnya. Tetapi alternatif seperti ini akan melahirkan masalah baru, yaitu munculnya *side lobe* tambahan dengan peredaman yang mengganggu. Makin panjang atau besar antena tersebut, maka makin banyak pula *side lobes*-nya. Hal ini juga membuat masalah yang berkaitan dengan mekanis dari antena yang terus membesar.

Dalam penelitian ini dipergunakan cara lain, yaitu dengan menggunakan beberapa antena yang disusun menurut konfigurasi geometris dan elektrik tertentu. Susunan antena ini disebut dengan *array* (grup antena). Antena-antena yang disusun menjadi grup atau kelompok ini merupakan antena yang memiliki tipe sejenis (misal *array dipole*, *array waveguide*, *array mikrostrip*).

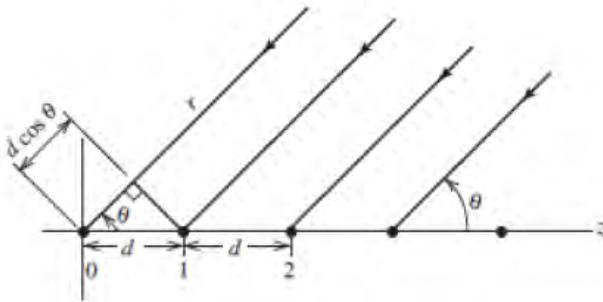


Gambar 2.1 *Array* Linier. Arus output dijumlahkan sebelum masuk ke *receiver* [3].

Medan listrik atau medan magnet total dari *array* adalah superposisi secara vektorial medan yang dihasilkan dari masing-masing antena. Dalam menghasilkan suatu diagram radiasi tertentu, ke arah pancar yang diprioritaskan untuk mendapatkan direktivitas yang tinggi, diupayakan medan vektornya saling bersuperposisi secara konstruktif (saling menjumlahkan), sedang ke arah pancar yang lain yang diinginkan memiliki direktivitas rendah superposisinya diupayakan berlangsung secara destruktif (saling mengurangi).

2.2.1 Uniform Linear Array

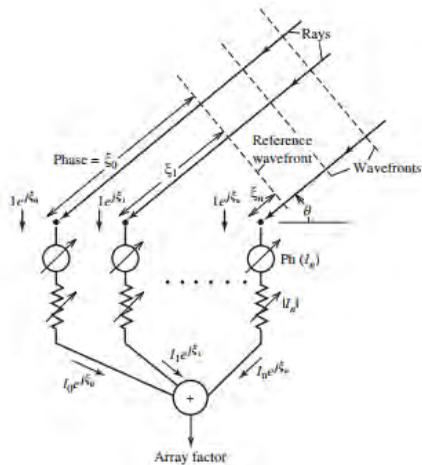
Uniform Linear array merupakan jenis susunan antena *array* dengan jarak antar elemen dan amplitude bernilai seragam. Elemen antena *array* disusun sedemikian rupa sehingga membentuk satu garis lurus.



Gambar 2.2 *Array* linier X-elemen

Gambar 2.2 menunjukkan jenis susunan antena *array* dengan jarak antara elemen dan amplitude bernilai seragam, yang terdiri dari sumber titik berupa elemen radiator isotropis. Sudut θ merupakan sudut yang dibentuk dari gelombang datang menuju elemen *array* sepanjang sumbu z . Respon dari sumber *isotropis* sama di segala arah, tetapi ketika keluaran ditambahkan (masing-masing diberi bobot berdasarkan I_x), diperoleh respon arah. Fase dari gelombang datang pada *array* dimulai dari 0 jadi $\psi_0 = 0$. Gelombang datang pada elemen 1 datang sebelum fase gelombang datang pada sumbu dengan jarak yang lebih pendek $d \cos \theta$. Selisih fase antar elemen yang berdekatan adalah $\psi_1 = \beta d \cos \theta$, dimana ψ_0, ψ_1, \dots adalah fase gelombang datang pada elemen antena yang ditandai dengan $0, 1, \dots$.

Dasar dari pemodelan antenna *array* terbagi menjadi dua bagian, pertama merupakan pola radiasi dari masing-masing elemen *array*, yang disebut dengan pola radiasi elemen, dan pola radiasi dari *array* dimana tiap elemen merupakan antenna isotropis, yang disebut sebagai *array* faktor (AF). Total pola radiasi antenna *array* kemudian merupakan hasil perkalian antara pola radiasi elemen dengan faktor *array*.



Gambar 2.3 Konfigurasi *array* linear dengan sumber isotropis [3].

Array menerima sejumlah gelombang datar yang datang dari arah θ dengan nilai fase seragam (ditinjau dari referensi *wavefront*). Jika referensi *wavefront* digunakan untuk referensi fase nol, maka elemen ke N mengalami keterlambatan fase (yang dengan perkalian terhadap nilai k) sebesar ψ_x . Amplitudo eksitasi bernilai konstan karena gelombang datar memiliki amplitudo yang seragam sehingga menghasilkan nilai eksitasi sebesar $1e^{j\psi_0}, 1e^{j\psi_1}, \dots$. Selanjutnya, faktor *array* pada gambar 2.3 merupakan hasil penjumlahan dari respon penerima radiator isotropis $\{e^{j\psi_0}, e^{j\psi_1}, \dots\}$ dan mengalami pembobotan berdasarkan nilai amplitudo maupun pergeseran fase arus kompleks $\{I_0, I_1, \dots\}$. Secara matematis, persamaan umum dari faktor *array* adalah :

$$AF = I_0 e^{j\psi_0} + I_1 e^{j\psi_1} + I_2 e^{j\psi_2} + \dots + I_x e^{j\psi_x} \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 merupakan persamaan umum faktor elemen antenna yang dapat digunakan untuk berbagai geometri *array*. *Array faktor* dari sebuah antenna *array* X-elemen bisa didapatkan dengan mempertimbangkan elemen sebagai titik sumber. Jika setiap elemennya bukan merupakan sumber isotropis, maka total medan yang dapat dibentuk adalah hasil perkalian antara *array faktor* dari sebuah sumber *isotropis* dengan medan dari elemen tunggal.

Untuk *array* linier X-elemen *array faktor* yang dapat dibentuk adalah sebagai berikut :

$$AF = 1 + e^{j(kd \cos \theta + \alpha)} + e^{j2(kd \cos \theta + \alpha)} + \dots + e^{j(X-1)(kd \cos \theta + \alpha)} \quad (2.2)$$

dimana :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, d = \text{jarak antar elemen}, \theta = \text{sudut antar elemen}, \\ \alpha = \text{beda fase}, X = \text{Jumlah elemen antenna}$$

Jika $\psi = kd \cos \vartheta + \alpha$, rumus *Array Faktor* diatas dapat ditulis sebagai :

$$AF = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(X-1)\psi} \quad (2.3)$$

Jika ruas kiri dan ruas kanan kita kalikan dengan $e^{j\psi}$, maka

$$AF \cdot e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + e^{j4\psi} + \dots + e^{jX\psi} \quad (2.4)$$

$$AF \cdot e^{j\psi} - AF = e^{jX\psi} - 1 \quad (2.5)$$

$$AF (e^{j\psi} - 1) = e^{jX\psi} - 1 \quad (2.6)$$

$$AF = \frac{e^{jX\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} = \frac{e^{j\frac{X\psi}{2}} e^{j\frac{X\psi}{2}} - e^{-j\frac{X\psi}{2}}}{e^{j\frac{\psi}{2}} e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}}} \quad (2.7)$$

$$AF = e^{j(X-1)\frac{\psi}{2}} \frac{\sin(\frac{X\psi}{2})}{\sin(\frac{\psi}{2})} \quad (2.8)$$

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{X\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.9)$$

$$AF_{\max} = X \quad (2.10)$$

Persamaan (2.2) – (2.10) merupakan fungsi dari faktor *array* ternormalisasi untuk X-elemen dari linier *array* dengan eksitasi amplitudo arus yang serbasama, atau lebih dikenal dengan *Uniform Linier Array* (ULA).

Beberapa hal yang dapat diperhatikan pada faktor *array* untuk berbagai jumlah elemen pada *array* adalah :

1. Jumlah X bertambah maka *main beam* dan *main lobe* akan menjadi lebih sempit
2. Menambah jumlah X maka akan menambah jumlah *side lobe* dalam satu periode dari fungsi $f(\psi)$. Jumlah keseluruhan *lobe* (satu *main lobe* dan sejumlah *side lobe*) dalam satu periode adalah sejumlah X-1, sehingga ada X-1 *side lobe* dan satu *main lobe* dalam setiap periodenya.
3. *Minor Lobe* mempunyai lebar $2\pi/X$, sedangkan untuk *lobe* utama dan *grating lobe* mempunyai lebar dua kali lipatnya.

2.3 Gain Antena

Gain atau penguatan antena didefinisikan sebagai perbandingan antara rapat daya per satuan *unit* antena terhadap rapat antena referensi dalam arah dan daya yang sama, persamaan *gain* dinyatakan sebagai :

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta, \vartheta)}{P_{in}} \quad (2.11)$$

dimana $U(\theta, \vartheta)$ adalah intensitas radiasi, dan P_{in} adalah total daya di antena. Perhitungan *gain* antena dapat dilakukan menggunakan perbandingan level daya yang diterima terhadap daya yang dikirim dengan bantuan antena referensi sebagai pembanding. Jika dilakukan analisis terhadap skala logaritmik maka *gain* dinyatakan dalam satuan *decibel* (dB).

$$G_t = \frac{P_t}{P_r} G_r \quad (2.12)$$

$$G_t(\text{dB}) = P_t(\text{dB}) - L - P_r(\text{dB}) + G_s(\text{dB}) \quad (2.13)$$

Persamaan 2.12 menunjukkan persamaan dalam skala numerik, sedangkan pada persamaan 2.13 digunakan sebagai perhitungan *gain* dalam skala *decibel*.

2.4 Pola Radiasi dan Faktor Array [3]

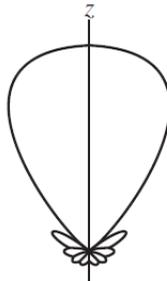
Pola radiasi (*radiation pattern*) merupakan salah satu parameter penting dari suatu antena. Parameter ini sering dijumpai dalam spesifikasi suatu antena, sehingga pembaca dapat membayangkan bentuk pancaran yang dihasilkan oleh antena tersebut.

Pola radiasi suatu antena didefinisikan sebagai pernyataan secara grafis yang menggambarkan sifat radiasi suatu antena (pada kondisi medan jauh) sebagai fungsi arah atau sudut suatu koordinat.

Pola radiasi dapat disebut sebagai pola medan (*field pattern*) apabila intensitas radiasi yang digambarkan adalah kuat medannya dan disebut sebagai pola daya (*power pattern*) apabila intensitas radiasi yang digambarkan adalah vektor *pointing*-nya.

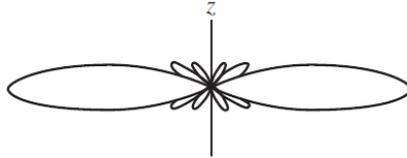
Pengarahan pola radiasi antena dapat dibedakan menjadi tiga kategori, yaitu :

1. Pola Radiasi pada arah *Endfire*: Antena disebut mempunyai pola radiasi pada arah *Endfire* jika pola radiasi maksimum pada arah 0 bidang antena.



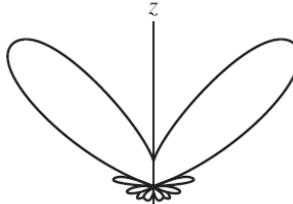
Gambar 2.4 Pola Radiasi *Endfire* [3]

2. Pola radiasi pada arah *Broad side*: Antena mempunyai pola radiasi pada arah *Broad side* apabila pola radiasi maksimum berada pada daerah tegak lurus bidang antena.



Gambar 2.5 Pola Radiasi *Broad side* [3]

3. Pola radiasi *Intermediate*: Antena yang mempunyai pola radiasi di mana arah maksimum main lobe berada diantara bentuk *broad side* dan Endfire yang disebut dengan *intermediate*. Antena yang mempunyai pola radiasi *intermediate* banyak dijumpai pada *phased-array* antena.



Gambar 2.6 Pola Radiasi *Intermediate* [3]

Pola radiasi diukur di daerah medan jauh dimana distribusi daya anguler yang diradiasikan tidak tergantung jarak.

Kondisi medan jauh terpenuhi jika:

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.14)$$

$$r \gg D \quad (2.15)$$

$$r \gg \lambda \quad (2.16)$$

dimana :

D = panjang antena

r = jarak titik pusat ke suatu titik pengamatan

λ = panjang gelombang

Dalam koordinat bola, medan listrik E dan medan magnet H telah diketahui, keduanya memiliki komponen vektor θ dan ϕ yang masing-masing menyatakan komponen sudut *elevasi* dan sudut *azimuth*. Sedangkan vektor *pointing*-nya dalam koordinat ini hanya mempunyai komponen radial saja dan dinyatakan dengan :

$$Pr = \frac{1}{2} \frac{|E|^2}{\eta} \quad (2.17)$$

Dengan :

$|E| = \sqrt{E_\theta^2 + E_\phi^2}$, menyatakan resultan magnitudo

E_θ = komponen medan listrik pada arah θ .

E_ϕ = komponen medan listrik pada arah ϕ .

H = impedansi intrinsik ruang bebas (377Ω).

Untuk menyatakan pola radiasi secara grafis, pola radiasi umumnya digambarkan dalam bentuk relatif. Maksudnya bentuk pola yang sudah dinormalisasi, dimana setiap nilai pola radiasi tersebut telah dibandingkan dengan nilai maksimumnya. Untuk pola medan, apabila dinyatakan dalam pola yang ternormalisasi dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$F(\theta, \phi) = \frac{E(\theta, \phi)}{E(\theta, \phi)_{max}} \quad (2.18)$$

Karena vektor *pointing* hanya mempunyai komponen radial dan menurut persamaan (2.18) berbanding lurus dengan kuadrat magnitudo kuat medannya, maka pola daya apabila dinyatakan dalam pola ternormalisasi, sama dengan kuadrat pola medan yang sudah dinormalisasikan.

$$F(\theta, \phi) = |F(\theta, \phi)|^2 \quad (2.19)$$

Seringkali juga pola radiasi suatu antena digambarkan dengan satuan *decibel* (dB). Intensitas medan dalam *decibel* didefinisikan sebagai :

$$F(\theta, \varphi)_{\text{dB}} = 20 \log |F(\theta, \varphi)| \text{ (dB)} \quad (2.20)$$

Sedangkan untuk pola dayanya dalam *decibel* dinyatakan dengan :

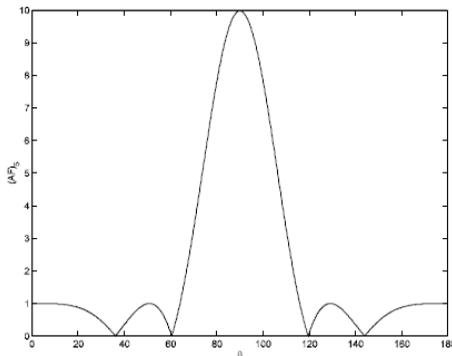
$$P(\theta, \varphi)_{\text{dB}} = 10 \log |P(\theta, \varphi)| \text{ (dB)} \quad (2.21)$$

$$P(\theta, \varphi)_{\text{dB}} = 20 \log |F(\theta, \varphi)| \text{ (dB)} \quad (2.22)$$

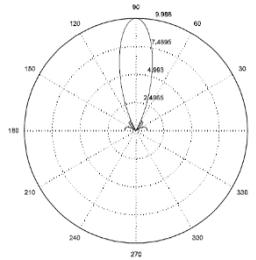
Dengan demikian, dalam unit *decibel* pola daya sama dengan pola medannya. Pada gambar 2.7 merupakan contoh faktor *array* dari antenna linier dengan arah pancaran utama (*main beam*) $\theta = 0^\circ$

Untuk menggambarkan sifat radiasi dari suatu antenna dengan konfigurasi *array*, pola radiasi sering dinyatakan dengan faktor *array* (*array faktor*) dimana pola dan sifat radiasi hasil perancangan antenna *array*, dengan elemen-elemen *array* merupakan sumber *isotropis*. Sehingga, formulasi faktor *array* ternormalisasi identik. Pola radiasi sebagai pola medan dapat dinyatakan seperti pada persamaan (2.22).

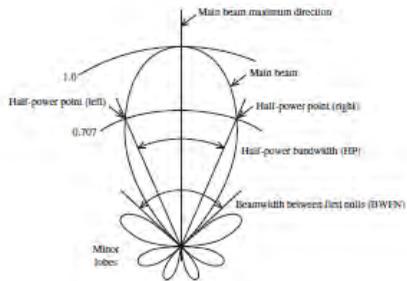
Untuk memperoleh plot $|f|$ sebagai fungsi dari θ , langkah pertama plot $|f(\psi)|$ dari persamaan 2.9 seperti gambar 2.10 kemudian gambar lingkaran dengan jari-jari $\psi = \pi$ dibawahnya. Nilai dari $\theta = \theta_1$ dan $|f| = |f_1|$ sebanding dengan $\psi = \psi_1$ seperti terlihat pada gambar. Penentuan pengambilan beberapa titik akan menghasilkan pola sketsa yang diinginkan.



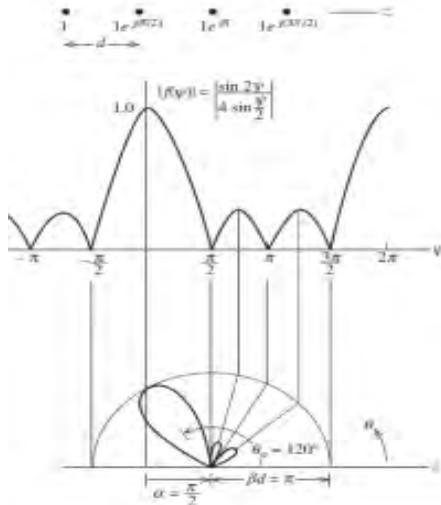
Gambar 2.7 Pola radiasi diplot pada bidang *rectangular*[4]



Gambar 2.8 Pola radasi diplot pada bidang *polar*[4]



Gambar 2.9 Polar plot pola radasi suatu antena



Gambar 2.10 Cara menentukan AF sebagai fungsi polar[3]

Pola radiasi tersebut, banyak digunakan untuk menganalisis performa antena. Pola radiasi dalam penelitian ini disebut sebagai pola beam atau *beam patterns*. Penggunaan bahasa ini dipilih karena lebih tepat pada cara menganalisis hasil yang diperoleh. Pembentukan beam dengan menggunakan berbagai parameter digunakan untuk membentuk beam pada arah tertentu. Pola radiasi linier (*rectangular*) dipilih untuk menampilkan hasil simulasi karena pertimbangan lebih mudah dalam menganalisis performa yang dihasilkan.

2.5 Parameter Pola Radiasi [4]

Bagian-bagian yang bervariasi dari pola radiasi disebut sebagai *lobe*. *Lobe* dikategorikan menjadi beberapa bagian, yaitu : *major lobe* atau *main lobe*, *minor lobe* atau *side lobe*, dan *back lobe*. *Radiation lobe* adalah bagian dari pola radiasi yang dibatasi yang dibatasi oleh daerah dengan intensitas radiasi yang relatif rendah. Konfigurasi tiga dimensi pola radiasi dalam bentuk polar dapat dilihat pada gambar 2.9

- *Side lobe level*

Major lobe (main beam) didefinisikan sebagai *lobe* yang memiliki arah dengan radiasi maksimum. Biasanya juga ada beberapa *lobe* yang lebih kecil dibandingkan dengan *main lobe*. *Lobe-lobe* selain *main lobe* disebut dengan *minor lobe*. *Side lobe* adalah *lobe* pada arah manapun yang berbeda dari arah *lobe* yang ada. *Back lobe* adalah *lobe* dimana sumbu z memiliki sudut sebesar 180° dan berhubungan dengan *beam* antena. *Minor lobe* pada umumnya menunjukkan radiasi dari arah yang tidak diinginkan sehingga *minor lobe* harus diminimumkan. *Side lobe* umumnya adalah *minor lobe* yang terbesar. *Side lobe* dapat bernilai positif atau negatif.

Ukuran yang menyatakan seberapa besar daya terkonsentrasi pada *main lobe* disebut dengan *side lobe level* yang merupakan rasio dari besar puncak *side lobe* dengan harga dari *main lobe*. *Level side lobe* terbesar untuk seluruh pola adalah maksimum *side lobe level*. Disingkat dengan SLL dan dinyatakan dalam decibel. Persamaan mencari nilai SLL dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$SLL_{dB} = 20 \text{ Log } \left| \frac{F(SLL)}{F(\max)} \right| \quad (2.23)$$

dimana $|F(\max)|$ adalah nilai maksimum dari *main lobe*

$|F(SLL)|$ adalah nilai maksimum dari *side lobe* tertinggi

- *Half-Power Beam width*

Half power *beam width* (HPBW) adalah sudut antara dua titik pada pola radiasi saat daya radiasi turun 3 dB atau menjadi setengah daya maksimumnya. Perhitungan lebar *beam width* lebih umum menggunakan metode *Half-Power beam width* dibandingkan dengan metode *Beam Width Between First Null* (BWFN). Pada *array* berupa ULA, nilai HPBW dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{HPBW} \approx 0,866 \frac{\lambda}{x_d} \csc \theta_0 \text{ (mendekati } \textit{broadside}) \quad (2.24)$$

dan

$$\text{HPBW} \approx 2 \sqrt{0,866 \frac{\lambda}{x_d}} \text{ (} \textit{endfire}) \quad (2.25)$$

Pada pola radiasi yang diplot pada bidang rectangular, nilai HPBW dapat diperoleh dengan persamaan 2.26 berikut

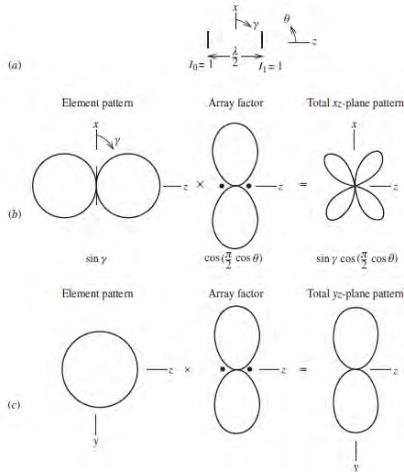
$$\text{HPBW} = |\theta_{\text{HPBWleft}} - \theta_{\text{HPBWright}}| \quad (2.26)$$

dimana θ_{HPBWleft} dan $\theta_{\text{HPBWright}}$ adalah titik-titik pada kiri dan kanan dari main beam dimana pola daya mempunyai nilai setengah dari nilai maksimumnya.

2.5.1 Perkalian Pola

Perkalian pola radiasi antena *array* adalah perkalian dari pola elemen dengan faktor *array* (AF). Proses ini dinamakan dengan *pattern multiplication*. Pola yang terbentuk tentunya akan lebih baik jika dibandingkan dengan pola sebuah elemen antenna. Semakin banyak jumlah *array* maka akan semakin bagus pola yang dibentuk oleh *array* sampai pada jumlah tertentu dengan memperhatikan faktor-faktor lain seperti jarak antar elemen, amplitudo, dan fase antar elemen *array*. Pola elemen bergantung pada dimensi fisik dan karakteristik radiasi gelombang elektro magnetik dari elemen. AF bergantung pada amplitudo, fase, dan posisi setiap elemen dalam *array*. Perkalian pola bisa digunakan untuk menentukan nilai faktor *array* dari susunan *array* yang kompleks.

Ketika elemen-elemen *array* ditempatkan sejajar sepanjang garis dan arus pada setiap elemen mengalir pada garis tersebut, maka *array* itu disebut *collinear*. Sedangkan *array* dengan elemen paralel disebut *paralel array*.



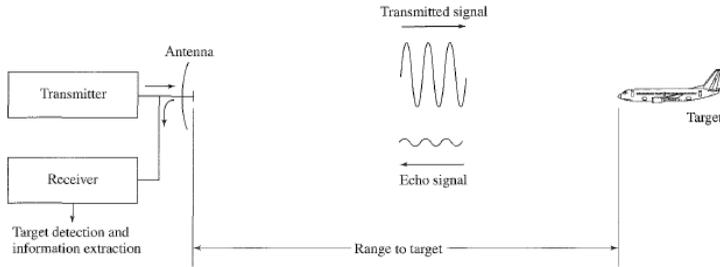
Gambar 2.11 (a) collinier array, (b) Paralel array[3]

2.6 Sistem Radar

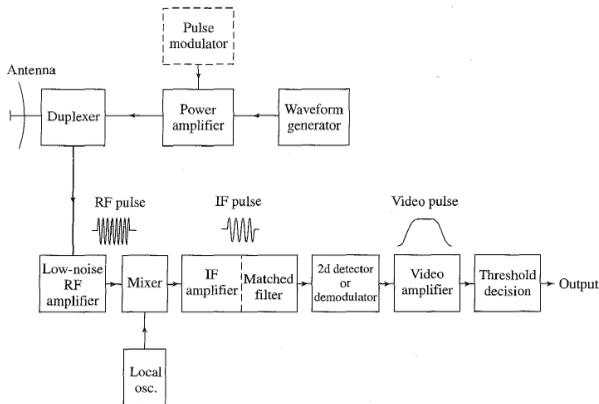
Radio detection and ranging (Radar) adalah sistem elektromagnetik untuk mendeteksi dan mendapatkan informasi lokasi target pantulan seperti pesawat terbang, kapal, kendaraan bermotor, manusia, dan atau lingkungan sekitar. Radar dioperasikan dengan meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara lalu mendeteksi sinyal echo yang diterima dari pantulan target.

Sinyal pantulan yang diterima oleh radar tidak hanya menunjukkan adanya target, namun dengan membandingkan sinyal echo yang diterima dengan sinyal yang ditransmisikan, lokasi dari target dapat ditentukan bersamaan dengan informasi lain dari target tersebut. Radar dapat dioperasikan baik pada jarak dekat maupun jauh dan dibawah kondisi seperti kegelapan, mendung, hujan, maupun bersalju. Kemampuan untuk mengukur jarak dengan akurasi tinggi dan dapat dioperasikan di segala cuaca menjadi keunggulan utama radar. Prinsip dasar sistem radar dapat dilihat melalui gambar 2.12.

Jarak radar ke target dapat ditentukan dengan menghitung waktu ketika sinyal tepat ditransmisikan ke target dan ketika kembali ke radar. Sedangkan lokasi dari target dalam sudut dapat ditentukan dari arah *narrow-beam width* antenna radar ketika menerima sinyal echo pada amplitudo maksimum



Gambar 2.12 Sistem Radar [5]



Gambar 2.13 Diagram Blok Radar [5]

2.7 Sistem MIMO [2]

Sistem MIMO didefinisikan sebagai komunikasi point-to-point menggunakan banyak antena baik pada pemancar maupun penerima. Manfaat penggunaan banyak antena pada kedua sisi ini adalah untuk meningkatkan performa melalui sistem diversitas yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem wireless tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun bandwidthnya. Dampak dari meningkatnya kecepatan data ini adalah alokasi ruang tambahan dan tata letak untuk penempatan antena-antena

serta parameter sistem yang lebih kompleks untuk pemrosesan sinyal multi-dimensi.

Sistem komunikasi point-to-point pita sempit (narrowband) menggunakan n antena pemancar dan m antena penerima digambarkan dengan model waktu diskrit pada matriks berikut ini

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

atau secara sederhana dapat ditulis dengan $y = Hx + N$, dimana x adalah n -dimensional transmitted symbol, y adalah m -dimensional vector Additional White Gaussian Noise (AWGN), dan matriks kanal H adalah zero mean (Rayleigh Fading) kompleks circular Gaussian random dimana variabel h_{ij} merepresentasikan gain kanal dari antena pemancar j ke antena penerima i . Dengan asumsi melakukan normalisasi noise sehingga noise covariance matrix-nya adalah sebuah matriks identitas, serta diasumsikan sisi penerima mampu untuk melakukan estimasi pada kanal H secara tepat, sehingga setiap elemen H dapat diidentifikasi. Dan sebagai catatan tambahan bahwa semua variabel diatas adalah proses stokastik.

2.8 Model Matematika radar phased-MIMO [1]

Array akan mentransmisikan gelombang sinyal $s_s(l)$ untuk membentuk beam pada arah tertentu menuju target, dimana $l = 1, 2, \dots, L$ adalah jumlah sampel setiap pulsa. Pada keluaran Array, sinyal baseband dapat dinyatakan dengan

$$m_s = \rho s_s(l) w_s^*, \quad s = 1, \dots, S. \quad (2.28)$$

Dimana s_s merupakan sinyal yang ditransmisikan subarray, $(.)^*$ merupakan operasi konjugasi dan w_s merupakan vektor bobot kompleks. Vektor bobot $X \times 1$ terdiri dari bobot X_s untuk elemen subarray dan vektor nol $X - X_s$ untuk elemen-elemen lain. ρ adalah energi yang dicatu pada setiap subarray dan dapat dituliskan sebagai $\rho = \sqrt{X/S}$. Untuk menghasilkan beam pada daerah medan jauh, sinyal yang ditransmisikan oleh sejumlah subarray pada sudut θ dimodelkan dengan persamaan

$$m_s(t; \theta) = \rho[w_s^H u_s(\theta)]s_s(l) \quad (2.29)$$

Dimana u_s merupakan *steering* vektor dari *subarray* ke S, $(\cdot)^H$ (\cdot)^H adalah transpose hermitian dan w_s merupakan vektor bobot yang aktif pada *subarray* ke S.

Sinyal pantul dari sebuah sudut θ dimodelkan dengan

$$m_s(l, \theta) = \rho\beta(\theta) \sum_{s=1}^S [w_s^H u_s(\theta) e^{-j\Delta_s(\theta)}] s_s(l) \quad (2.30)$$

Dimana $\beta(\theta)$ adalah koefisien pantul dari target pada sudut θ dan w_s adalah vektor bobot $X_s \times 1$ yang hanya berisi elemen aktif pada *Subarray* ke S. $\Delta_s(\theta)$ adalah waktu propagasi gelombang dari antena *transmit* elemen pertama menuju elemen pertama *subarray* ke S. Sinyal pantul dapat juga dituliskan sebagai

$$m_s(l, \theta) = \rho\beta(\theta)[c(\theta_t) \times d(\theta_t)]s_s(l) \quad (2.31)$$

Dimana

$$c(\theta) = [w_1^H a_1(\theta), \dots, w_S^H a_S(\theta)]^T \quad (2.32)$$

$$d(\theta) = [e^{-j\tau_1(\theta)}, \dots, e^{-j\tau_S(\theta)}]^T \quad (2.33)$$

$c(\theta)$ adalah vektor *transmit* proses koheren dengan panjang $S \times 1$, $d(\theta)$ adalah vektor diversity dengan panjang $S \times 1$, dan (\times) adalah operasi perkalian antar elemen.

Sinyal yang diterima pada antena *receiver* karena merupakan *subarray* yang panjangnya sama. Jika target yang diamati diasumsikan berada pada daerah yang dipengaruhi oleh target interferensi Q dengan koefisien pantul $\{\beta_i\}$ dan terletak pada $\{\theta_i\}$, vektor *array* $X \times 1$ yang diterima pada *receiver* dapat dituliskan sebagai

$$y(l, \theta) = r(l, \theta_p)b(\theta_p) + \sum_{i=1}^Q r(l, \theta_i)b(\theta_i) + n(l) \quad (2.34)$$

$b(\theta_p)$ adalah *downlink steering* vektor yang memiliki pengarahan pada sudut θ berdimensi $Y \times 1$, $r(l, \theta_i)$ adalah sinyal yang

dipantulkan oleh interferensi sejumlah Q , $n(l)$ adalah vektor dari *noise*. Setelah *match filter* menerima sinyal, kita memiliki virtual *steering* vektor sebanyak $NY \times 1$ karena kita menggunakan sejumlah N bentuk gelombang pada antenna *transmit* dan elemen sebanyak Y pada antenna penerima. Virtual *steering* vektor tersebut dirumuskan dengan

$$z(\theta_p) = (c(\theta_p) \circ d(\theta_p)) \times b(\theta_p) \quad (2.35)$$

Karena kita memiliki *match filter* untuk masing-masing gelombang sinyal, maka virtual *steering* vektor memiliki panjang $NY \times 1$.

Penguatan SNR dari radar *phased array* dirumuskan dengan $|w^H a(\theta_p)|$. Dengan menggunakan Pertidaksamaan Cauchy-Schwarz, kita memiliki $|w^H a(\theta_p)| \leq \|w\| \cdot \|a(\theta_p)\|$, persamaan akan diperoleh jika $w = a(\theta_p)$ yang menunjukkan beamforming. Pada kasus ini diamati sebuah sinyal sumber yang dipengaruhi oleh *noise thermal* (*Additive White Gaussian Noise*), pembentukan beam konvensional dikenal sebagai cara yang paling optimal dalam menghasikan keluaran SNR. Untuk alasan kesederhanaan, beamforming konvensional telah banyak digunakan dalam sistem antenna *array*. Oleh karena itu, penulis menggunakan beamforming konvensional pada antenna pemancar dan penerima radar *phased MIMO* dan menurunkan persamaan untuk memancarkan/menerima pola beam dan SINR. Penulis juga menganalisis dan membandingkan persamaan pola beam radar *phased MIMO* dan persamaan SINR *phased-array* dan radar *MIMO*.

Karena semua *subarray* memiliki *aperture* yang sama, vektor bobot untuk beamforming konvensional dari antenna *transmit* (*uplink*), dirumuskan dengan

$$w_s = \frac{a_s(\theta_p)}{\|a_s(\theta_p)\|}, s = 1, \dots, S. \quad (2.36)$$

Pada antenna penerima, pembentukan beam menggunakan *array virtual* dan oleh karena itu vektor bobot $SY \times 1$ diterima pada pembentukan beam di *receiver* yang dinyatakan dengan

$$w_d \triangleq u(\theta_p) = [c(\theta_p) \odot d(\theta_p)] \times b(\theta_p) \quad (2.37)$$

Diasumsikan $G(\theta)$ merupakan pola beam radar *phased MIMO* yang ternormalisasi,

$$G(\theta) \triangleq \frac{|w_d^H u(\theta)|^2}{|w_d^H u(\theta_p)|^2} = \frac{|u^H(\theta_p)u(\theta)|^2}{\|u(\theta_p)\|^4} \quad (2.38)$$

Untuk menyederhanakan persamaan dan analisis pola beam dan SINR untuk radar *phased-MIMO*, antenna yang digunakan diasumsikan sebagai ULA (*Uniform Linear Array*), yaitu

$$a_1^H(\theta_p)a_1(\theta) = \dots = a_S^H(\theta_p)a_S(\theta) \quad (2.39)$$

Oleh karena itu, rumus pola pembentukan beam (2.38) dapat dirumuskan sebagai berikut

$$G_S(\theta) = \frac{|a_S^H(\theta_p)a_S(\theta) \left[(d(\theta_p) \times b(\theta_p))^H d(\theta) \times b(\theta) \right]|^2}{\|a_S^H(\theta_p)\|^4 \|d(\theta_p) \times b(\theta_p)\|^4} \quad (2.40)$$

$$G_S(\theta) = \frac{|a_S^H(\theta_p)a_S(\theta)|^2 |d^H(\theta_p)d(\theta)|^2 |b^H(\theta_p)b(\theta)|^2}{\|a_S^H(\theta_p)\|^4 \|d(\theta_p) \times b(\theta_p)\|^4} \quad (2.41)$$

Sekarang, mari kita mempertimbangkan tiga kasus yang berbeda dalam penentuan *subarray* pada antenna *transmit*.

Kasus (1) : Satu *subarray* terdiri dari seluruh elemen antenna pengirim ($S=X$). Dalam hal ini, kita memiliki persamaan $a_S(\theta) = a(\theta)$ dan $d(\theta) = 1$, dimana 1 adalah vektor satu (dalam MatLab dibangkitkan dengan perintah “ones”). Dalam hal ini, pola beam (2.41) dituliskan sebagai

$$G_S(\theta) = \frac{|a^H(\theta_p)a(\theta)|^2 |b^H(\theta_p)b(\theta)|^2}{X^2 Y^2} \quad (2.42)$$

yang merupakan pola beam dari radar *phased-array* yang menggunakan X antenna pemancar dan Y antenna penerima.

Kasus (2) : *subarray* yang tidak overlap. setiap *subarray* terdiri X/S antenna. Teknik pembagian *subarray* seperti ini sesuai dengan referensi. Dalam hal ini, elemen vektor $d(\theta)$ yang ke “s” berhubungan dengan elemen ke $((s-1)X/S + 1)$ dari $a(\theta)$ dan vektor $a_s(\theta)$, $s = 1, \dots, S$ yang setiap *subarray* terdiri dari X/S elemen. Sehingga, mudah untuk menunjukkan bahwa $|a_S^H(\theta_p)a_S(\theta)|^2 |d^H(\theta_p)d(\theta)|^2 = |a^H(\theta_p)a(\theta)|^2$.

Oleh karena itu, pola beam (2.41) dirumuskan ulang sebagai

$$G_S(\theta) = \frac{|a^H(\theta_p)a(\theta)|^2 |d^H(\theta_p)d(\theta)|^2 |b^H(\theta_p)b(\theta)|^2}{(X/S)^2 S^2 Y^2} \quad (2.43)$$

$$G_S(\theta) = \frac{|a^H(\theta_p)a(\theta)|^2 |b^H(\theta_p)b(\theta)|^2}{X^2 Y^2} \quad (2.44)$$

Kasus (3) : Pada kasus ini, setiap *subarray* dinyatakan sebagai *subarray* yang saling overlap (*fully-overlapped*). Kita sudah mengetahui bahwa setiap *subarray* terdiri dari $X - S + 1$ elemen antenna. Karena overlap mudah untuk menunjukkan bahwa $d(\theta) = [a_{[1]}(\theta), \dots, a_{[S]}(\theta)]^T$, yang mana $a_{[S]}(\theta)$ adalah *uplink steering vektor* dari vektor $a(\theta)$ pada elemen tertentu. Sehingga, pola beam dari *phased*-MIMO radar pada persamaan (2.41) dan dituliskan sebagai

$$G_S(\theta) = \frac{|a_s^H(\theta_p)a_s(\theta)|^2}{(X - S + 1)^2} \cdot \frac{|d^H(\theta_p)d(\theta)|^2}{S^2} \cdot \frac{|b^H(\theta_p)b(\theta)|^2}{Y^2} \quad (2.45)$$

dengan fakta bahwa $\|a_s(\theta_p)\|^2 = X - S + 1$, $\|d_s(\theta_p)\|^2 = S$, dan $\|b(\theta_p)\|^2 = Y$, mari kita menuliskan $C_S(\theta) \triangleq |a_s^H(\theta_p)a_s(\theta)|^2 / (X - S + 1)^2$, sebagai pola beam *transmit (uplink)*, $D_S(\theta) \triangleq |d^H(\theta_p)d(\theta)|^2 / S^2$, sebagai pola beam dengan bentuk gelombang *diversity*, dan $R(\theta) \triangleq |d^H(\theta_p)d(\theta)|^2 / Y^2$, sebagai pola beam *receiver (downlink)*. Pola beam radar *phased* MIMO dapat kita amati sebagai perkalian tiga pola beam tersendiri, yaitu :

$$G_S(\theta) = C_S(\theta) \cdot D_S(\theta) \cdot R_S(\theta). \quad (2.46)$$

dengan memeriksa (2.46), kita bisa menarik beberapa premis, yaitu :

- Dua elemen pertama, yaitu $C_S(\theta)$ dan $D_S(\theta)$, nilainya bergantung pada jumlah *subarray* S, sedangkan elemen ketiga, yaitu $R_S(\theta)$ tidak dipengaruhi oleh jumlah *subarray*. Sehingga, untuk menganalisis pola beam radar *phased* MIMO difokuskan pada dua elemen pertama diatas.

- Rumusan pola beam untuk *phased array* radar dapat diperoleh dari persamaan (2.46) dengan memasukkan nilai $S=1$, sehingga muncul persamaan

$$G_{PH}(\theta) = C_1(\theta) \cdot D_1(\theta) \cdot R(\theta) = C_1(\theta) \cdot R(\theta) \quad (2.47)$$

dimana, $C_1(\theta) = |a^H(\theta_p)a(\theta)|^2 / X^2$ dan $D_1(\theta) = 1$, kasus ini berbeda dengan kasus (1) untuk penentuan jumlah *subarray* karena hanya satu bentuk gelombang yang dipancarkan pada kasus ini, sedangkan bentuk gelombang orthogonal campuran dari beberapa *subarray* pada kasus pertama.

- Pola beam radar MIMO dapat ditentukan dari persamaan (2.46) dengan mensubstitusikan $S=X$, sehingga diperoleh

$$G_{MIMO}(\theta) = C_M(\theta) \cdot D_M(\theta) \cdot R(\theta) = D_M(\theta) \cdot R(\theta) \quad (2.48)$$

dimana $C_M(\theta) = 1$ dan $D_M(\theta) = |a^H(\theta_p)a(\theta)|^2 / X^2$. Dengan membandingkan persamaan (2.40), (2.41), dan (2.42), diperoleh kenyataan bahwa *phased-array* dan MIMO memiliki pola beam keseluruhan yang sama, yaitu

$$G_{PH}(\theta) = G_{MIMO}(\theta) = \frac{|a^H(\theta_p)a(\theta)|^2}{X^2} \cdot R(\theta) \quad (2.49)$$

Meskipun *phased-array* dan MIMO memiliki pola beam *transmit* dan *diversity* yang berbeda serta *gain* yang berbeda. Radar *phased-array* memiliki performa *transmit* tertinggi pada pengolahan *gain* koheren, sedangkan radar MIMO memiliki *gain* tertinggi pada penggunaan gelombang *diversity*. Di sisi lain, pola beam *phased* MIMO mengambil dua kelebihan dari *phased-array* dan MIMO, sesuai dengan dua pernyataan.

Pernyataan 1: jika *phased* MIMO dibentuk dengan membagi sebuah antena ULA menjadi *subarray* S yang saling overlap, kemudian pola beam *transmit-receive* sama dengan pola beam *phased* MIMO yang dibentuk dengan membagi antena yang sama kedalam *subarray* yang berjumlah $(X - S + 1)$, yaitu

$$G_S(\theta) = |G_{X-S+1}(\theta)| \quad (2.50)$$

Pembuktian : catat bahwa $a_s(\theta)$ adalah dimensi $(X - S + 1) \times 1$, dan $d(\theta)$ memiliki dimensi $S \times 1$, pembuktian dapat dilakukan dengan mensubstitusikan $S = X - S + 1$ kedalam persamaan (2.39) dan mengubah $a_s(\theta)$ untuk $d(\theta)$ dan $a_s(\theta_p)$ untuk $d(\theta_p)$.

Pernyataan 2: pola beam *transmit-receive* untuk *phased* MIMO dengan S subarray, memiliki *side lobe level* tertinggi yang rebih rendah dari pola beam *transmit-receive phased array*, yaitu

$$\max_{\theta \in \Theta} C_S(\theta) \cdot D_S(\theta) \cdot R_S(\theta) \leq \max_{\theta \in \Theta} C_1(\theta) \cdot R(\theta) \quad (2.51)$$

Dimana Θ merupakan kesatuan semua spasi sudut dengan area *side lobe*.

Sesuai dengan pernyataan 2, radar phasd MIMO memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap interfensi pada *side lobe* dibandingkan dengan *phased array* dan radar MIMO. Untuk menggambarkan hal ini, mari kita memeriksa SINR maksimum untuk ketiga teknik radar tersebut. SINR output dari radar *phased* MIMO dapat didefinisikan sebagai

$$SINR_{PM} \triangleq \frac{\frac{X}{S} \sigma_p^2 |w_d^H u(\theta_p)|^2}{w_d^H R_{i+n} w_d} \quad (2.52)$$

Dimana $\sigma_p^2 = E\{|\beta_p|^2\}$ merupakan varians dari koefisien pantul target, matriks kovarians dari interferensi dan *noise* dibentuk dengan persamaan

$$R_{i+n} = E\{y_{i+n} y_{i+n}^H\} = \sum_{i=1}^D \frac{X}{S} \sigma_i^2 u(\theta_i) u^H(\theta_i) + \sigma_n^2 I \quad (2.53)$$

Dimana $\sigma_i^2 = E\{|\beta_i|^2\}$ merupakan varians dari koefisien pantul dari interfensi ke i . Persamaan $w_d \triangleq u(\theta_p)$ disubstitusikan pada (2.52), SINR *phased* MIMO dapat dituliskan sebagai

$$SINR_{PM} = \frac{\frac{X}{S} \sigma_p^2 |u^H(\theta_p) u(\theta_p)|^2}{u^H(\theta_p) R_{i+n} u(\theta_p)} \quad (2.54)$$

$$SINR_{PM} = \frac{\frac{X}{S} \sigma_p^2 |||a_s(\theta_p)|||^2 ||d(\theta_p) \times b(\theta_p)|||^2}{u^H(\theta_p) R_{i+n} u(\theta_p)} \quad (2.55)$$

$$SINR_{PM} = \frac{\frac{X}{S} \sigma_p^2 \| |a_s(\theta_p)| \|^2 \| d(\theta_p) \|^2 \| b(\theta_p) \|^2}{u^H(\theta_p) \left(\sum_{i=1}^D \frac{X}{S} \sigma_i^2 u(\theta_i) u^H(\theta_i) + \sigma_n^2 I \right) u(\theta_p)} \quad (2.56)$$

$$SINR_{PM} = \frac{\frac{X}{S} \sigma_p^2 (X - S + 1)^2 S^2 Y^2}{\sum_{i=1}^D \frac{X}{S} \sigma_i^2 |u^H(\theta_p) u(\theta_i)|^2 + \sigma_n^2 (X - S + 1) SY} \quad (2.57)$$

Kemudian, substitusikan $S=1$ pada (2.57), kita dapatkan persamaan SINR output untuk radar *phased array* sebagai

$$SINR_{PH} = \frac{\sigma_p^2 X^2 Y^2}{\sum_{i=1}^D \sigma_i^2 |a^H(\theta_p) a(\theta_i)|^2 |b^H(\theta_p) b(\theta_i)|^2 + \sigma_n^2 Y} \quad (2.58)$$

Dengan cara yang sama, SINR output untuk radar MIMO dapat kita peroleh dengan mensubstitusikan $S=X$ kedalam persamaan (2.59), sehingga muncul persamaan

$$\begin{aligned} & SINR_{MIMO} \\ &= \frac{\sigma_p^2 X^2 Y^2}{\sum_{i=1}^D \sigma_i^2 |a^H(\theta_p) a(\theta_i)|^2 |b^H(\theta_p) b(\theta_i)|^2 + \sigma_n^2 XY} \end{aligned} \quad (2.59)$$

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai metodologi yang dilakukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Pada simulasi ini ada beberapa kinerja yang diukur menggunakan Software MatLab. Simulasi yang dilakukan pada pengujian kinerja ketiga metode *subarray* adalah : Pengujian Kinerja *Main beam width*, Kinerja *Side lobe level*, Kinerja *Gain*, dan Kinerja *SINR* pada masing-masing metode *subarray*. Menentukan spesifikasi radar, pembangkitan sinyal, menentukan skenario pengukuran, pemodelan target, pengolahan sinyal pada *receiver*, plot hasil simulasi.

3.1 Spesifikasi Sistem Radar

Dengan adanya penelitian ini diharapkan bisa dimanfaatkan sebagai referensi untuk pengembangan teknik MIMO radar kedepannya. Pada penelitian ini diperkenalkan rumusan baru untuk radar MIMO pada pembentukan beam di antena *transmit* dan *receive*. Rumusan baru ini menggabungkan antara pemrosesan *gain* koheren yang ada pada radar *phased array* dengan keunggulan radar MIMO yang menggunakan bentuk gelombang yang berbeda-beda (*diversity*). Karena rumusan yang akan diperkenalkan dalam penelitian ini merupakan gabungan dari keunggulan baik radar *phased array* maupun radar MIMO, maka rumusan baru ini selanjutnya disebut sebagai radar *Phased MIMO*.

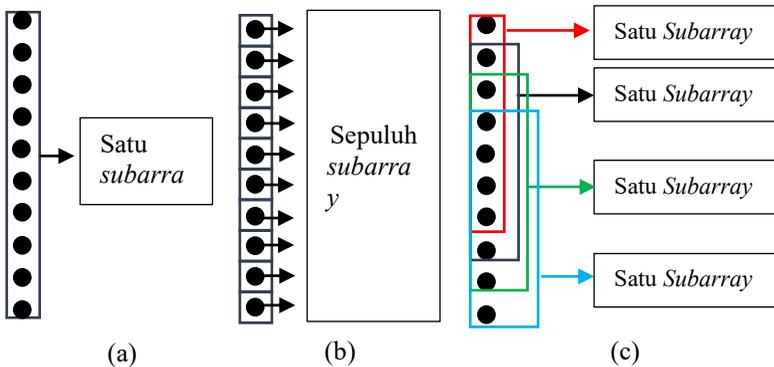
Sebagai langkah awal dalam penelitian ini, terlebih dahulu ditentukan spesifikasi sistem radar yang akan diteliti. Spesifikasi sistem radar tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini :

Tabel 3.1 Spesifikasi Parameter Simulasi

Spesifikasi	Simbol	Nilai	Satuan
Antena pemancar	X	10	buah
Antena penerima	Y	10	buah
Jumlah <i>subarray phased</i> -MIMO	S	4	buah
Jumlah sampel dalam satu pulsa	N	400	sampel
Jarak antar elemen antena	d	0,5 λ	meter
Sudut target	θ_s	-20, 0, 10	derajat
Sudut sumber interferensi	θ_i	-10 -30	derajat
Daya <i>noise</i>	Pn	1	Watt

Daya interferensi	Pi	variabel	Watt
SNR		variabel	dB

Berikut merupakan skema *transmit* sistem radar yang digunakan dalam simulasi.



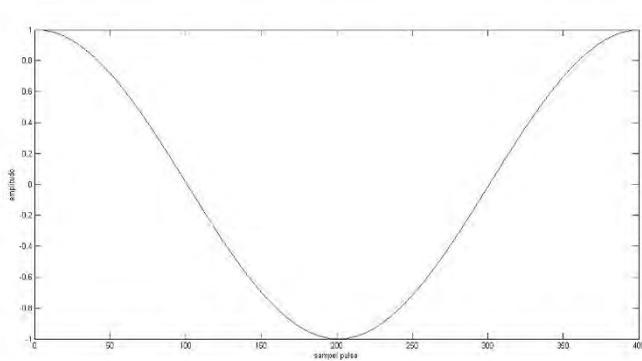
Gambar 3.1 Ilustrasi *subarray* (a) Radar *phased array*, (b) Radar MIMO, dan (c) Radar *phased-MIMO*

Dari gambar 3.1 diatas bisa dilihat perbedaan penerapan *subarray* pada ketiga metode teknik radar. Jumlah elemen *transmit/receive* yang digunakan sebanyak sepuluh elemen. Pada radar *phased array* seluruh elemen dikelompokkan menjadi satu *subarray*, artinya seluruh elemen dicatu oleh sumber yang sama, dan mentransmisikan/menerima satu bentuk gelombang yang sama. Lain halnya dengan radar MIMO, elemen *transmit/receive* yang ada dikelompokkan menjadi *subarray* sebanyak elemen tersebut. Pada radar MIMO jika kita memiliki elemen antenna sebanyak X maka kita dapat membentuk *subarray* sebanyak S, dimana $S=X$.

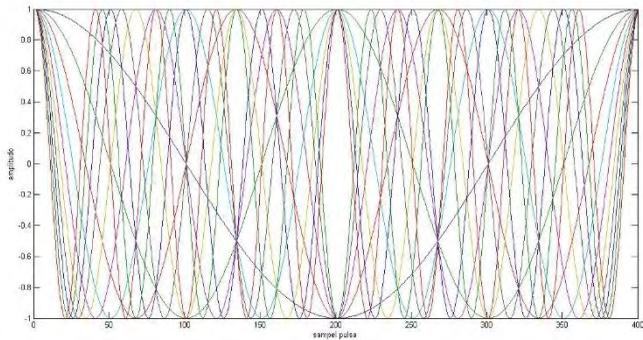
Pada metode Radar *Phased MIMO*, elemen *transmit/receive* dikelompokkan kedalam beberapa *subarray* yang jumlahnya lebih sedikit dibandingkan jumlah seluruh elemen. Jumlah *subarray* pada radar *phased MIMO* bisadinyatakan dengan $1 < S < X$, dimana S adalah jumlah *subarray*, dan X adalah jumlah elemen *transmit/receive*.

3.2 Pemodelan Sinyal *Transmit*

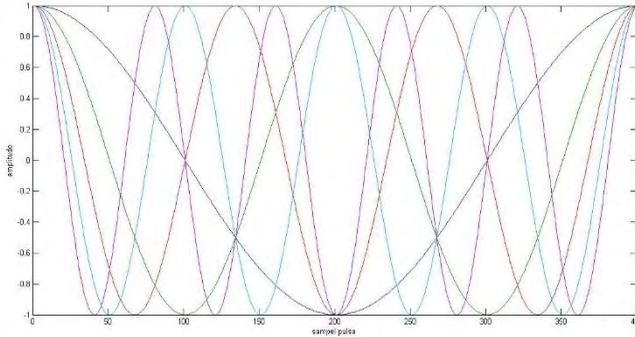
Sinyal yang digunakan pada sistem ini adalah sinyal orthogonal. Sinyal orthogonal digunakan agar tidak terjadi interferensi antar sinyal yang dikirimkan pada skema sistem MIMO. *Diversity* sistem juga akan terbentuk dari adanya orthogonalitas sinyal yang disebut *waveform diversity*.



Gambar 3.2 Sinyal radar *phased array*



Gambar 3.3 Sinyal Radar MIMO



Gambar 3.4 Sinyal Radar *Phased* MIMO ($S=5$)

Sinyal di atas adalah gambaran pulsa yang dikirim dari ketiga sistem radar. Sinyal dimodelkan memiliki amplitudo 1 dan dicuplik sebanyak 400 kali.

Pada gambar 3.4 di atas menunjukkan sinyal yang orthogonal berdasarkan frekuensi yang digunakan. Sinyal-sinyal tersebut merepresentasikan sinyal yang dikirim pada masing-masing *subarray* ketiga sistem. Radar *phased array* memiliki satu *subarray* yang terdiri dari sepuluh antenna sehingga sinyal yang ditransmisikan hanya satu sinyal. Radar MIMO memiliki sepuluh *subarray*, masing-masing terdiri dari satu antenna sehingga sinyal yang ditransmisikan berjumlah sepuluh sinyal. Pada radar *phased*-MIMO, terdapat lima sinyal yang ditransmisikan karena *subarray* pada sistem ini berjumlah lima.

Array akan mentransmisikan gelombang sinyal $s_s(l)$ untuk membentuk beam pada arah tertentu menuju target, dimana $l = 1, 2, \dots, L$ adalah jumlah sampel setiap pulsa. Pada keluaran *Array*, sinyal baseband dapat dinyatakan dengan

$$m_s = \rho s_s(l) w_s^*, \quad s = 1, \dots, S. \quad (3.1)$$

Dimana s_s merupakan sinyal yang ditransmisikan *subarray*, $(.)^*$ merupakan operasi konjugasi dan w_s merupakan vektor bobot kompleks. Vektor bobot $X \times 1$ terdiri dari bobot X_s untuk elemen *subarray* dan vektor nol $X - X_s$ untuk elemen-elemen lain. ρ adalah energi yang dicatu pada setiap *subarray* dan dapat dituliskan sebagai $\rho = \sqrt{X/S}$. Untuk

menghasilkan beam pada daerah medan jauh, sinyal yang ditransmisikan oleh sejumlah *subarray* pada sudut θ dimodelkan dengan

$$m_s(t; \theta) = \rho [w_s^H u_s(\theta)] s_s(l) \quad (3.2)$$

Dimana u_s merupakan *steering* vektor dari *subarray* ke S, $(\cdot)^H$ (\cdot) adalah transpose hermitian dan w_s merupakan vektor bobot yang aktif pada *subarray* ke S.

3.3 Pemodelan Sinyal Pantul dari Target [1]

Sinyal pantul dari sebuah target pada sudut θ dimodelkan dengan

$$m_s(l, \theta) = \rho \beta(\theta) \sum_{s=1}^S [w_s^H b_s(\theta) e^{-j\Delta_s(\theta)}] s_s(l) \quad (3.3)$$

Dimana $\beta(\theta)$ adalah koefisien pantul dari target pada sudut θ dan w_s adalah vektor bobot $X_s \times 1$ yang hanya berisi elemen aktif pada *Subarray* ke S. $\Delta_s(\theta)$ adalah waktu propagasi gelombang dari antena *transmit* elemen pertama menuju elemen pertama *subarray* ke S. Sinyal pantul dapat juga dituliskan sebagai

$$r(l, \theta_p) = \rho \beta(\theta) [c(\theta_p) \circ d(\theta_p)] s_s(l) \quad (3.4)$$

Dimana

$$c(\theta) = [w_1^H a_1(\theta), \dots, w_S^H a_s(\theta)]^T \quad (3.5)$$

$$d(\theta) = [e^{-j\Delta_1(\theta)}, \dots, e^{-j\Delta_S(\theta)}]^T \quad (3.6)$$

$c(\theta)$ adalah vektor *transmit* proses koheren dengan panjang $S \times 1$, $d(\theta)$ adalah vektor *diversity* dengan panjang $S \times 1$, dan (\circ) adalah operasi perkalian antar elemen.

3.4 Pemodelan Sinyal pada receiver[1]

Sinyal yang diterima pada antena *receiver* karena merupakan *subarray* yang panjangnya sama. Jika target yang diamati diasumsikan berada pada daerah yang dipengaruhi oleh target interferensi Q dengan koefisien pantul $\{\beta_i\}$ dan terletak pada $\{\theta_i\}$, vektor *array* $X \times 1$ yang diterima pada *receiver* dapat dituliskan sebagai

$$y(l, \theta) = r(l, \theta_p) b(\theta_p) + \sum_{i=1}^Q r(l, \theta_i) b(\theta_i) + n(l) \quad (3.7)$$

$b(\theta_p)$ adalah *downlink steering* vektor yang memiliki pengarahannya pada sudut θ berdimensi $Y \times 1$, $r(l, \theta_i)$ adalah sinyal yang dipantulkan oleh interferensi sejumlah Q , $n(l)$ adalah vektor dari *noise*. Setelah *match filter* menerima sinyal, kita memiliki virtual *steering* vektor sebanyak $NY \times 1$ karena kita menggunakan sejumlah N bentuk gelombang pada antena *transmit* dan elemen sebanyak Y pada antena penerima. Virtual *steering* vektor tersebut dirumuskan dengan

$$z(\theta_p) = (c(\theta_p) \circ d(\theta_p)) \times b(\theta_p) \quad (3.8)$$

Karena kita memiliki *match filter* untuk masing-masing gelombang sinyal, maka virtual *steering* vektor memiliki panjang $NY \times 1$.

3.5 Beamforming [1]

Pola beam *phased MIMO* dituliskan sebagai

$$G_S(\theta) = \frac{|a_s^H(\theta_p) a_s(\theta)|^2}{(X - S + 1)^2} \cdot \frac{|d^H(\theta_p) d(\theta)|^2}{S^2} \cdot \frac{|b^H(\theta_p) b(\theta)|^2}{Y^2} \quad (3.9)$$

Dari rumus tersebut dapat dipecah menjadi pola beam terpisah, yang dituliskan sebagai

$$G_S(\theta) = C_S(\theta) \cdot D_S(\theta) \cdot R_S(\theta). \quad (3.10)$$

- Rumusan pola beam untuk *phased array* radar dapat diperoleh dari (2.40) dengan memasukkan nilai $S=1$, sehingga muncul persamaan

$$G_{PH}(\theta) = C_1(\theta) \cdot D_1(\theta) \cdot R(\theta) = C_1(\theta) \cdot R(\theta) \quad (3.11)$$

Dimana, $C_1(\theta) = |a^H(\theta_p) a(\theta)|^2 / X^2$ dan $D_1(\theta) = 1$

- Pola beam radar MIMO dapat ditentukan dari persamaan (2.40) dengan mensubstitusikan $S=X$, sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} G_{MIMO}(\theta) &= C_M(\theta) \cdot D_M(\theta) \cdot R(\theta) \\ &= D_M(\theta) \cdot R(\theta) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dimana $C_M(\theta) = 1$ dan $D_M(\theta) = |a^H(\theta_p)a(\theta)|^2 / X^2$. Diperoleh kenyataan bahwa *phased-array* dan MIMO memiliki pola beam keseluruhan (overall beam pattern) yang sama, yaitu

$$G_{PH}(\theta) = G_{MIMO}(\theta) = \frac{|a^H(\theta_p)a(\theta)|^2}{X^2} \cdot R(\theta) \quad (3.13)$$

3.6 SINR [1]

Pada tugas akhir ini, peneliti menganalisis SINR output pada dua kasus.

1. Daya *Noise* Dominan (INR= -30), Jika target yang diamati berada pada daerah yang interferensinya lemah yang semuanya terpisah secara sempurna dari target, sehingga nilai daya interferensi dibanding daya *noise* (INR) dapat dianggap sebagai daya *noise* saja. Pada kasus seperti ini SINR untuk *phased array* dapat disederhanakan menjadi :

$$SINR_{PH} \cong \frac{\sigma_p^2 X^2 Y}{\sigma_n^2} \quad (3.14)$$

Sedangkan SINR untuk radar MIMO dapat disederhanakan menjadi :

$$SINR_{MIMO} \cong \frac{\sigma_p^2 XY}{\sigma_n^2} \quad (3.15)$$

Dengan membandingkan persamaan (3.14) dan (3.15) , diperoleh

$$SINR_{PH} = X \cdot SINR_{MIMO} \quad (3.16)$$

Hal ini berarti bahwa radar *phased array* lebih tahan terhadap kondisi yang dipengaruhi daya *noise*, dibandingkan radar MIMO. Di sisi lain, SINR untuk radar *phased* MIMO diturunkan menjadi persamaan

$$SINR_{PM} \cong \frac{\sigma_p^2 X(X-S+1)^2 SY^2}{\sigma_n^2(X-S+1)SY} \quad (3.17)$$

$$SINR_{PM} = \frac{X-S+1}{X} \cdot \frac{\sigma_p^2 SX^2 Y}{\sigma_n^2} \quad (3.18)$$

$$SINR_{PM} = \eta \cdot SINR_{PH} \quad (3.19)$$

Dimana $\eta \triangleq (X-S+1)/X$ adalah perbandingan SINR *phased* MIMO dan SINR *phased array*. Perlu dicatat bahwa $1/X \leq \eta \leq 1$. Hubungan antara η dan S menunjukkan bahwa SINR *phased* MIMO menurun dengan cara menaikkan nilai S . pada waktu yang sama, S yang lebih besar memberikan dimensi virtual *array* yang lebih besar. Dari hal tersebut bisa kita putuskan pada pemilihan SINR dengan mengorbankan resolusi sudut, atau sebaliknya mementingkan resolusi sudut dengan mengorbankan SINR.

2. Interferensi Dominan, Jika target yang diamati berada dalam pengaruh interferensi yang lebih kuat, dibandingkan dengan daya *noise*. Dengan menggunakan persamaan (2.52) dan (2.53), diperoleh persamaan

$$SINR_{PH} \cong \frac{\sigma_p^2 X^2 Y^2}{\sum_{i=1}^D \sigma_i^2 |a^H(\theta_p)a(\theta_i)|^2 |b^H(\theta_p)b(\theta_i)|^2} \quad (3.20)$$

$$SINR_{PH} = SINR_{MIMO} \quad (3.21)$$

Hal ini berarti, baik *phased array* maupun radar MIMO memiliki kemampuan yang sama terhadap pengaruh interferensi. Pada sisi yang lain, SINR *phased* MIMO dapat dianalisis dengan merumuskan ulang (2.51) sebagai :

$$SINR_{PM} = \frac{\sigma_p^2 S^2 Y^2}{\frac{X^2}{(X-S+1)^2 S^2} \sum_{i=1}^D \sigma_i^2 |u^H(\theta_p)u(\theta_i)|^2} \quad (3.22)$$

$$SINR_{PM} = \frac{\sigma_p^2 S^2 Y^2}{\frac{X^2}{(X-S+1)^2 S^2} \sum_{i=1}^D \sigma_i^2 |a_s^H(\theta_p) a_s(\theta_i)|^2 |d^H(\theta_p) d(\theta_i)|^2} \quad (3.23)$$

Perlu dicatat bahwa $X/(X-S+1)S \leq 1$ karena $(X-S+1)S - X = (X-S)(S-1) \geq 0$. Berdasarkan pada kenyataan bahwa *phased* MIMO memiliki *side lobe level* tertinggi yang lebih rendah dari *phased array* radar (lihat pernyataan 2), kita dapat menyimpulkan bahwa

$$SINR'_{PM} \geq SINR'_{PH} \quad (3.24)$$

Dimana $SINR'_{PM}$ adalah nilai SINR terburuk dicapai oleh radar *phased* MIMO bertahap radar, yaitu, SINR untuk kasus ketika interferensi terjadi melalui *side lobe level* tertinggi, dan merupakan nilai SINR terburuk radar *phased-array*. Hal ini sesuai persamaan (3.24) dimana *phased* MIMO mampu memberikan kinerja SINR lebih baik dibandingkan *phased array* dan radar MIMO. Pengamatan ini akan diverifikasi lebih lanjut pada simulasi di MatLab.

3.7 Simulasi MatLab

Langkah untuk simulasi, dijelaskan dengan langkah-langkah berikut ini :

1. Sistem yang dirancang dimulai dengan membangkitkan sinyal koheren dari antena *transmit*.
2. *Beampattern* yang terbentuk dianalisis kinerjanya satu persatu, mulai dari *beampattern phased array*, MIMO radar, dan *phased* MIMO radar.
3. Kinerja yang dianalisis meliputi *main beamwidth*, dan *side lobe level* pada masing-masing metode.
4. Langkah berikutnya adalah pembangkitan sinyal *diversity* dengan metode *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) yang diterapkan pada ketiga jenis subarray.
5. *Beampattern* yang terbentuk dianalisis kinerjanya satu persatu, mulai dari *beampattern phased array*, MIMO radar, dan *phased* MIMO radar.
6. Kinerja yang dianalisis meliputi *main beamwidth*, dan *side lobe level* pada masing-masing metode.

7. Kemudian, langkah yang tidak kalah pentingnya adalah simulasi *beampattern* yang diterima pada receiver. *Beampattern* yang terbentuk ini disebut juga dengan *overall beampattern*
8. *Beampattern* yang terbentuk dianalisis kinerjanya satu persatu, mulai dari *beampattern phased array*, MIMO radar, dan *phased MIMO radar*.
9. Kinerja yang dianalisis meliputi *main beamwidth*, dan *side lobe level* pada masing-masing metode.
10. Setelah simulasi pada *beampattern* dianalisis, penelitian ini berlanjut pada perhitungan nilai SINR vs SNR yang dihasilkan oleh masing-masing metode *subarray*.
11. Simulasi SINR vs SNR yang dilakukan didasarkan pada dua kategori, yaitu : kategori pertama dengan menggunakan daya interferensi yang lebih dominan dibandingkan dengan daya *noise*, dan kategori yang kedua adalah dengan menggunakan daya *noise* yang lebih dominan dibandingkan dengan daya interferensi.
12. Hasil yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui perbandingan pengaruh daya interferensi dan daya *noise* pada kinerja SINR vs SNR yang dihasilkan.

BAB 4

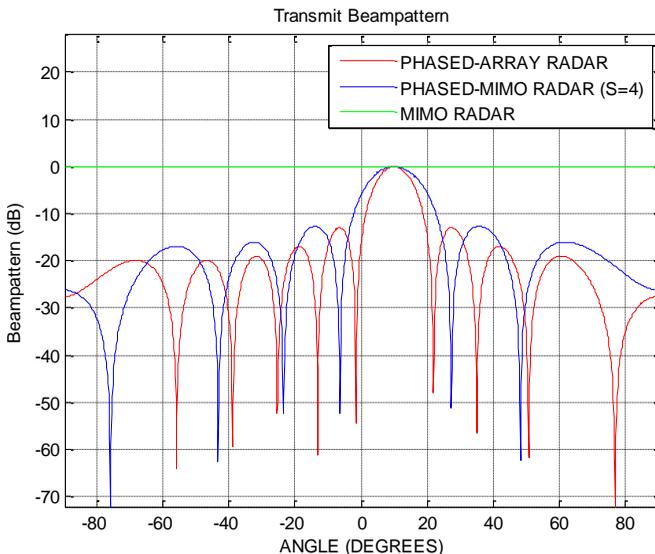
ANALISIS HASIL SIMULASI

4.1 Analisis Kinerja radar

4.1.1 *Transmit Beampattern*

Pada tahap pertama penelitian ini akan dianalisis kinerja radar (*main beam width*, *Side lobe level*, dan *Gain*) ketika sinyal ditransmisikan dari antenna pemancar (*transmitter*) menuju target. Penggunaan ketiga metode *subarray* dibandingkan kinerjanya melalui beamforming yang terbentuk. Antena yang digunakan adalah antenna *Uniform Linear Array* (ULA) dimana antenna jenis ini memiliki konfigurasi antenna *array* dengan jarak antar elemen dan amplitudo yang identik. Target diasumsikan berada pada posisi 10° terhadap antenna referensi.

Hasil simulasi pada *transmit beampattern* ditunjukkan pada gambar 4.1. Hasil simulasi ini diplot pada bidang cartesian.

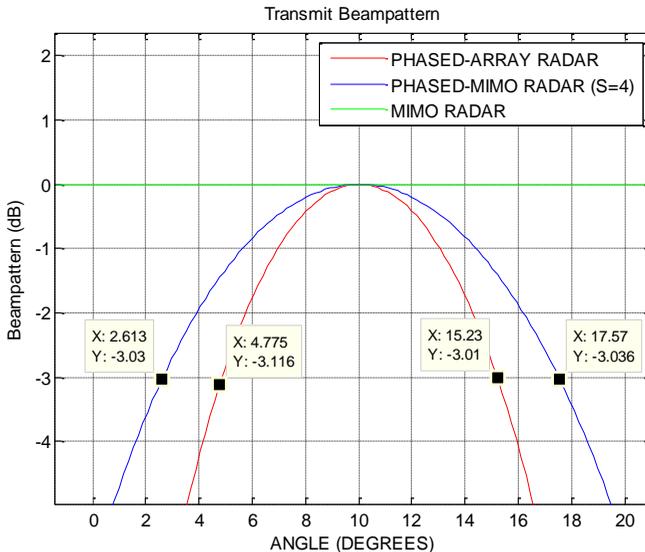


Gambar 4.1 Hasil Simulasi Beamforming pada sisi *Transmit*

4.1.1.1 Pengujian Kinerja Mainbeam width

Dari gambar 4.1 bisa diamati beberapa kinerja radar pada sisi *transmit*. Pengujian kinerja *main beam width* ketika antenna pemancar memancarkan gelombang *transmit* merupakan hal yang pertama dilakukan dengan menggunakan sepuluh elemen antenna *Uniform Linear Array* (ULA).

Pengujian *beam width* dilakukan dengan mengasumsikan target berada pada sudut 10° terhadap *array*. Hasil simulasi *main beam width* pada MatLab dengan parameter seperti pada ditunjukkan pada gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2 Kinerja *Main beam width* radar pada 10°

Dari gambar 4.2 diatas dapat diperoleh nilai *main beam width* keika antenna pemancar mengirimkan sinyal menuju target. Nilai *beam width* ini dihitung sesuai dengan persamaan 2.13 pada bab sebelumnya.

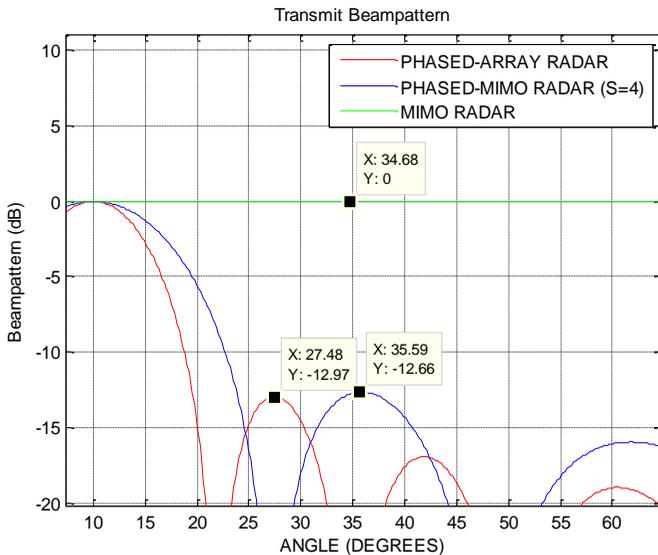
Nilai *main beam width* (HPBW) yang diperoleh lebih jelasnya disajikan dalam tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Kinerja *Main beam width* dari Pemancar menuju target

Metode	Beam width	Keterangan
Phased Array	10,82°	
MIMO radar	-	Sangat Lebar
Phased MIMO	15,68°	

4.1.1.2 Pengujian Kinerja Side lobe level

Data berikutnya yang bisa diperoleh dari gambar 4.1 adalah kinerja *Side lobe level* (SLL) pada masing-masing metode *subarray*. Kinerja ini diperoleh setelah pola radiasi atau beam yang terbentuk dinormalisasi dengan nilai maksimumnya.



Gambar 4.3 Kinerja *Side lobe level*, target terletak pada 10°

Sesuai dengan Gambar 4.3 diatas bisa dilihat perbandingan *side lobe level* dari masing-masing metode *subarray*. Tinggi rendahnya *subarray* sangat berpengaruh pada daya tahan radar terhadap interferensi dan *noise* yang disebabkan oleh lingkungan.

Hasil pengujian *side lobe level* tersebut lebih jelasnya bisa dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Kinerja SLL dari Pemancar menuju target

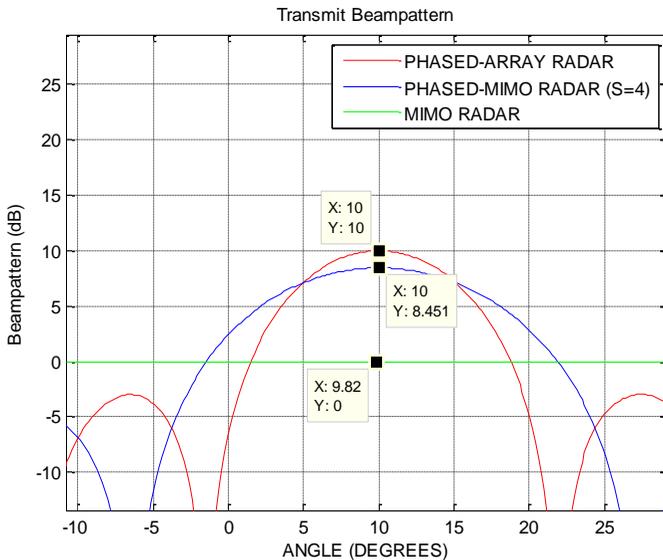
Metode	Side lobe level (dB)	Keterangan
<i>Phased Array</i>	-12,97	
MIMO radar	0	Sangat Tinggi
<i>Phased MIMO</i>	-12,65	

Dari hasil yang diperoleh bisa dilihat bahwa metode *subarray* yang menghasilkan *side lobe level* yang paling rendah (paling bagus) adalah metode radar *phased array* dan *level side lobe* yang paling tinggi (paling buruk) diperoleh ketika menggunakan metode radar MIMO.

4.1.1.3 Pengujian Kinerja *Gain*

Pengujian kinerja *Level Gain* merupakan kinerja berikutnya yang sangat dipertimbangkan dalam menggunakan radar. *Gain* erat kaitannya dengan jarak pancar yang bisa dijangkau oleh radar.

Level Gain dari masing-masing metode memiliki perbedaan yang mencolok seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Kinerja *Level Gain* dari ketiga metode *subarray*

Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai *Level Gain* masing-masing metode *subarray* bervariasi. Antara *Phased Array* dan *Phased MIMO* memiliki selisih perbedaan *Gain* yang tidak terlalu besar. Hasil pengujian kinerja *level Gain* tersebut disajikan lebih jelas dalam tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3 Kinerja *Gain* dari Pemancar menuju target

Metode	<i>Gain</i> (dB)	Keterangan
<i>Phased Array</i>	9,9	Paling tinggi
MIMO radar	0	Paling rendah
<i>Phased MIMO</i>	8,451	

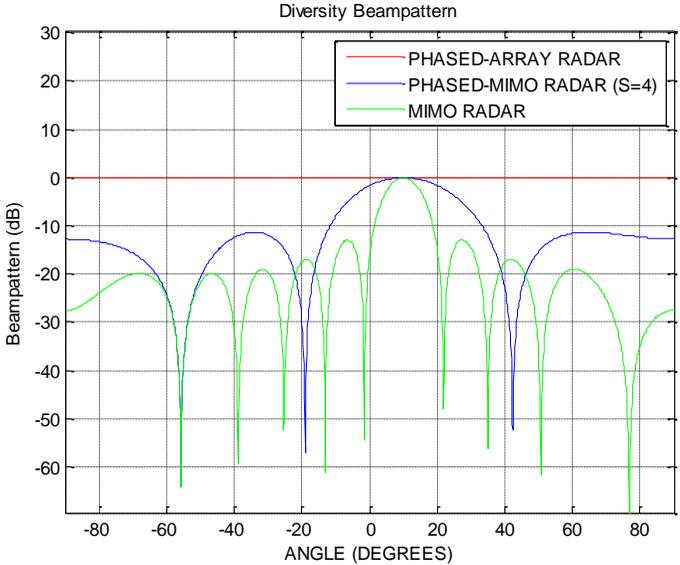
Dari tabel 4.3 diperoleh kesimpulan bahwa *phased Array* memiliki *level Gain* yang paling bagus dibandingkan dengan dua metode yang lain pada sisi *transmit*.

4.1.2 Pemodelan *Diversity Beampattern*

Tahap berikutnya pada penelitian ini dianalisis kinerja radar (*main beam width*, *Side lobe level*, dan *Gain*) ketika sinyal ditransmisikan dari antenna pemancar (*transmitter*) menuju target menggunakan sinyal *diversity*. Penggunaan ketiga metode *subarray* dibandingkan kinerjanya melalui beamforming yang terbentuk. Antena yang digunakan adalah antena *Uniform Linear Array* (ULA) dimana antena jenis ini memiliki konfigurasi antena *array* dengan jarak antar elemen dan amplitudo yang identik. Target diasumsikan berada pada posisi 10° terhadap antena referensi.

Diversity beampattern diperoleh dengan membangkitkan sinyal yang saling orthogonal satu sama lain antara masing-masing *subarray*. Dengan menggunakan sinyal orthogonal ini tidak terjadi interferensi sinyal diantara *subarray* yang berdekatan. Ini adalah salah satu kelebihan dari radar MIMO yang menggunakan bentuk gelombang orthogonal pada pembangkitan sinyalnya.

Adapun hasil yang diperoleh dengan melakukan simulasi pada *diversity beampattern* ditunjukkan pada gambar 4.5. Hasil simulasi ini diplot pada bidang cartesian. Nilainya terlebih dahulu dinormalisasi untuk mempermudah analisis.



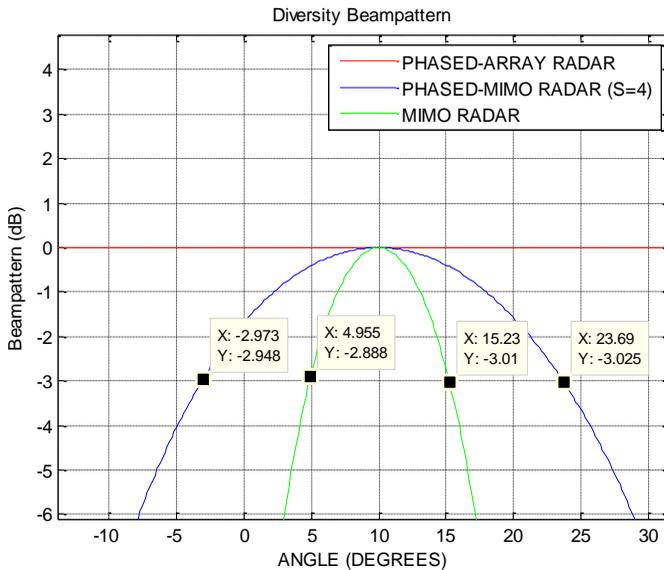
Gambar 4.5 Hasil Simulasi Beamforming dengan *diversity*

4.1.2.1 Pengujian Kinerja *Beam width*

Dari gambar 4.5 bisa diamati beberapa kinerja radar dengan menggunakan sinyal *diversity*. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *main beam width* (HPBW) pada pola radiasi yang terbentuk.

Pengujian *beam width* dilakukan dengan mengasumsikan target berada pada sudut 10° terhadap *array*. Hasil simulasi *main beam width* pada MatLab dengan parameter seperti pada ditunjukkan pada gambar 4.6 berikut ini.

Dari gambar 4.6 dapat diperoleh nilai *main beam width* ketika antenna pemancar mengirimkan sinyal *diversity*. Nilai *beam width* ini dihitung sesuai dengan persamaan 2.13 pada bab sebelumnya. Nilai pada sisi kiri dikurangkan dengan nilai pada sisi kanan kemudian hasilnya dimutlakkan. Kemudian diperoleh nilai *main beam width* masing-masing metode. Nilai *main beam width* yang dihitung disini merupakan nilai HPBW (*Half Power Beam width*).



Gambar 4.6 Kinerja *Main beam width* radar pada 10°

Nilai *main beam width* (HPBW) yang diperoleh lebih jelasnya disajikan dalam tabel 4.4 berikut ini

Tabel 4.4 Kinerja *Beam width Diversity*

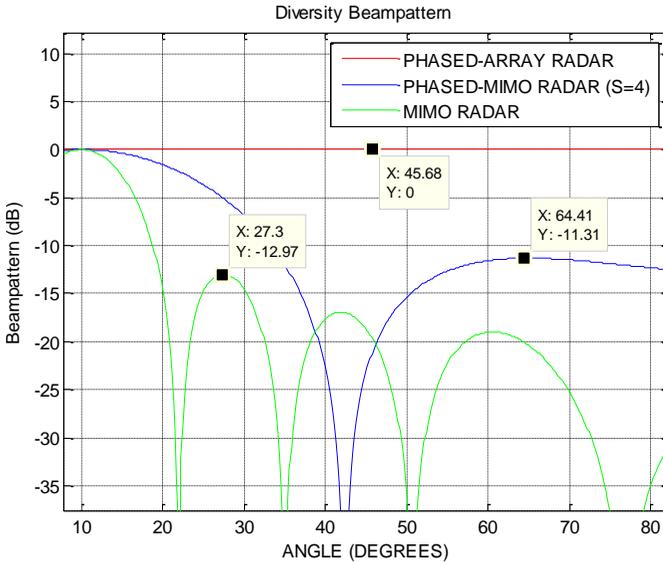
Metode	<i>Beam width</i>	Keterangan
<i>Phased Array</i>	-	Sangat Lebar
MIMO radar	$10,82^\circ$	
<i>Phased MIMO</i>	$28,103^\circ$	

4.1.2.2 Pengujian Kinerja *Side lobe level*

Data berikutnya yang bisa diperoleh dari gambar 4.5 adalah kinerja *Side lobe level* (SLL) pada masing-masing metode *subarray*. Kinerja ini diperoleh setelah pola radiasi atau beam yang terbentuk dinormalisasi dengan nilai maksimumnya.

Gambar 4.6 menunjukkan nilai *side lobe level* yang diperoleh dengan memperbesar Gambar 4.5 yang sudah ditampilkan sebelumnya.

Bisa dilihat perbandingan *side lobe level* dari masing-masing metode *subarray*. Tinggi rendahnya *subarray* sangat berpengaruh pada daya tahan radar terhadap interferensi dan *noise* yang disebabkan oleh lingkungan.



Gambar 4.7 Kinerja *Side lobe level*, target terletak pada 10°

Hasil pengujian *side lobe level* tersebut lebih jelasnya bisa dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.5 Kinerja *Side lobe level Diversity*

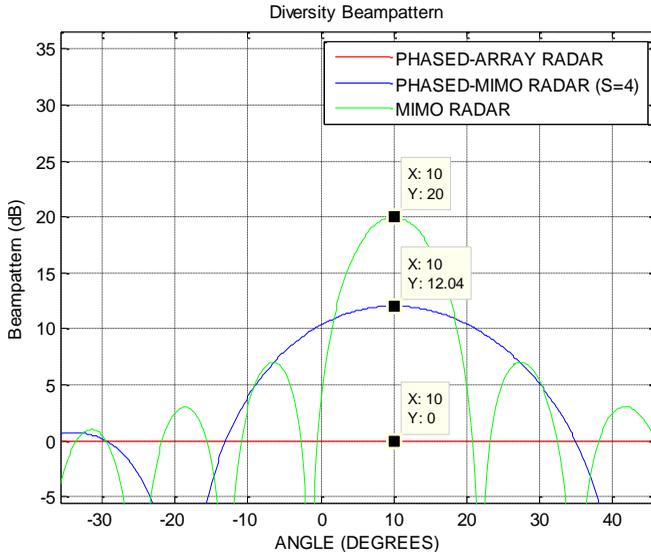
Metode	<i>Side lobe level</i> (dB)	Keterangan
<i>Phased Array</i>	0	Sangat Tinggi
MIMO radar	-12,97	
<i>Phased MIMO</i>	-11,3	

Dari hasil yang diperoleh bisa dilihat bahwa metode *subarray* yang menghasilkan *side lobe level* yang paling rendah (paling bagus) adalah metode radar *phased array* dan *level side lobe* yang paling tinggi (paling buruk) diperoleh ketika menggunakan metode radar MIMO

4.1.2.3 Pengujian Kinerja *Gain*

Pengujian kinerja *Level Gain* merupakan kinerja berikutnya yang sangat dipertimbangkan dalam menggunakan radar. *Gain* erat kaitannya dengan jarak pancar yang bisa dijangkau oleh radar.

Level Gain dari masing-masing metode memiliki perbedaan yang mencolok seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.8 berikut ini.



Gambar 4.8 Kinerja *Level Gain* dari ketiga metode *subarray*

Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa nilai *Level Gain* masing-masing metode *subarray* bervariasi. Antara *Phased Array* dan *Phased MIMO* memiliki selisih perbedaan *Gain* yang tidak terlalu besar. Hasil pengujian kinerja *level Gain* tersebut disajikan lebih jelas dalam tabel 4.6 berikut ini.

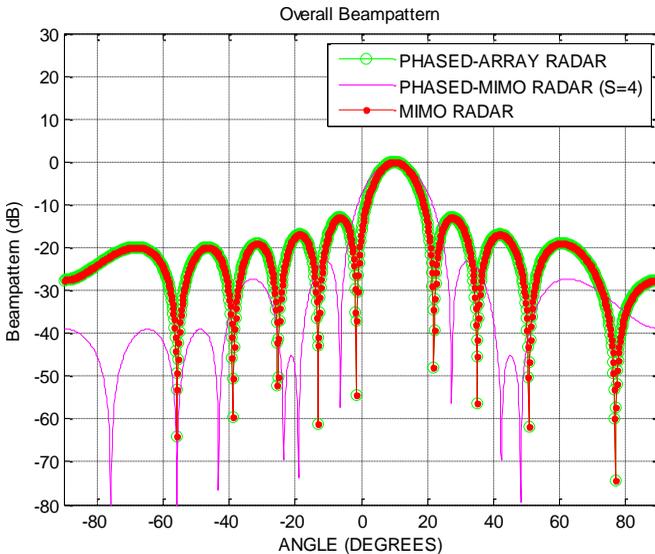
Tabel 4.6 Kinerja *Gain Diversity*

Metode	<i>Gain</i> (dB)	Keterangan
<i>Phased Array</i>	0	Paling rendah
MIMO radar	20	Paling Tinggi
<i>Phased MIMO</i>	12,04	

4.1.3 Pemodelan Overall *Beampattern*

Pada langkah selanjutnya penelitian ini menganalisis kinerja radar (*main beam width*, *Side lobe level*, dan *Gain*) ketika sinyal yang dipantulkan target diterima pada antena *receiver*. Penggunaan ketiga metode *subarray* dibandingkan kinerjanya melalui beamforming yang terbentuk. Antena yang digunakan adalah antena *Uniform Linear Array* (ULA) dimana antena jenis ini memiliki konfigurasi antena *array* dengan jarak antar elemen dan amplitudo yang identik. Target diasumsikan berada pada posisi 10° terhadap antena referensi.

Hasil simulasi *beampattern* yang diperoleh pada *receiver* ditunjukkan pada gambar 4.9. Hasil simulasi ini diplot pada bidang cartesian.

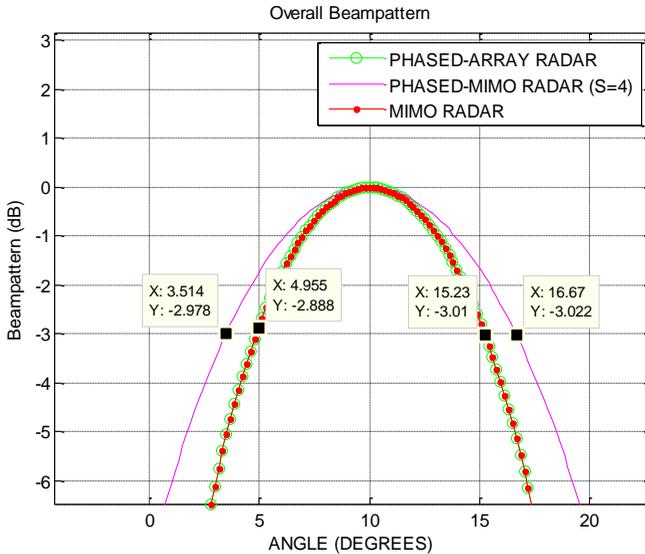


Gambar 4.9 Hasil Simulasi Beamforming pada *receiver*

4.1.3.1 Pengujian Kinerja *Main beam width*

Dari gambar 4.9 bisa diamati beberapa kinerja radar pada *receiver* (*overall beampattern*). Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *main beam width* (HPBW) pada pola radiasi yang terbentuk.

Pengujian *beam width* dilakukan dengan mengasumsikan target berada pada sudut 10° terhadap *array*. Hasil simulasi *main beam width* pada MatLab dengan parameter seperti pada ditunjukkan pada gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4.10 Kinerja *Main beam width* radar pada 10°

Dari gambar 4.10 dapat diperoleh nilai *main beam width* ketika sinyal diterima pada *receiver*. Nilai *beam width* ini dihitung sesuai dengan persamaan 2.13 pada bab sebelumnya.

Nilai *main beam width* (HPBW) yang diperoleh lebih jelasnya disajikan dalam tabel 4.7 berikut ini.

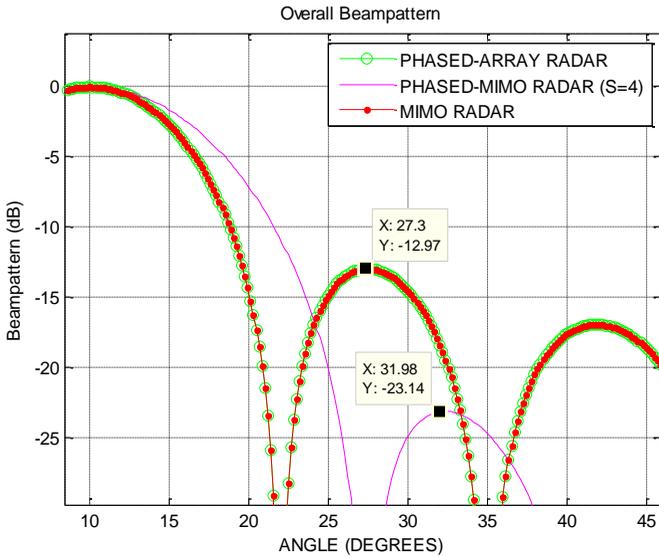
Tabel 4.7 Kinerja *Beam width* dari target menuju Penerima

Metode	<i>Beam width</i>	Keterangan
<i>Phased Array</i>	$10,82^\circ$	Paling sempit
MIMO radar	$12,82^\circ$	
<i>Phased MIMO</i>	$13,88^\circ$	Paling lebar

4.1.3.2 Pengujian Kinerja *Side lobe level*

Pengujian kinerja *Side lobe level* (SLL) pada *receiver* radar dilakukan dengan menggunakan 10 elemen antena *Uniform Linear Array* (ULA).

Pengujian ini dilakukan dengan tiga metode *subarray* berbeda, Pengujian pertama dilakukan dengan mengasumsikan target berada pada sudut 10° terhadap *array*. Hasil pengujian *main beam width* dengan parameter seperti ini ditunjukkan pada gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Kinerja *Side lobe level*, target terletak pada 10°

Gambar 4.11 menunjukkan nilai *side lobe level* yang diperoleh dengan memperbesar Gambar 4.9 yang sudah ditampilkan sebelumnya. Bisa dilihat perbandingan *side lobe level* dari masing-masing metode *subarray*. Tinggi rendahnya *subarray* sangat berpengaruh pada daya tahan radar terhadap interferensi dan *noise* yang disebabkan oleh lingkungan.

Hasil pengujian *side lobe level* tersebut lebih jelasnya bisa dilihat pada tabel 4.8 berikut ini.

Tabel 4.8 Kinerja SLL dari target menuju Penerima

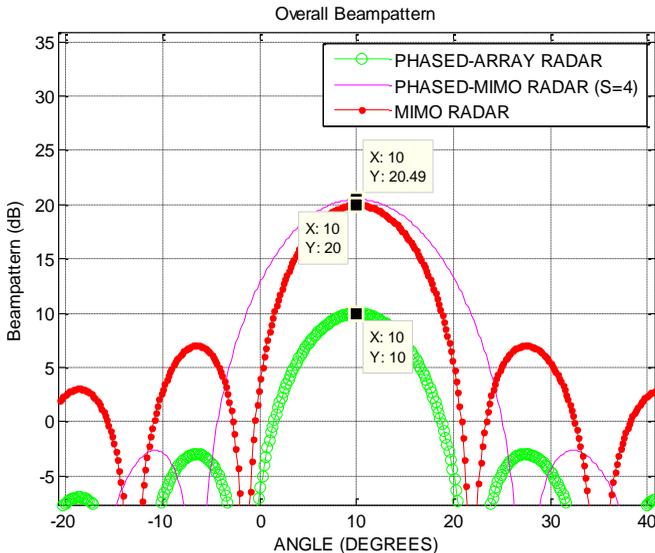
Metode	Side lobe level (dB)	Keterangan
Phased Array	-12,97	
MIMO radar	-12,97	
Phased MIMO	-23,11	Paling rendah

Dari hasil yang diperoleh bisa dilihat bahwa metode *subarray* yang menghasilkan *side lobe level* yang paling rendah (paling bagus) adalah metode radar *phased MIMO*.

4.1.3.3 Pengujian Kinerja Gain

Pengujian kinerja *Level Gain* merupakan kinerja berikutnya yang sangat dipertimbangkan dalam menggunakan radar. *Gain* erat kaitannya dengan jarak pancar yang bisa dijangkau oleh radar.

Level Gain dari masing-masing metode *subarray* dapat dilihat dan diamati seperti pada gambar 4.12 berikut ini.



Gambar 4.12 Kinerja *Level Gain* dari ketiga metode *subarray*

Dari gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai *Level Gain* masing-masing metode *subarray* bervariasi. Antara radar MIMO dan radar *Phased* MIMO memiliki selisih perbedaan *Gain* yang tidak terlalu besar. Hasil pengujian kinerja *level Gain* tersebut disajikan lebih jelas dalam tabel 4.9 berikut ini.

Tabel 4.9 Kinerja *Gain* dari target menuju Penerima

Metode	<i>Gain</i> (dB)	Keterangan
<i>Phased Array</i>	10	Paling rendah
MIMO radar	20	
<i>Phased</i> MIMO	20,49	Paling tinggi

Dari tabel 4.9 diperoleh kesimpulan bahwa radar *phased* MIMO memiliki *level Gain* yang paling bagus dibandingkan dengan dua metode yang lain pada sisi *transmit*. Hal ini sudah sesuai dengan teori yang ada pada bab sebelumnya. Radar *phased* MIMO menghasilkan *gain* sebesar 20,49 dB.

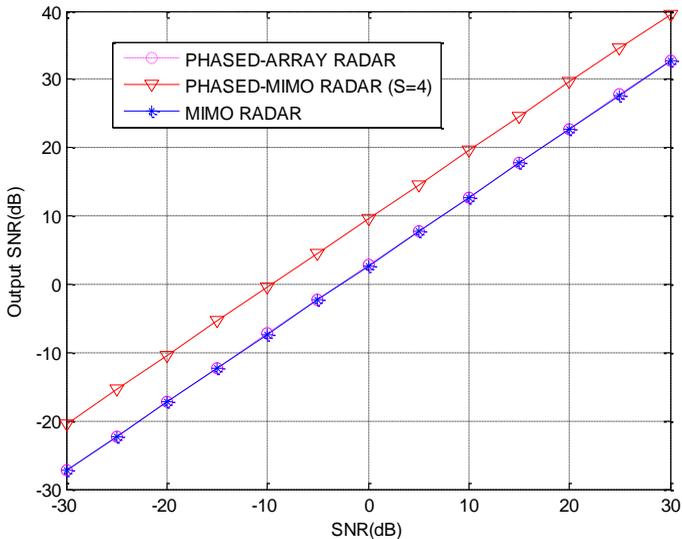
4.1.4 Pengujian Kinerja SINR

Pengujian kinerja SINR pada *receiver* dilakukan dengan menggunakan 10 elemen antena *Uniform Linear Array* (ULA).

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja SINR masing-masing metode *subarray*. SINR merupakan parameter yang sangat dipertimbangkan dalam sistem radar. SINR yang bagus diindikasikan dengan nilainya yang tinggi. Parameter yang diatur berupa nilai INR (*interference to noise ratio*). Hasilnya diplot dengan menggunakan MatLab pada sumbu cartesian dengan sumbu absisnya merupakan nilai SNR dan sumbu ordinatnya merupakan nilai SINR pada masing-masing metode radar.

4.1.4.1 Dominan Interferensi

Pengujian kinerja SINR pertama yang dilakukan adalah pengujian pada saat kondisi interferensi maksimum (dominan). Pada penelitian ini ditetapkan nilai INR = 30 dB. Nilai INR ini merupakan perbandingan antara nilai daya Interferensi dengan nilai daya *noise* yang mempengaruhi sistem radar. Hasil pengujian SINR dengan parameter seperti ini ditunjukkan pada gambar 4.13

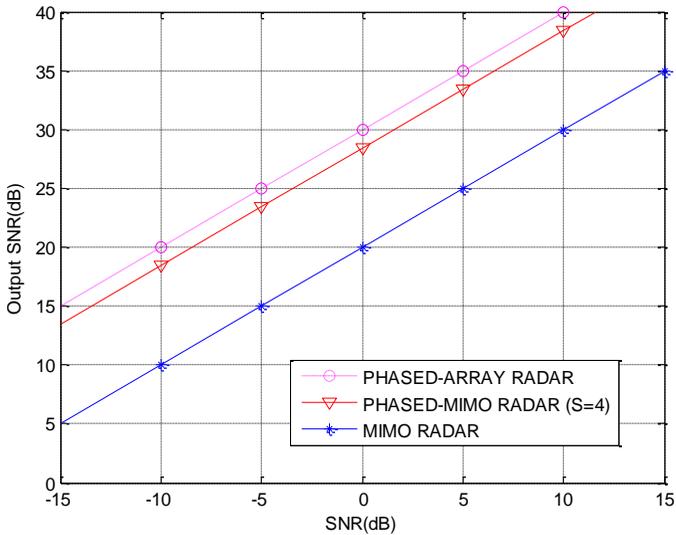


Gambar 4.13 Kinerja SINR (INR=30 dB)

Dari gambar 4.13 diatas bisa dilihat nilai SINR pada ketiga metode *subarray*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa SINR phase MIMO memiliki nilai yang paling bagus diantara semua metode *subarray*. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa teknik radar *phased* MIMO memiliki kelebihan dibanding dua metode lain dalam hal SINR ketika sama-sama dikenai interferensi yang dominan. Dominan disini dimaksudkan adalah jika dibandingkan terhadap daya *noise*.

4.1.4.2 Dominan Noise

Pengujian kinerja SINR selanjutnya yang dilakukan adalah pengujian pada saat kondisi *noise* maksimum (dominan). Pada penelitian ini ditetapkan nilai INR = -30 dB. Nilai INR ini merupakan perbandingan antara nilai daya Interferensi dengan nilai daya *noise* yang mempengaruhi sistem radar. Hasil pengujian SINR dengan parameter seperti ini ditunjukkan pada gambar 4.14



Gambar 4.14 Kinerja SINR (INR= -30 dB)

Dari gambar 4.14 diatas bisa dilihat nilai SINR pada ketiga metode *subarray*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa SINR phase MIMO memiliki nilai yang berada dinantara dua metode *subarray* lainnya.

4.2 Pengujian lebih lanjut (*Subarray* S= 1-10)

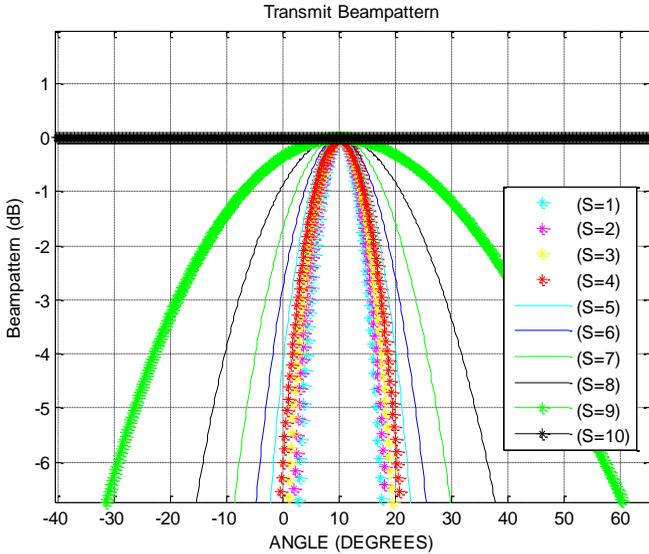
Setelah selesai melakukan analisis kinerja pada ketiga metode *subarray*, untuk menguatkan dan menambah analisis penelitian ini dilakukan pengujian tingkat lanjut. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati perubahan kinerja radar dengan merubah-ubah jumlah *subarray* mulai dari satu *subarray* sampai sepuluh *subarray*. Dalam hal ini kita mengesampingkan dulu nama dari masing-masing metode sehingga dalam kasus ini kita mengasumsikan penentuan jumlah *subarray* dipandang secara umum.

4.2.1 Pengujian *Main beam width* dengan (S = 1-10)

Beam width (HPBW) yang dihasilkan memiliki karakteristik tertentu yang berubah seiring pertambahan jumlah *subarray*. *Beam*

width yang dihasilkan pada sisi *transmit*, *diversity*, dan *receiver* akan dianalisis sehingga diperoleh kesimpulan untuk memperoleh nilai *beam width* terbaik dalam menggunakan *subarray*.

Hasil simulasi yang dihasilkan pada sisi *transmit* ditampilkan dalam gambar 4.15 berikut ini.

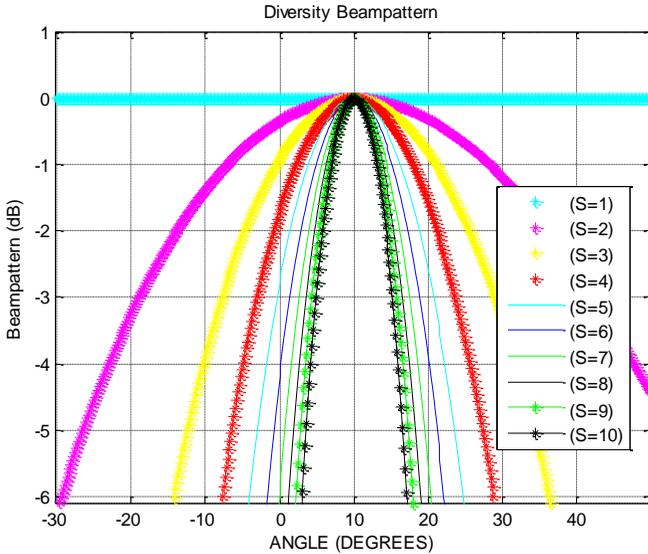


Gambar 4.15 *Transmit Beam width* dengan *Subarray S* ($S=1-10$)

Dari gambar 4.15 bisa dilihat bahwa *beam width* yang dihasilkan pada metode *subarray*. Pertambahan jumlah *subarray* berbanding lurus terhadap nilai *beam width*. Semakin banyak jumlah *subarray* menyebabkan semakin lebarnya nilai *beam width*. Ini artinya pada sisi *transmit* penggunaan radar *phased array* ($S=1$) menghasilkan nilai *beam width* yang paling sempit.

Diversity beampattern diperoleh dengan membangkitkan sinyal yang saling orthogonal satu sama lain antara masing-masing *subarray*.

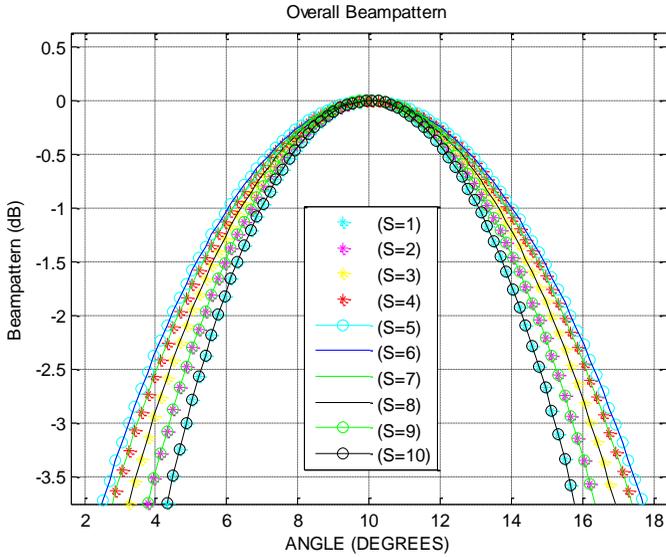
Adapun hasil yang diperoleh dengan melakukan simulasi pada *diversity beampattern* ditunjukkan pada gambar 4.16. Hasil simulasi ini diplot pada bidang cartesian. Nilainya terlebih dahulu dinormalisasi untuk mempermudah analisis.



Gambar 4.16 Diversity Beam width dengan Subarray S (S=1-10)

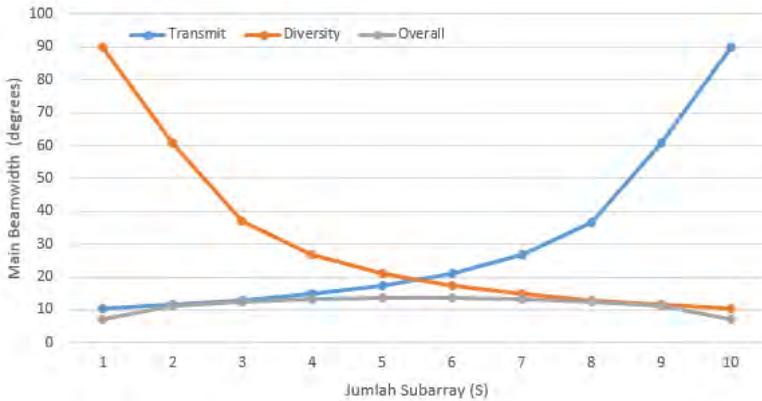
Dari gambar 4.16 bisa dilihat bahwa *beam width* yang dihasilkan pada metode *subarray*. Pertambahan jumlah *subarray* berbanding terbalik terhadap nilai *beam width*. Semakin banyak jumlah *subarray* menyebabkan semakin sempitnya nilai *beam width*. Ini artinya pada sinyal *diversity* penggunaan radar MIM (S=10) menghasilkan nilai *beam width* yang paling sempit.

Hasil simulasi yang dihasilkan pada *receiver* ditampilkan dalam gambar 4.17 berikut ini. Gambar tersebut memberikan informasi *beam width* yang dihasilkan pada metode *subarray*. Pertambahan jumlah *subarray* membentuk sebuah pola perulangan seperti pencerminan dimana titik tengahnya merupakan *subarray* dengan jumlah S = 5, dan S=6. *Beam width* pada titik tengahnya merupakan *beam width* yang paling lebar dan *beam width* yang semakin sempit diperoleh pada kedua sisi seiring semakin jauhnya dari titik tengah. *Beam width* yang diperoleh sudah sesuai dengan teori bahwa, penggunaan teknik radar *phased array* dan radar MIMO memberikan nilai *beam width* yang paling sempit jika dibandingkan dengan metode radar *phased* MIMO.



Gambar 4.17 Overall Main *Beam width* dengan *Subarray* (S=1-10)

4.2.2 Trend Line Mainbeam width

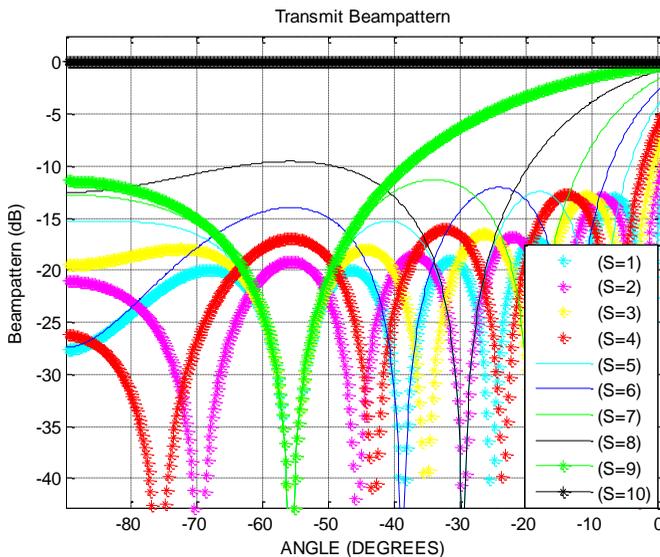


Gambar 4.18 Kurva *Main beam width* terhadap *Jumlah Subarray*

4.2.3 Pengujian Side lobe level dengan (S = 1-10)

Side lobe level (SLL) yang dihasilkan memiliki karakteristik tertentu yang berubah seiring pertambahan jumlah subarray. Side lobe level yang dihasilkan pada sisi transmit, diversity, dan receiver akan dianalisis sehingga diperoleh kesimpulan untuk memperoleh nilai Side lobe level terendah dalam menggunakan subarray.

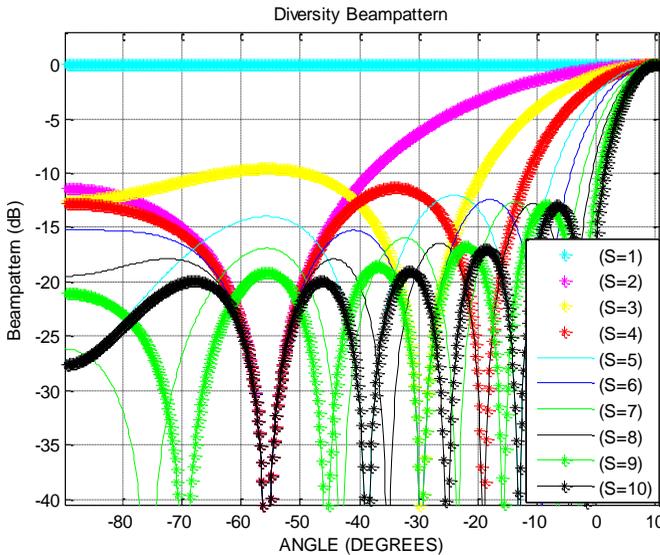
Hasil simulasi yang dihasilkan pada sisi transmit ditampilkan dalam gambar 4.19 berikut ini.



Gambar 4.19 Transmit Side lobe level dengan Subarray (S=1-10)

Dari gambar 4.19 bisa dilihat bahwa Side lobe level yang dihasilkan pada metode subarray. Pertambahan jumlah subarray menghasilkan nilai Side lobe level yang hampir konstan dengan penggunaan subarray dari satu sampai delapan, kemudian mengalami penurunan pada penggunaan Sembilan subarray dan mengalami kenaikan ketika sepuluh subarray diterapkan.

Hasil simulasi yang dihasilkan dengan sinyal diversity ditampilkan dalam gambar 4.20 berikut ini.



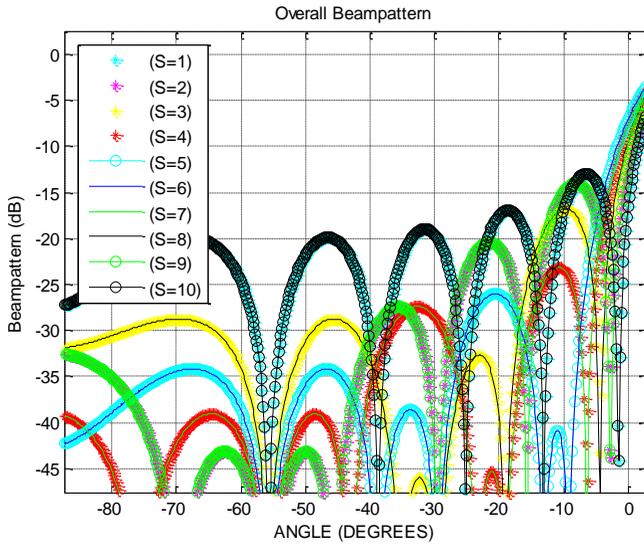
Gambar 4.20 Diversity Side lobe level dengan Subarray (S=1-10)

Dari gambar 4.20 bisa dilihat bahwa *Side lobe level* yang dihasilkan pada metode *subarray*. Pertambahan jumlah *subarray* menghasilkan penurunan nilai *Side lobe level* dari satu *subarray* sampai empat *subarray*, kemudian pertambahan jumlah *subarray* yang semakin banyak hanya menghasilkan nilai *side lobe level* yang hampir konstan sampai jumlah *subarray* sama dengan jumlah elemen antena.

Hasil simulasi yang dihasilkan dengan pada *receiver* (overall *beampattern*) ditampilkan pada gambar 4.21 berikut ini.

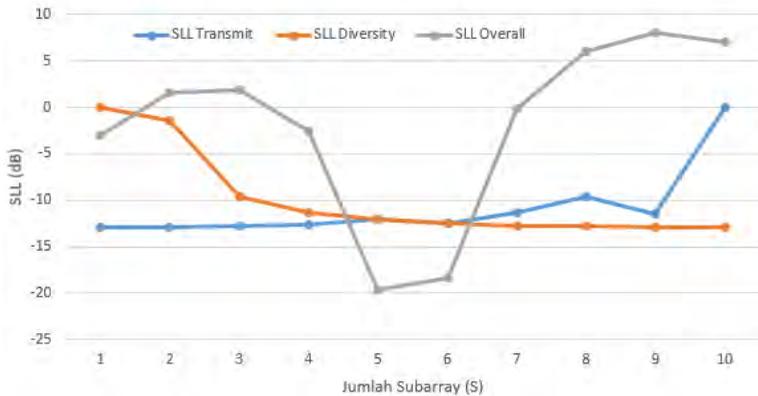
Gambar tersebut memberikan informasi *side lobe level* yang dihasilkan pada metode *subarray*. Pertambahan jumlah *subarray* membentuk sebuah pola yang unik dimana terjadi kenaikan dan penurunan yang polanya bisa dilihat pada gambar 4.22 berikut ini.

Side lobe level pada overall *beampattern* memberikan informasi dimana terlihat bahwa penggunaan jumlah *subarray* dengan nilai sekitar $S = 0,5 X$ maka diperoleh nilai *side lobe level* yang paling rendah. *Side lobe level* yang paling rendah mengindikasikan daya tahan yang lebih bagus terhadap pengaruh interferensi.



Gambar 4.21 Overall Side lobe level dengan Subarray S (S=1-10)

4.2.4 Trend Line Side lobe level

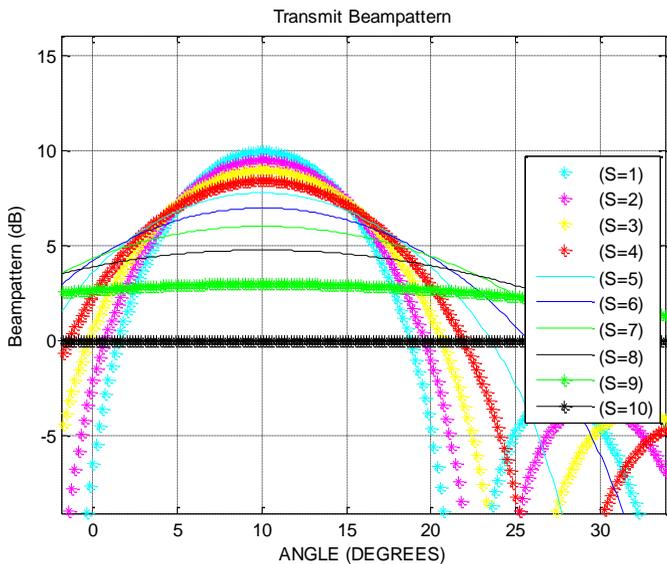


Gambar 4.22 Kurva Side lobe level terhadap Jumlah Subarray

4.2.5 Pengujian *Level Gain* dengan ($S = 1-10$)

Level gain yang dihasilkan memiliki karakteristik tertentu yang berubah seiring pertambahan jumlah *subarray*. *Level gain* yang dihasilkan pada sisi *transmit*, *diversity*, dan *receiver* akan dianalisis sehingga diperoleh kesimpulan untuk memperoleh nilai *beam width* terbaik dalam menggunakan *subarray*.

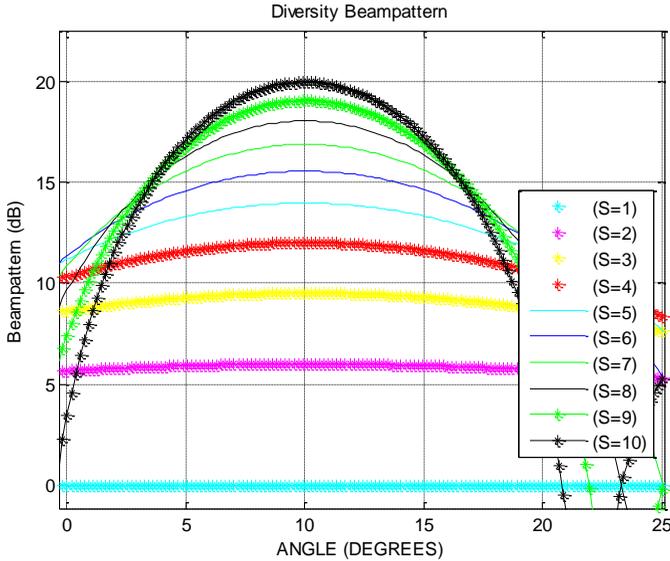
Hasil simulasi yang dihasilkan pada sisi *transmit* ditampilkan dalam gambar 4.23 berikut ini.



Gambar 4.23 *Transmit Gain* dengan *Subarray S* ($S=1-10$)

Dari gambar 4.23 belum bisa dilihat secara jelas pengaruh pertambahan *subarray* pada *level gain* yang dihasilkan. Hasil simulasi yang diperoleh belum memberikan informasi karena susah melihat *level gain* antara *subarray* yang satu dengan *subarray* yang lain karena antara garis yang satu dengan garis yang lain ada yang saling bersinggungan. Secara sekilas terlihat bahwa pertambahan jumlah *subarray* mengurangi *level gain* yang dihasilkan.

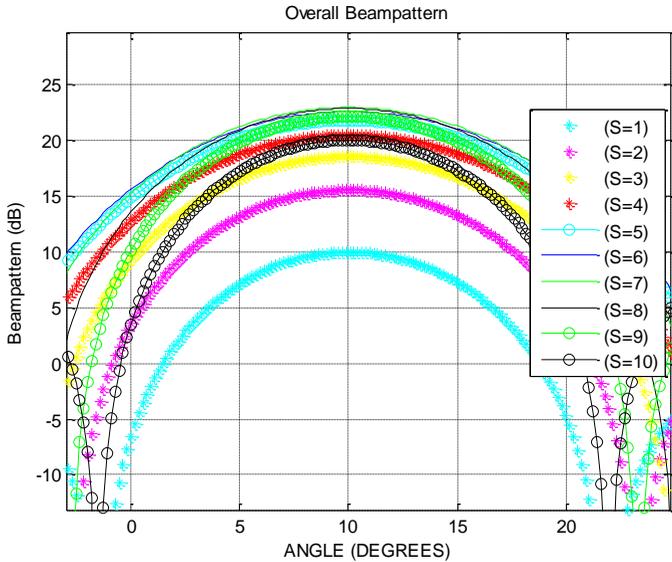
Hasil simulasi yang dihasilkan dengan sinyal *diversity* ditampilkan dalam gambar 4.24 berikut ini.



Gambar 4.24 Diversity Gain dengan Subarray S (S=1-10)

Dari gambar 4.24 secara sekilas terlihat bahwa penambahan jumlah *subarray* meningkatkan *level gain* yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah *subarray* gain yang dihasilkan semakin besar. Pada penerapan jumlah *subarray* sama dengan jumlah elemen (kondisi radar MIMO) diperoleh *level gain* yang paling tinggi. Hal ini sesuai dengan teori dimana penggunaan sinyal *diversity* pada radar MIMO menghasilkan kinerja *gain* yang paling bagus dibandingkan dengan penggunaan metode lain seperti pada radar *phased array*, radar *phased MIMO*.

Setelah sinyal dipantulkan target, sinyal tersebut diterima oleh *receiver*. Sinyal yang terpantul target tersebut membentuk pola radiasi yang dinamakan overall beampattern. Hasil simulasi overall beampattern pada *receiver* ditampilkan dalam gambar 4.25 berikut ini.



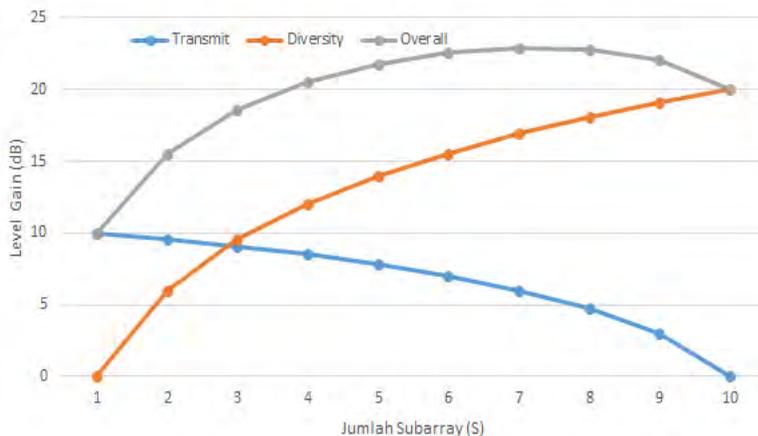
Gambar 4.25 Overall Gain dengan Subarray S (S=1-10)

Dari gambar 4.25 secara sekilas terlihat bahwa penambahan jumlah *subarray* pada jumlah meningkatkan *level gain* yang dihasilkan, namun kembali mengalami penurunan ketika jumlah *subarray* semakin banyak sampai pada penerapan jumlah *subarray* sama dengan jumlah elemen antenna. Hasil yang terbaik diperoleh dengan penerapan metode radar *phased MIMO*, yang menghasilkan kinerja *gain* yang paling bagus.

Kurva penambahan jumlah *subarray* terhadap *level gain* bisa diamati pada gambar 4.26 berikut ini. Dari gambar tersebut bisa dianalisis secara mudah pengaruh penambahan *subarray* terhadap *level gain*. *Level* yang diperoleh diplot dalam decibel untuk mempermudah analisis hasil yang diperoleh.

Penggunaan *subarray* yang bernilai $1 < S < X$, dimana S adalah jumlah *subarray* dan X adalah jumlah elemen memberikan *level* yang terbaik pada overall *beampattern*, sedangkan pada sisi *transmit* dan penggunaan sinyal *diversity* memiliki nilai *level gain* yang saling berkebalikan. Pada sisi *transmit* penambahan jumlah *subarray*

pertambahan jumlah *subarray* menyebabkan penurunan *level gain*, sebaliknya pada sinyal *diversity* berlaku hal yang berlawanan.



Gambar 4.26 Kurva *Level Gain* terhadap Jumlah *Subarray*

4.3 Sintesis

Pada penelitian Tugas Akhir ini diperkenalkan sebuah teknik baru pada radar MIMO dengan antenna collocated. Teknik ini berawal dari ide dasar untuk membagi *array* kedalam beberapa *subarray* yang diperbolehkan untuk saling overlap. Setiap *subarray* digunakan untuk membangkitkan bentuk gelombang koheren yang saling orthogonal dengan bentuk gelombang *subarray* yang lain. Pemrosesan *gain* yang koheren diperoleh dengan mendesain vektor bobot untuk setiap *subarray transmit* untuk membentuk sebuah beam kearah tertentu.

Subarray-subarray yang ada bergabung untuk membentuk kinerja radar MIMO yang memiliki kemampuan resolusi sudut yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa teknik radar *phased* MIMO menggabungkan keunggulan dari radar *phased array* dan radar MIMO, menghasilkan performa yang sangat bagus. Hasil simulasi yang dilakukan mendukung teori yang ada dan hal-hal yang mendukung efektivitas dari teknik radar *phased* MIMO. Rumusan baru dari teknik radar *phased* MIMO membuka ruang untuk pengembangan radar MIMO lebih lanjut.

LAMPIRAN

LISTING PROGRAM

```
%Fungsi utama
function [Sinyal_Tx] = plot_AF()
clear all;clc;close all
% Jumlah antenna Transmitter
X = 10;
% Jumlah antenna Receiver
Y = 10;
% Jarak antar elemen antenna Transmitter
d_x = 0.5;
% Arah sudut target (antenna array sbg ref)
sdt_tar = 10*pi/180;
nx = (-1i*d_x*2*pi*(0:X-1))*sin(sdt_tar);
% Uplink steering vector
u_tar = exp(-i*d_x*2*pi*(0:X-1))*sin(sdt_tar);
% Downlink steering vector (Target ke Receiver)
d_tar = exp(-i*pi*(0:Y-1))*sin(sdt_tar);
jlh_subarrays = [1 4 10];
% Deklarasi pola beam awal
Tx_pattern_conv = [];
Dx_pattern_conv = [];
Rx_pattern_conv = [];
% letak interferensi terjadi
sdt_intrf = [-30 -10]*pi/180;
% str vector dari interferensi
u_intrf = exp(-i*d_x*2*pi*(0:X-1))*sin(sdt_intrf);
d_intrf = exp(-i*pi*(0:Y-1))*sin(sdt_intrf);
P_noise = 1;
INR = -30;
P_intrf = 10^(INR/10);
SNR = -30:5:30;
L_snr = length(SNR);
sinr_o = zeros(L_snr,length(jlh_subarrays));
L_s = length(jlh_subarrays);
for ssub = 1:length(jlh_subarrays);
    S_sub = jlh_subarrays(ssub); %
```

```

Jumlah Subarray
    L_sub = X - S_sub + 1; %
Jumlah antena dlm setiap subarray
    B_u_conv =
uplink_conventional_beamforming(u_tar, S_sub,
L_sub);
    Theta_grid = [linspace(-pi/2,pi/2,1000)];
    H = (-j*d_x*2*pi * (0:X-1)');
    F = sin(Theta_grid);
    Cx = H*F;
    Tx_grid = exp(-j*d_x*2*pi * (0:X-
1)')*sin(Theta_grid);
    kk = 1; % Subarray pertama (sebagai
Referensi)
    % Pola beam dari Transmitter
    Tx_pattern =
abs(B_u_conv(:,kk)'*Tx_grid(kk:L_sub + kk-
1,:)).^2;
    Tx_pattern = 10*log10(Tx_pattern);
%     Tx_pattern = Tx_pattern - max(Tx_pattern)
    Tx_pattern_conv = [Tx_pattern_conv;
Tx_pattern];
    Dx_pattern =
abs(u_tar(1:S_sub)'*Tx_grid(1:S_sub,:)).^2;
    Dx_pattern = 10*log10(Dx_pattern);
%     Dx_pattern = Dx_pattern - max(Dx_pattern);
    Dx_pattern_conv = [Dx_pattern_conv;
Dx_pattern];
%     Virtual Steering Vector
    [v_tar] = virtual_sv(sdt_tar, X, d_x, Y,
L_sub, S_sub, B_u_conv);
    b_d_conv = v_tar/(norm(v_tar)); %
%downlink beamformer
% Compute and plot overall Tx/Rx beampattern
    w_d = b_d_conv; % Use this to plot
overall beampattern for Example 1 (non adaptive)
    [V_grid] = virtual_sv(Theta_grid, X,
d_x, Y, L_sub, S_sub, B_u_conv);

```

```

        Rx_pattern =
[10*log10(abs(w_d'*V_grid).^2)];
% Rx_pattern = Rx_pattern - max(Rx_pattern);
        Rx_pattern_conv = [Rx_pattern_conv;
Rx_pattern];

% Menghitung virtual steering vector
        [v_tar] = virtual_sv(sdt_tar, X, d_x, Y,
L_sub, S_sub, B_u_conv);
        [v_intrf] = virtual_sv(sdt_intrf, X, d_x, Y,
L_sub, S_sub, B_u_conv);%required for optimal
SINR_o
        for snr = 1:L_snr, snr;
            P_tar = 10^(SNR(snr)/10);
            [R] = MIMO_radar_signal_model(S_sub,
u_tar, u_intrf, d_tar, d_intrf, P_tar, P_intrf,
B_u_conv);
            b_d_conv = v_tar/(norm(v_tar));
            SINR_conv(snr,ssub) =
10*log10((X/S_sub)*P_tar*(abs(b_d_conv'*(v_tar))
)^2/real(b_d_conv'*((X/S_sub)*P_intrf*v_intrf*v_
intrf'+ P_noise*eye(S_sub*Y))*b_d_conv))
        end

end

% Plot Beampattern

Theta = Theta_grid;
plot(Theta*180/pi,1.0*T_x_pattern_conv(1,:), 'r-
',Theta*180/pi,1.0*T_x_pattern_conv(2,:), 'b-
',Theta*180/pi,T_x_pattern_conv(3,:), 'g-
', 'linewidth',1),grid
axis([-90 90 -80 20]),title ('Transmit
Beampattern'),xlabel('ANGLE
(DEGREES)'),ylabel('Beampattern (dB)')
legend('PHASED-ARRAY RADAR', 'PHASED-MIMO RADAR
(S=4)', 'MIMO RADAR')

```

```

% % %
figure
Theta = Theta_grid;
plot(Theta*180/pi,1.0*Dx_pattern_conv(1,:), 'r-
',Theta*180/pi,1.0*Dx_pattern_conv(2,:), 'b-
',Theta*180/pi,Dx_pattern_conv(3,:), 'g-
', 'linewidth',1),grid
axis([-90 90 -80 20]),title ('Diversity
Beampattern'),xlabel ('ANGLE
(DEGREES)'),ylabel ('Beampattern (dB)')
legend('PHASED-ARRAY RADAR','PHASED-MIMO RADAR
(S=4)','MIMO RADAR')
Rx_pattern_conv =
Tx_pattern_conv+Dx_pattern_conv;
figure
plot(Theta*180/pi,1.0*Rx_pattern_conv(1,:), 'g-
o',Theta*180/pi,1.0*Rx_pattern_conv(2,:), 'm-
',Theta*180/pi,Rx_pattern_conv(3,:), 'r-
', 'linewidth',1),grid
axis([-90 90 -80 30]),title ('Overall
Beampattern'),xlabel ('ANGLE
(DEGREES)'),ylabel ('Beampattern (dB)')
legend('PHASED-ARRAY RADAR','PHASED-MIMO RADAR
(S=4)','MIMO RADAR')
figure
plot(SNR,SINR_conv(:,1), 'm:o',SNR,SINR_conv(:,2)
,'r-v',SNR,SINR_conv(:,3), 'b-*'),grid
xlabel('SNR (dB)'), ylabel('Output SNR (dB)')
legend('PHASED-ARRAY RADAR','PHASED-MIMO RADAR
(S=4)','MIMO RADAR')

%membangkitkan sinyal MIMO
function [R] = MIMO_radar_signal_model(S_sub,
u_tar, u_intrf, d_tar, d_intrf, P_tar, P_intrf,
B_u)
X = length(u_tar);
Y = length(d_tar);
L_sub = X - S_sub + 1;
L_intrf = length(u_intrf(1,:));
% ----- Orthogonal waveforms -----

```

```

N = 400; % number of samples within one radar
pulse (fast-time)
phi = [];
for kk = 1:S_sub
    phi = [phi; exp(j*2*pi*(kk/N)*(0:N-1))];
end
% compute signals reflect by targets (observed
by receiver)
T = 200; % number of radar pulses (slow-time)
y = zeros(S_sub*Y,T); % K_sub matched filter
applied to each antenna output (y is of size
K_sub*N \times T)
Beta_tar = sqrt(P_tar)*
(randn(1,T)+li*randn(1,T));
Beta_intrf = sqrt(P_intrf)*
(randn(L_intrf,T)+li*randn(L_intrf,T));
for tt = 1:T; % tt is the snapshot number
    % compute signals observed at targets
    x_tar = zeros(1,N);
    x_intrf = zeros(L_intrf,N);
    for kk = 1:S_sub
        x_tar = x_tar +
Beta_tar(tt)*(B_u(:,kk)'\* u_tar(kk:L_sub + kk-
1))* phi(kk,:);
        for ii = 1:L_intrf
            x_intrf(ii,:) = x_intrf(ii,:) +
Beta_intrf(ii,tt)*(B_u(:,kk)'\* u_intrf(kk:L_sub
+ kk-1,ii))*phi(kk,:);
        end
        Z = (randn(Y,N)+li*randn(Y,N));
        x1 = d_tar * x_tar;
        x2 = d_intrf * x_intrf;
        x = x2 + Z;
        y((kk-1)*Y+1:kk*Y,tt) =
(1/N)*x*conj(phi(kk,:).');
    end
end
R = (1/T)*(y*y');

%pembentukan beam (beamforming)

```

```

function [B_u] =
uplink_conventional_beamforming(u_tar, S_sub,
L_sub);
b_u = u_tar(1:L_sub);
n_u = norm(b_u);
b_u = b_u/n_u ;
B_u = kron(ones(1, S_sub), b_u);

%menghitung virtual steering vector
function [v_sv] = virtual_sv(sdt_tar, X, d_x, Y,
L_sub, no_subarrays, B_u);
Tx_sv = exp(-i*d_x*2*pi * (0:X-
1) '*sin(sdt_tar));
Rx_sv = exp(-i*pi * (0:Y-1) '*sin(sdt_tar)); %
Actual receiving steering vectors
v_sv = [];
for kk = 1:no_subarrays
    v_temp = [];
    b_u = B_u(:,kk);
    for jj = 1:length(sdt_tar)
        %abs(w_u'*a_intrf(i:M_sub + i-1, jj))
        v_temp = [v_temp, (b_u'*Tx_sv(kk:L_sub +
kk-1, jj))*Rx_sv(:,jj)];
    end
    v_sv = [v_sv; v_temp];
end

```

BAB 5

PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil pemodelan simulasi dan hasil kajian yang telah dilakukan pada bab sebelumnya. Selain itu, dalam bab ini juga disampaikan beberapa saran yang dapat digunakan untuk pengembangan teknologi radar untuk kebutuhan militer.

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan simulasi beamforming dan SINR pada beberapa teknik antena, sesuai dengan asumsi-asumsi yang telah dilakukan sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Beam width* (HPBW) yang dihasilkan dengan teknik radar *phased* MIMO dengan menggunakan empat *subarray* memiliki lebar sekitar $13,88^\circ$. *Beam width* ini merupakan nilai yang paling lebar dibandingkan dengan metode radar *phased Array* dan radar MIMO.
2. Pada nilai *side lobe level* radar *phased* MIMO memberikan kinerja paling bagus dibandingkan dengan metode radar *phased array* dan radar MIMO. Nilai *side lobe* yang bagus ditandai dengan nilai yang paling rendah. *Phased* MIMO sendiri hanya menghasilkan *side lobe level* sekitar $-23,11$ dB.
3. Salah satu keunggulan *phased* MIMO adalah kinerja *gain* yang bagus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *level gain* radar *phased* MIMO memiliki nilai yang paling tinggi dibandingkan dengan *level gain* metode lain. *Level gain* yang dihasilkan bernilai sekitar $20,49$ dB.
4. Kinerja lain yang tidak kalah pentingnya adalah *Signal To Interference And Noise Ratio* (SINR). Pada penggunaan interferensi dominan diperoleh kesimpulan bahwa radar *phased* MIMO memiliki kinerja yang paling bagus, sedangkan pada penggunaan *noise* dominan kinerja SINR *phased* MIMO berada diantara radar *phased array* dan radar MIMO. Hal ini menunjukkan bahwa radar *phased* MIMO memiliki kemampuan yang lebih terhadap interferensi jika dibandingkan dengan metode radar *phased array* dan radar *phased* MIMO.

5.2 Saran

Penelitian berikutnya untuk pengembangan sistem radar *phased* MIMO, dapat memperhatikan beberapa hal sebagai berikut:

1. Menggunakan elemen yang lebih banyak dibandingkan pada penelitian ini, misalnya penggunaan elemen sebanyak 15 elemen.
2. Pengujian berikutnya bisa dilakukan dengan memvariasikan jumlah *subarray*, sehingga jumlah *subarray* yang satu dengan *subarray* yang lainnya memiliki jumlah yang berbeda-beda.
3. Mengimplementasikan langsung teknik radar *phased* MIMO dengan membuat prototype radar. Modul USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) bisa digunakan untuk membantu pengimplementasian di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Hassanien and S. A. Vorobyov, "Phased-MIMO Radar: A Tradeoff Between *Phased-Array* and MIMO Radars", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 58, No. 6, June 2010.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill, 2001.
- [3] W.L. Stutzman, G.A. Thiele, *Antena Theory and Design*, 3th ed., United States, A John Wiley & Sons, Inc 2013.
- [4] C.A. Balanis, *Antena Theory*, 3th ed., Canada, A John Wiley & Sons, Inc 2005.
- [5] Visser, H.J., "*Array and Phased Array Antena Basics*", England, John Wiley & Sons, 2005.
- [6] A. Mudrik, *Antena: "Prinsip dan Aplikasi"*, Yogyakarta, Graha Ilmu, 2011.
- [7] Sahalos, J.N., "*Orthogonal Methods for Array Synthesis: Theory and the ORAMA Computer Tool*", England, John Wiley & Sons, 2006.
- [8] Hansen, R.C., "*Phased Array Antenas*", New York, John Wiley & Sons, 2001.
- [9] Mailloux, R.J., "*Phased Array Antena Handbook*", Second Edition, Norwood, Artech House, 2005.
- [10] E. Fishler, A. Haimovich, R. Blum, L. Cimini, D. Chizhik, and R. Valenzuela, "MIMO radar: An idea whose time has come, "in *Proc. IEEE Radar Conf.*, Honolulu, HI, Apr. 2004, vol. 2, pp. 71-78.
- [11] J. Li, P. Stoica, and X. Zheng, "MIMO radar with collocated antennas, "*IEEE Signal Process, Mag.*, vol. 24, pp. 106-114, Sep. 2007.
- [12] F. Daum and J. Huang, "MIMO radar: Snake oil or good idea, "IEEE *Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, pp. 8-12, May 2009.
- [13] D. Fuhmann and G. Antonio, "*Transmit beamforming for MIMO radar systems using signal cross-correlation.*" IEEE *Trans. Aerosp. Electron. Syst.* vol. 44, pp. 171-186, Jan. 2008.

- [14] P. Stoica, J. Li, and Y. Xie, "On probing signal design for MIMO radar," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 8, pp. 4151–4161, Aug. 2007.
- [15] J. Bergin, S. McNeil, L. Fomundam, and P. Zulch, "MIMO *phased array* for SMTI radar," in *Proc. IEEE Aerospace Conf., Big Sky, MT*, Mar. 2008, pp. 1–7.
- [16] J. P. Browning, D. R. Fuhrmann, and M. Rangaswamy, "A hybrid MIMO *phased-array* concept for arbitrary spatial *beam pattern* synthesis," in *Proc. IEEE Digital Signal Processing Signal Processing Education Workshop (DSP/SPE)*, Marco Island, FL, Jan. 2009, pp. 446–450.
- [17] D. Fuhrmann, P. Browning, and M. Rangaswamy, "Constant-modulus partially correlated signal design for uniform linear and rectangular MIMO radar *arrays*," in *Proc. 4th Int. Conf. Waveform Diversity Design (WDD)*, Orlando, FL, Feb. 2009, pp. 197–201.
- [18] D. Fuhrmann, P. Browning, and M. Rangaswamy, "Signaling strategies for the hybrid MIMO *phased-array* radar," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 4, no. 1, pp. 66–78, Feb. 2010.
- [19] A. Hassani and S. A. Vorobyov, "Transmit/receive beamforming for MIMO radar with colocated antennas," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustic, Speech, Signal Processing (ICASSP)*, Taipei, Taiwan, Apr. 2009, pp. 2089–2092.
- [20] S. A. Vorobyov, A. B. Gershman, and Z.-Q. Luo, "Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, pp. 313–324, Feb. 2003.
- [21] J. Li, P. Stoica, *Robust adaptive beamforming*. New York: Wiley, 2006.

RIWAYAT PENULIS



Aris Sanjaya Nasution, dilahirkan di Pagaranbira Jae, 9 Januari 1992. Penulis adalah anak ke enam dari tujuh bersaudara pasangan Muhammad Jamsi Nasution dan Aslamiyah Rangkuti. Penulis memulai jenjang pendidikannya di SD Inpres 100820 Pagaranbira, SMP dan SMA Nurul ,Ilmi Padangsidempuan hingga lulus tahun 2011. Pada tahun berikutnya, penulis masuk ke Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS lewat jalur SNMPTN dan mengambil bidang studi Teknik Telekomunikasi dan

Multimedia. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai organisasi kampus seperti Lembaga Dakwah Kampus dan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro. Penerima manfaat beasiswa Etos ini bercita-cita untuk menjadi seorang pengusaha di bidang telekomunikasi. Beliau dapat dihubungi di alamat email *arissanjayanst@gmail.com*.