

ANALISIS ESTIMASI SUDUT KEDATANGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA ESPRIT PADA KOMUNIKASI *MILLIMETER-WAVE* UNTUK *HYBRID BEAMFORMING*

Egi Ari Wibowo¹, Heroe Wijanto², Iswahyudi Hidayat³

^{1,2,3}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹egiwibowo13@gmail.com, ²heroewijanto@gmail.com, ³iswahyudi.hidayat@gmail.com

Abstrak

Beberapa tahun belakangan ini, pertumbuhan *traffic* komunikasi *wireless* semakin meningkat pesat, hal ini menyebabkan ketersediaan pita frekuensi semakin menipis. Cara untuk mengatasinya adalah dengan memanfaatkan pita frekuensi tinggi yaitu pada band *millimeter-wave* (*mm-wave*). Banyaknya antena yang digunakan pada teknologi *mm-wave* untuk mengatasi *pathloss* yang besar, akan tetapi dapat mengakibatkan kompleksitas yang tinggi pada sisi *hardware* jika menggunakan *digital beamforming*, karena satu *RF chain* terhubung dengan satu antena. *Hybrid beamforming* digunakan untuk meminimalisir penggunaan *RF chain*, sehingga kompleksitas pada sisi *hardware* menurun. Pada penelitian kali ini, telah dilakukan analisis algoritma ESPRIT pada *hybrid beamforming* untuk meningkatkan performansi sistem dalam hal penentuan posisi dan lokasi dari user atau sering disebut estimasi DOA yang nantinya akan digunakan dalam proses *beamforming*. Dari penelitian yang dilakukan, hasilnya adalah semakin banyak antena, *RF chain*, dan semakin besar nilai SNR yang digunakan maka akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi DOA akan semakin tinggi. Sedangkan jika semakin banyak sudut datang maka akurasinya akan semakin menurun. Hasil akurasi terbaik terjadi saat menggunakan jumlah antena 8×8 dan *RF chain* sebanyak 6, dengan nilai Δ sebesar $0,00186^\circ$ dan nilai BER sebesar $5,7 \times 10^{-6}$.

Kata Kunci : *mm-wave*, *hybrid beamforming*, DOA, ESPRIT

Abstract

In recent years, the growth of wireless communication traffic has been increasing rapidly, causing the availability of the frequency bands to be low. The way to overcome this is by utilizing high frequency bands in millimeter-wave (*mm-wave*) band. The number of antennas used in *mm-wave* technology to overcome large path loss. However, high complexity on the hardware side if using digital beamforming, since one *RF chain* is connected to one antenna. Hybrid beamforming is used to minimize the use of *RF chain*, so the complexity on the hardware side decreases. In this research, ESPRIT algorithm analysis on hybrid beamforming has been done to improve system performance in terms of positioning and location of user or often called DOA estimation which will be used in beamforming process. From the research conducted, the result is more and more antenna, *RF chain*, and the bigger SNR value is used then the accuracy of ESPRIT algorithm in doing DOA estimation will be higher. Meanwhile, if more angles come then the accuracy will decrease. The best accuracy results occur when using the number of 8×8 antennas and *RF chains* by 6, with a value of Δ of 0.00186° and a BER value of $5,7 \times 10^{-6}$.

Keywords: *mm-wave*, *hybrid beamforming*, DOA, ESPRIT

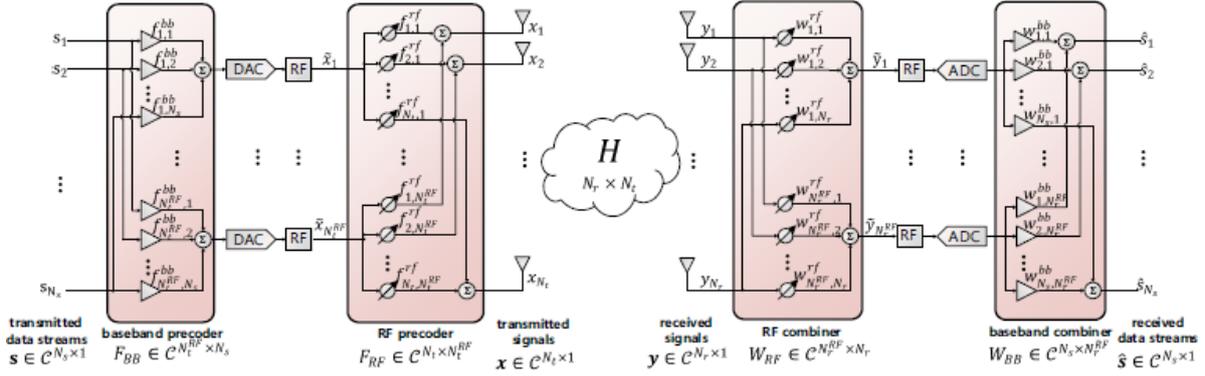
1. Pendahuluan

Pertumbuhan komunikasi *wireless* meningkat pesat, hal ini menyebabkan ketersediaan pita frekuensi semakin menipis karena sudah digunakan untuk beberapa teknologi. Sehingga tidak ada kanal frekuensi yang tersisa untuk teknologi komunikasi *wireless* pada masa depan. Cara untuk mengatasinya adalah dengan memanfaatkan frekuensi tinggi yaitu pada band *millimeter wave* (*mm-wave*) yang memiliki rentang frekuensi 30 – 300 GHz [1]. Akan tetapi penggunaan spektrum *mm-wave* akan menyebabkan *pathloss* yang besar [1,2].

Antena *array* yang banyak digunakan untuk mengatasi masalah *pathloss* yang besar. Tapi, banyaknya antena yang digunakan akan menyebabkan kompleksitas yang tinggi pada sisi *hardware* jika menggunakan sistem *digital beamforming* [3,4]. Karena pada *digital beamforming*, jumlah *RF Chain* yang dibutuhkan sama dengan jumlah antena yang digunakan.

Untuk mengurangi kompleksitas pada sisi *hardware* dengan menggabungkan antara *analog beamforming* dengan *digital beamforming* atau sering disebut dengan *hybrid beamforming* [3].

Pada penelitian kali ini, penulis akan meneliti



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Hybrid Beamforming

tentang estimasi sudut kedatangan pada sistem *hybrid beamforming* menggunakan algoritma ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques*). Algoritma ESPRIT merupakan salah satu algoritma yang memanfaatkan teknik *subspace*. Teknik *subspace* melakukan estimasi sudut kedatangan sinyal dengan memanfaatkan struktur eigen dan melakukan pemisahan antara *noise subspace* dan *signal subspace* [5,6]. Kelebihan dari ESPRIT sendiri adalah resolusinya tinggi artinya kemampuan untuk membedakan antara *user* dengan interferensinya tinggi dan kompleksitas komputasi rendah. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan Ramlond Anggito mengenai estimasi algoritma ESPRIT tanpa menggunakan sistem *beamforming* [5]. Girim Kwon meneliti tentang jumlah RF Chain yang optimal pada arsitektur *hybrid beamforming* [3]. Pada kesempatan kali ini, penulis akan meneliti tentang estimasi sudut menggunakan algoritma ESPRIT pada sistem *hybrid beamforming*.

2. Dasar Teori

2.1. Millimeter-wave

Millimeter-wave (mm-wave) band yang memiliki rentang frekuensi dari 30 – 300 GHz (sering disebut sebagai EHF) semakin banyak yang melirik untuk digunakan pada komunikasi seluler yang akan datang. Karena pada frekuensi dibawah 3 GHz sudah banyak digunakan oleh teknologi lain. Selain belum banyak ditempati oleh teknologi yang lain, pada spektrum frekuensi *mm-wave* juga memiliki *bandwidth* yang lebar dan data *rate* yang tinggi sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan pada sistem komunikasi dimasa depan yang direncanakan memiliki kecepatan data yang tinggi sampai 50 Gbps [7].

Untuk merencanakan penggunaan spektrum frekuensi *mm-wave* ini harus memperhitungkan karakteristik propagasi sinyal radio pada rentang frekuensi ini. Karakteristik propagasi *mm-wave* mencakup *free space propagation* dan efek dari berbagai macam faktor secara fisik.

$$L_{FSL(dB)} = 92,4 + 20 \log f + 20 \log R \quad (1)$$

2.2. Hybrid Beamforming

Hybrid beamforming merupakan gabungan dari *digital beamforming* dan *analog beamforming* [3]. Pada komunikasi *mm-wave* tidak dapat menggunakan *digital beamforming* dikarenakan satu RF Chain terhubung dengan satu antenna, sedangkan pada komunikasi *mm-wave* dapat menggunakan banyak antenna sehingga RF Chain yang digunakan banyak juga dan mengakibatkan *cost* yang besar. Sedangkan pada *analog beamforming* satu RF Chain terhubung dengan banyak antenna, tapi tidak mendukung *multistream*. Untuk mengatasi kekurangan pada *digital* dan *analog beamforming*, *hybrid beamforming* menggabungkan kedua arsitektur tersebut. Tujuannya untuk menghasilkan transmisi yang efisien dengan menggunakan hardware yang sedikit (khususnya RF Chain). Untuk lebih jelasnya bisa dilihat blok diagram dari arsitektur *hybrid beamforming* pada Gambar 1.

Dari blok diagram pada Gambar 1, sinyal yang diterima pada sisi *receiver* dapat dirumuskan sebagai berikut.

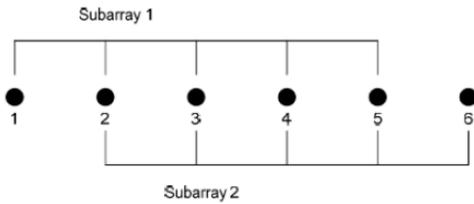
$$y = \sqrt{\rho} Hx + n \quad (2)$$

$$H = \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l A_r A_t^H \quad (3)$$

Variabel y adalah sinyal yang diterima, x adalah sinyal yang dikirim, ρ adalah daya terima rata-rata, n adalah *noise gaussian*, dan H adalah *fading propagation channel*. Dimana N_t dan N_r adalah jumlah antenna pada *transmitter* dan *receiver*, α_l adalah *complex gain* dari *path* ke- l , A_r adalah *steering vektor* dari sisi *receiver* dan A_t adalah *steering vektor* dari sisi *transmitter*.

$$A_r = \frac{1}{\sqrt{N_r}} \left(1, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\theta)}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (N_r - 1) d \sin(\theta)} \right)^H \quad (4)$$

Variabel λ adalah panjang gelombang, d adalah *spacing* elemen antenna, dan θ adalah *Angle of Arrival (AoA)*.



Gambar 2. Dua Sub-array dengan L=6 Elemen Antena [5]

2.3. ESPRIT

Pada skema ESPRIT (*Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques*) tidak melakukan *scanning* sudut melainkan memanfaatkan sifat *rotational invariant* dari susunan antena. Sifat *rotational invariant* memerlukan susunan *array* antena yang dapat dibagi menjadi dua *sub-array* yang salah satu *sub-array* adalah versi tergeser spasial dari *sub-array* lainnya. Untuk lebih jelasnya bisa lihat Gambar 2.

Pergeseran linier secara spasial ini menghasilkan persamaan sinyal terima antara *sub-array* pertama dan *sub-array* kedua terhubung secara matematis, sehingga estimasi arah kedatangan sinyal dapat dihitung secara rumus tanpa perlu menggunakan *scanning* sudut. Berikut ini beberapa tahapan untuk estimasi arah kedatangan sinyal dengan algoritma ESPRIT.

1. Hitung matriks *Covariance* R_{xx} dari vektor sinyal datang $x(n)$ dengan rumus berikut ini.

$$R_{xx} = E\{X \cdot X^H\} = \frac{1}{N} X X^H \quad (5)$$

2. Hitung dekomposisi Eigen dari R_{xx}

$$R_{xx} = U \sum U^H \quad (6)$$

3. Partisi vektor Eigen U menjadi sinyal *subspace* dan *noise subspace* menggunakan Eigen *thresholding*

$$U_s \approx \lambda > 0.5 * \frac{\text{sum}(\lambda)}{\text{SNR}} \quad (7)$$

$$U_n \approx \lambda < 0.5 * \frac{\text{sum}(\lambda)}{\text{SNR}} \quad (8)$$

Dimana $U_s =$ *signal subspace* dan $U_n =$ *noise subspace*.

4. Partisi sinyal *subspace* menjadi dua *sub-array*, sinyal *subspace sub-array-1* (U_{s1}) dan *sub-array-2* (U_{s2}). Selanjutnya hitung matriks *rotation invariant* menggunakan persamaan berikut.

$$\Psi = (U_{s1}^H U_{s1})^{-1} U_{s1}^H U_{s2} \quad (9)$$

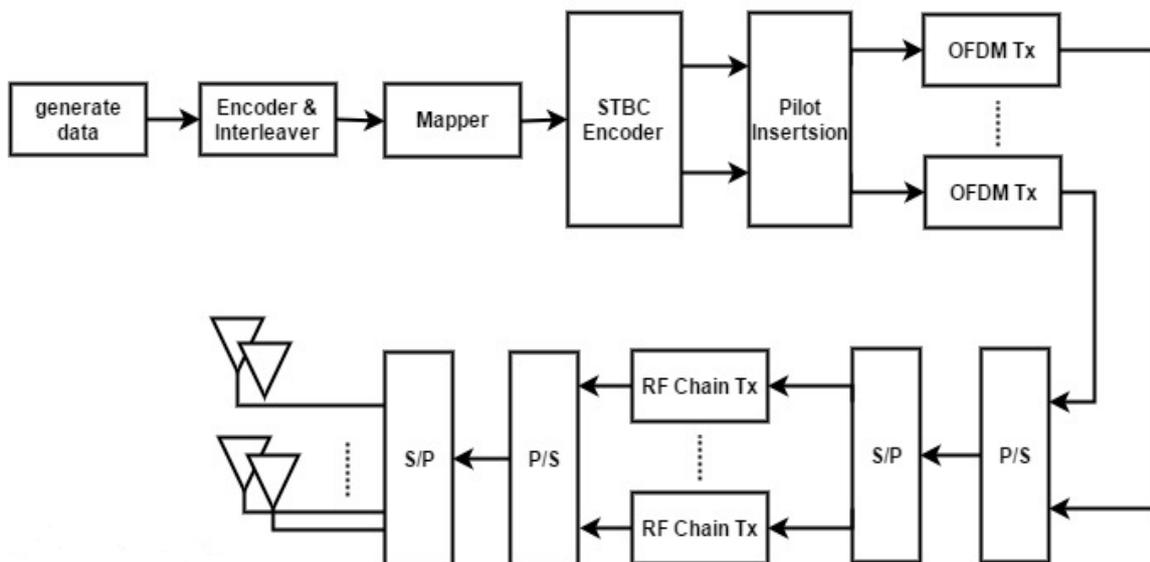
5. Untuk mencari estimasi sudut kedatangan dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\theta_m = \sin^{-1} \frac{\lambda_m}{2\pi \frac{d}{\lambda_{op}}}, m = 1, \dots, M \quad (10)$$

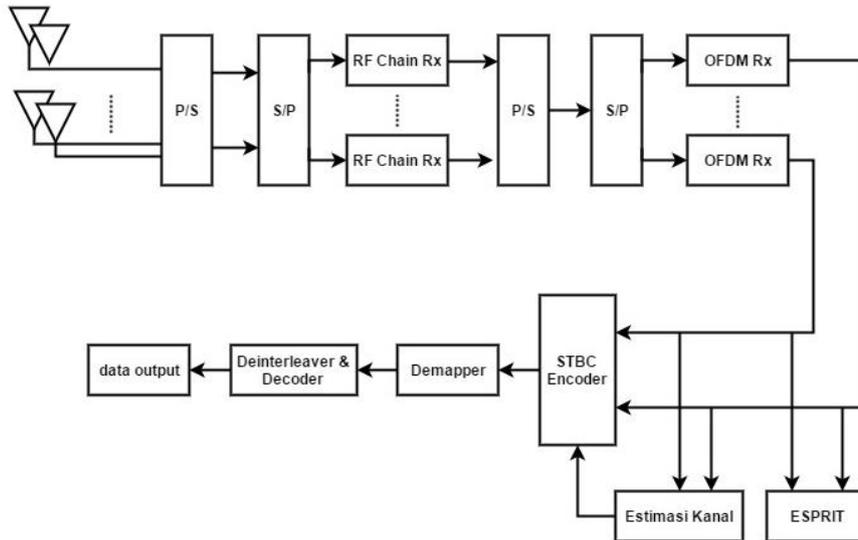
Dimana λ_m menyatakan nilai eigen *value* ke- m dari matriks Ψ , sedangkan λ_{op} menyatakan panjang gelombang.

3. Model dan Sistem

Pada penelitian kali ini sistem transmisi *hybrid beamforming* dirancang seperti pemodelan pada Gambar 3 pada sisi *transmitter* dan Gambar 4 pada sisi *receiver*. Dimana sebelumnya blok sistem telah disisipi oleh blok ESPRIT untuk melakukan estimasi sudut kedatangan. Selanjutnya sistem akan dianalisis pada kondisi kanal *rayleigh* dan spesifikasi yang digunakan sesuai pada Tabel 1.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Hybrid Beamforming Sisi Transmitter



Gambar 4. Diagram Blok Sistem Hybrid Beamforming Sisi Receiver

Tabel 1. Spesifikasi Parameter Simulasi Sistem

Parameter Simulasi	Spesifikasi
Carrier frequency	28 GHz
Bandwidth	800 MHz
Modulation	64 QAM
Coding	Convolutional code, rate $\frac{1}{2}$
Antena Tx & Rx	4, 8 (ULA)
FFT size	1024
Subcarrier spacing	0.78 MHz
Periode simbol	1.28 μ s
Periode cyclic prefix	0.16 μ s
Durasi simbol OFDM	1.44 μ s

4. Analisa Hasil Simulasi

4.1. Performansi Sistem Hybrid Beamforming

Untuk melihat performansi sistem *hybrid beamforming*, dilakukan simulasi dengan dua parameter, yaitu jumlah antena pada sisi *transmitter* (N_T) dan sisi *receiver* (N_R), serta jumlah RF chain (N_{RF}). Hasil simulasi akan membandingkan nilai BER terhadap E_b/N_o .

4.1.1. Pengaruh Jumlah Antena terhadap Kinerja Sistem Hybrid Beamforming

Percobaan kali ini dilakukan dengan sistem *hybrid beamforming* menggunakan RF chain (N_{RF} sebesar 2) pada sisi *transmitter* dan sisi *receiver*, serta jumlah antena pada sisi *transmitter* (N_T sebesar 4 dan 8) dan pada *receiver* (N_R sebesar 4 dan 8). Hasil dari percobaan kali ini dapat dilihat dari grafik BER terhadap E_b/N_o yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Percobaan kali ini dilakukan dengan tujuan membandingkan kinerja sistem *hybrid beamforming* saat menggunakan jumlah antena pada sisi *transmitter* dan *receiver* sebanyak empat elemen

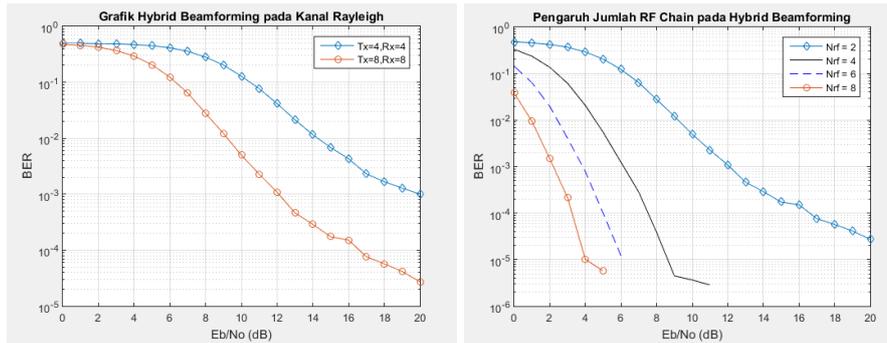
dan saat jumlah antena pada sisi *transmitter* dan *receiver* sebanyak delapan elemen.

Dari Gambar 5(a) menunjukkan grafik BER terhadap E_b/N_o . Dimana besar kecilnya nilai BER menandakan kemampuan suatu sistem komunikasi untuk mengirim dan menerima *bit* dengan baik. Semakin kecil nilai BER maka semakin kecil tingkat kesalahan pendeteksian *bit* yang dikirim yang berarti semakin baik kinerja sistem tersebut.

Hasil dari percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 5(a) menunjukkan bahwa kinerja *hybrid beamforming* saat menggunakan jumlah antena pada sisi *transmitter* ($N_T = 8$) dan jumlah antena pada sisi *receiver* ($N_R = 8$) memiliki performansi yang lebih baik dari sistem *hybrid beamforming* saat menggunakan jumlah antena pada sisi *transmitter* ($N_T = 4$) dan jumlah antena pada sisi *receiver* ($N_R = 4$). Dimana untuk mencapai nilai BER sebesar 10^{-3} sistem *hybrid beamforming* dengan menggunakan antena ($N_T = 4$) dan ($N_R = 4$) membutuhkan E_b/N_o sebesar 20 dB. Sedangkan pada sistem *hybrid beamforming* dengan antena ($N_T = 8$) dan ($N_R = 8$) membutuhkan E_b/N_o sebesar 12 dB. Sehingga dapat disimpulkan sistem dengan ($N_T = 8$) dan ($N_R = 8$) memiliki performansi yang lebih baik dari pada sistem dengan ($N_T = 4$) dan ($N_R = 4$), dengan perbaikan sistem sebesar 8 dB.

4.1.2. Pengaruh RF Chain terhadap Kinerja Sistem Hybrid Beamforming

Percobaan kali ini, dilakukan dengan tujuan membandingkan pengaruh RF chain pada sistem *hybrid beamforming*, dimana pada percobaan kali ini digunakan jumlah RF chain yang berbeda-beda pada saat menggunakan jumlah antena pada sisi *transmitter* maupun *receiver* sebesar 8. Saat menggunakan jumlah antena sebesar 8 elemen pada



Gambar 5. (a) Grafik Pengaruh Jumlah Antena pada Sistem *Hybrid Beamforming* dengan $N_{RF} = 2$ (b) Pengaruh Jumlah RF Chain pada Sistem *Hybrid beamforming* saat $N_T = 8$ dan $N_R = 8$

Tabel 2. Pengaruh SNR terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

SNR	jumlah sudut terdeteksi	Δ (°)
0	1	31,84446696
5	2	20,34241236
10	3	0,003935203
15	3	0,002422745
20	3	0,001580771
25	3	0,000971094
30	3	0,000316893

transmitter maupun receiver, menggunakan RF chain (N_{RF} sebesar 2, 4, 6, dan 8).

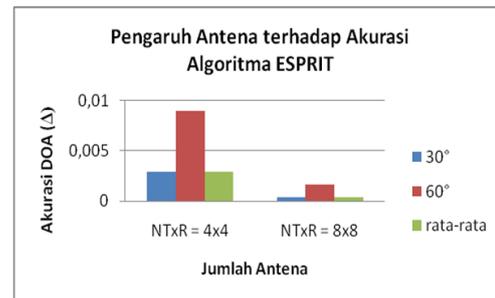
Hasil dari simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 5(b) menunjukkan bahwa untuk mencapai BER 10^{-4} sistem *hybrid beamforming* saat menggunakan N_{RF} sebesar 2 membutuhkan Eb/No sekitar 17 dB, saat menggunakan N_{RF} sebesar 4 membutuhkan Eb/No sekitar 8 dB, saat menggunakan N_{RF} sebesar 6 membutuhkan Eb/No sekitar 5 dB, sedangkan saat menggunakan N_{RF} sebesar 8 membutuhkan Eb/No sekitar 4 dB. Sehingga dapat dikatakan semakin banyak RF chain yang digunakan maka performansi sistem akan semakin baik, dengan performansi terbaik pada sistem *hybrid beamforming* terjadi pada saat menggunakan N_{RF} sebesar 6.

4.2. Akurasi Algoritma ESPRIT pada Sistem *Hybrid Beamforming*

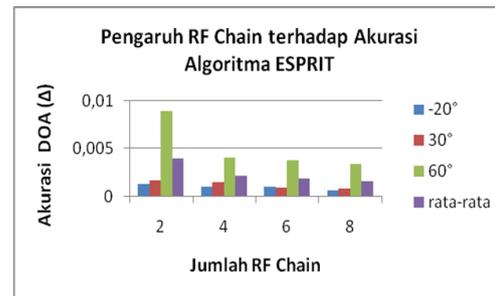
Akurasi akan memberikan tingkat ketepatan algoritma dalam mendeteksi sudut datang. Hal ini dilakukan dengan memperoleh selisih antara sudut datang sebenarnya (θ_{in}) dengan sudut hasil estimasi (θ_{out}) yang dapat disimbolkan dengan (Δ). Semakin kecil selisihnya, maka semakin tinggi akurasinya.

4.2.1. Pengaruh Jumlah Antena terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

Berikut ini merupakan hasil percobaan pengaruh jumlah antena terhadap akurasi algoritma



Gambar 6. Pengaruh Antena terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT



Gambar 7. Pengaruh RF Chain terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang pada sistem *hybrid beamforming*, dengan parameter-parameter yang terlibat didalamnya antara lain; jumlah sinyal datang ($M = 2$), jumlah RF Chain ($N_{RF} = 2$), SNR = 15 dB, dan selisih sudut datang sebenarnya terhadap sudut hasil estimasi (Δ).

Dapat dilihat pada Gambar 6 pada sudut 60° selisih antara sudut datang dan sudut estimasi (Δ) lebih besar dari pada sudut 30° . Hal ini disebabkan karena *path gain* pada sudut 60 bernilai -1 dB lebih kecil dari *path gain* pada sudut 30 yang bernilai 0 dB. Sedangkan bertambahnya jumlah antena pada sistem *hybrid beamforming*, maka akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang akan semakin tinggi. Hal ini dapat dilihat lebih jelas dari selisih sudut datang sebenarnya terhadap sudut estimasi (Δ). Dimana semakin kecil nilai Δ maka tingkat akurasi estimasi DOA semakin tinggi, begitu pula sebaliknya. Yang artinya akurasi terbaik terjadi

saat menggunakan jumlah antena ($N_T = 8$) dan ($N_R = 8$) dengan nilai rata-rata Δ sebesar $0,00033^\circ$.

4.2.2. Pengaruh RF Chain terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

Berikut ini merupakan hasil percobaan pengaruh jumlah RF chain terhadap akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang pada sistem *hybrid beamforming*, dengan parameter-parameter yang terlibat didalamnya antara lain; jumlah sinyal datang ($M = 3$), jumlah antena ($N_T = 8$) dan ($N_R = 8$), SNR = 15 dB, dan selisih sudut datang sebenarnya terhadap sudut hasil estimasi (Δ).

Dari hasil yang dapat dilihat pada Gambar 7, dengan bertambahnya jumlah RF Chain, maka akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang akan semakin tinggi. Dari hasil percobaan, akurasi dilihat dari nilai Δ , jika nilai rata-rata Δ semakin kecil maka akurasi semakin tinggi, begitu juga sebaliknya. Pada saat $N_{RF} = 2$ nilai rata-rata Δ sebesar $0,00394^\circ$, saat $N_{RF} = 4$ nilai rata-rata Δ sebesar $0,00211^\circ$, saat $N_{RF} = 6$ nilai rata-rata Δ sebesar $0,00186^\circ$, dan saat $N_{RF} = 8$ nilai rata-rata Δ sebesar $0,00157^\circ$. akurasi tertinggi pada estimasi sudut kedatangan menggunakan algoritma ESPRIT terjadi pada saat $N_{RF} = 8$ (sistem *digital beamforming*). Sedangkan, akurasi tertinggi penggunaan algoritma ESPRIT pada sistem *hybrid beamforming* terjadi pada saat $N_{RF} = 6$ dan selisih rata-rata Δ antara sistem *hybrid beamforming* ($N_{RF} = 6$) dengan sistem *digital beamforming* sama dengan $0,00029^\circ$.

4.2.3. Pengaruh SNR terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

Berikut ini merupakan hasil percobaan pengaruh SNR terhadap akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang pada sistem *hybrid beamforming*, dengan parameter-parameter yang terlibat didalamnya antara lain; jumlah sinyal datang ($M = 3$), jumlah antena ($N_T = 8$) dan ($N_R = 8$), $N_{RF} = 4$, dan selisih sudut datang sebenarnya terhadap sudut hasil estimasi (Δ).

Dari Tabel 2, ketiga sudut akan terdeteksi semua saat nilai SNR lebih dari 10 dB. Sedangkan saat SNR sebesar 0 dB, jumlah sudut yang terdeteksi hanya satu, dan pada saat SNR sebesar 5 dB, jumlah sudut yang terdeteksi hanya dua. Sehingga nilai rata-rata Δ saat SNR ≥ 10 dB akan bernilai lebih kecil dari pada saat SNR = 0 dB dan SNR = 5 dB. Hal ini disebabkan, semakin besar nilai SNR artinya perbandingan daya antara sinyal dan *noise* semakin jauh, sehingga lebih didominasi sinyal dari pada *noise*. Hal ini mengakibatkan proses *thresholding* yaitu pemisahan antara sinyal *subspace* dan *noise subspace* akan lebih baik.

Tabel 3. Pengaruh Jumlah Sudut terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

Jumlah sudut (M)	Jumlah sudut terdeteksi	Δ ($^\circ$)
1	1	0,001037117
2	2	0,001619909
3	3	0,00211775
4	4	0,002686902
5	4	19,19078212
6	4	26,38666852

Sehingga dapat disimpulkan bertambahnya SNR dapat meningkatkan akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang. Dengan akurasi tertinggi terjadi pada saat nilai SNR = 30 dengan rata-rata Δ sebesar $0,000316893^\circ$ dan akurasi terburuk terjadi pada saat SNR = 0 dengan rata-rata Δ sebesar $31,84446696^\circ$.

4.2.4. Pengaruh Jumlah Sudut Datang terhadap Akurasi Algoritma ESPRIT

Berikut ini merupakan hasil percobaan pengaruh jumlah sudut datang terhadap akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang pada sistem *hybrid beamforming*, dengan parameter jumlah antena ($N_T = 8$) dan ($N_R = 8$), $N_{RF} = 4$, SNR = 15 dB, dan selisih sudut datang sebenarnya terhadap sudut hasil estimasi (Δ).

Dari Tabel 3, banyaknya sudut datang dapat mempengaruhi jumlah sudut yang terdeteksi. Saat jumlah sudut datang kurang dari atau sama dengan empat ($M \leq 4$), maka algoritma ESPRIT pada sistem *hybrid beamforming* dapat mendeteksi semua sudut datang. Tetapi saat jumlah sudut datang lebih dari empat ($M > 4$), sistem tidak bisa mendeteksi semua sudut datang. Bisa dilihat pada Tabel 3 saat jumlah sudut datang 5 dan 6, sudut datang yang terdeteksi pada sistem *hybrid beamforming* hanya 4 saja. Hal ini disebabkan dari penggunaan jumlah antena pada sisi *receiver*, pada algoritma ESPRIT jumlah antena yang baik untuk mendeteksi semua sudut datang harus dua kali lebih besar dari jumlah sudut datang ($N_R > 2M$). Sehingga saat menggunakan antena $N_R = 8$, jumlah sudut maksimum yang dapat terdeteksi adalah 4.

Dari hasil percobaan, akurasi tertinggi terjadi pada saat jumlah sudut ($M = 1$) dengan rata-rata Δ $0,001037117^\circ$ dan akurasi terburuk terjadi pada saat jumlah sudut ($M = 6$) dengan rata-rata Δ sebesar $26,38666852^\circ$.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang dilakukan dapat dikatakan bahwa penambahan jumlah antena pada sisi pengirim dan penerima dalam sistem *hybrid beamforming* dapat meningkatkan kinerja sistem pada kanal *rayleigh*. Dan semakin banyak RF chain yang digunakan maka, kinerja sistem *hybrid*

beamforming akan semakin baik yang artinya kinerja *digital beamforming* lebih baik dari *hybrid beamforming* karena memiliki RF *chain* yang lebih banyak. Namun semakin besar jumlah RF *chain* dan jumlah antena yang digunakan berbanding lurus dengan kompleksitas sistem serta dapat mengakibatkan *cost* yang besar jika diimplementasikan.

Penambahan nilai SNR akan mempengaruhi akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang pada sistem *hybrid beamforming*. Semakin besar nilai SNR maka akurasi algoritma ESPRIT akan semakin besar. Pada algoritma ESPRIT akan lebih baik jika SNR bernilai lebih dari 10 dB.

Jumlah RF *chain* (N_{RF}) akan mempengaruhi akurasi algoritma ESPRIT dalam melakukan estimasi sudut datang. Semakin besar nilai N_{RF} maka akurasi algoritma ESPRIT akan semakin meningkat, dapat dilihat pada gambar 5(b). Yang artinya akurasi sistem digital beamforming lebih baik dari pada sistem *hybrid beamforming*. Namun peningkatan akurasi yang terjadi sangat kecil, hal ini bisa dilihat dari selisih rata-rata Δ yang terjadi antara digital beamforming ($N_{RF} = 8$) dengan *hybrid beamforming* ($N_{RF} = 6$) yang memiliki nilai sebesar $0,00028615^\circ$.

Semakin besar jumlah sudut datang (M), maka akurasi algoritma ESPRIT pada sistem *hybrid beamforming* akan semakin menurun. Akurasi algoritma ESPRIT pada sistem *hybrid beamforming* akan baik jika jumlah sudut datang $M \leq N_{TxR}/2$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ma, Zheng, et al. "Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives." *Science China Information Sciences* 58.4 (2015): 1-20.
- [2] Roh, Wonil, et al. "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results." *IEEE Communications Magazine* 52.2 (2014): 106-113.
- [3] Kwon, Girim, et al. "Design of millimeter wave *hybrid beamforming* systems." *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*. IEEE, 2014.
- [4] De Donno, Danilo, et al. "Hybrid analog-digital beam training for mmWave systems with low-resolution RF phase shifters." *Communications Workshops (ICC), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, 2016.
- [5] Ramlond Anggito "Analisa dan Simulasi Esitimasi Sudut Kedatangan Menggunakan Algoritma Estimation of Signal Parametr via Rotational Invariance Techniques (ESPRIT) pada Wireless Mobile Communication", IT Telkom, Bandung, 2009.
- [6] Chen, Zhizhang. "Introduction to Directional of Arrival Estimation", Artech House, 2010.
- [7] Michael Marcus and Bruno Pattan "Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications", IEEE Microwave Magazine, June 2005.