

DETEKTOR ML UNTUK KOMUNIKASI ANTENA JAMAK

Ahmad Taqwa^{1,2*)}, Soegijardjo Soegijoko¹, Sugihartono¹, dan Suhartono Tjondronegoro¹

1. Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia
2. Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang 30139, Indonesia

*)E-mail: a_taqwa@yahoo.com

Abstrak

Tantangan terbesar pengembangan layanan komunikasi *wireless* adalah *frequency-bandwidth* yang terbatas dan mahal. Karena itu dibutuhkan tidak hanya sistem berkecepatan tinggi saja tetapi juga sistem yang mampu menggunakan *bandwidth* secara efisien. Walaupun sulit membangun sistem berkecepatan tinggi dengan *error-rate* rendah, namun pada tulisan ini diperkenalkan sebuah sistem *closed-loop* MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) menggunakan detektor ML (*Maximum Likelihood*) sederhana untuk mengoptimalkan kapasitas dan meningkatkan performansi sistem. Pemakaian MIMO menjadi spesial karena kemampuannya dalam meningkatkan kapasitas dan performansi tanpa menambah *frequency-spectral*. Skenario besar konsep ini didapat dari keuntungan pemakaian matriks transformasi yang mampu mengalokasikan daya sinyal-sinyal transmisi sesuai dengan kondisi kanal. Selain itu, perkalian matriks ini dapat membentuk kanal-kanal singular yang paralel. Sehingga dengan *zero inter-channels correlation*, maka detektor ML dapat dirancang guna meningkatkan performansi. Pada akhirnya, simulasi komputer memberikan validasi bahwa pada SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) 0 dB dapat dicapai kapasitas optimal sampai 1 bps/Hz dan SER sampai dengan 0,2 lebih baik dari sistem *opened-loop* MIMO.

Abstract

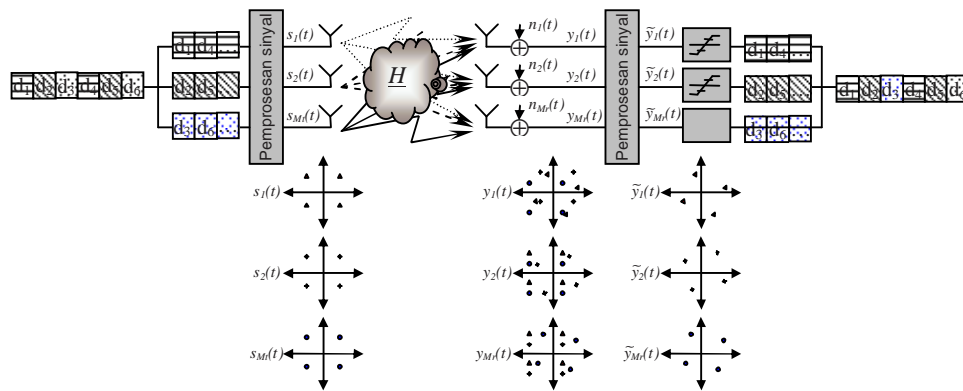
Simple ML Detector for Multiple Antennas Communication System. In order to support providing broadband wireless communication services against limited and expensive frequency bandwidth, we have to develop a bandwidth efficient system. Therefore, in this paper we propose a closed-loop MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) system using ML (Maximum Likelihood) detector to optimize capacity and to increase system performance. What is especially exciting about the benefits offered by MIMO is that a high capacity and performance can be attained without additional frequency-spectral resource. The grand scenario of this concept is the attained advantages of transformation matrices having capability to allocate transmitted signals power suit to the channel. Furthermore, product of these matrices forms parallel singular channels. Due to zero inter-channels correlation, thus we can design ML detector to increase the system performance. Finally, computer simulations validates that at 0 dB SNR our system can reach optimal capacity up to 1 bps/Hz and SER up to 0.2 higher than opened-loop MIMO.

Keywords: fading, MIMO, SVD, ML

1. Pendahuluan

Pada sistem komunikasi *wireless* konvensional, SISO (*Single Input Single Output*), fenomena *fading* masih memberikan kontribusi terbesar bagi keterbatasan kapasitas dan performansi komunikasi. Untuk itu para peneliti mulai melihat kemungkinan pemakaian sistem MIMO yang menerapkan antena jamak pada sisi kirim maupun terima. Sistem ini telah lama diperkenalkan, namun eksplorasinya baru dimulai kembali pada tahun

1994 di Stanford University dan tahun 1996 di Lucent [1]. Transmisi sinyal secara bersamaan melalui antena jamak dapat memberikan efisiensi pemakaian *frequency-bandwidth*. Selain dapat memiliki *array gain*, penerapan *space-time coding* juga akan memberikan *diversity gain* yang dapat mengatasi *fading* secara efektif. Selanjutnya penerapan *spatial multiplexing* seperti pada BLAST (*Bell's Lab. Layered Space-Time Coding*) [2] mampu meningkatkan *bit-rate* dan menurunkan kompleksitas sistem MIMO.



Spatial multiplexing deretan simbol masukan dan keluaran. Format matrik dan vektor:

$$\underline{y} = \sqrt{E_s / M_t} \underline{H} \underline{s} + \underline{n}$$

Gambar 1. Komunikasi MIMO dengan Spatial Multiplexing

Meskipun demikian kapasitas yang dicapai oleh MIMO masih belum memuaskan untuk mendekati kapasitas Shannon [3-5]. Hal ini diakibatkan daya sinyal yang dipancarkan melalui masing-masing antena tidak dapat disesuaikan dengan daya yang diperlukan pada masing-masing kanal. Selain itu, pengaturan daya melalui kovarian sinyal-sinyal kirim yang bergantung pada distribusi dan konstelasi simbol sinyal tersebut, sangatlah sulit untuk dilakukan. Kesulitan yang lain adalah tingginya kompleksitas rancangan detektor di penerima yang akan sangat menentukan kualitas *error-rate* dari sistem. Hal inilah yang kemudian mendorong diusulkannya penelitian ini.

Konsep sistem ini menggunakan *closed-loop* MIMO dengan *spatial multiplexing* yang dapat mengirimkan beberapa sinyal secara bersamaan melalui sejumlah antena. Keuntungan konsep umpan balik adalah informasi tentang kondisi kanal yang dapat dikenal oleh *transmitter*. Dengan demikian pengalokasian daya sinyal kirim oleh *transmitter* dapat diatur secara efektif sesuai dengan perubahan kondisi kanal saat itu. Sehingga SNR, kapasitas, dan performansi secara keseluruhan dapat ditingkatkan. Lebih dari itu, pengaturan daya pada *transmitter* dalam konsep ini dilakukan oleh matriks transformasi [6-7] yang mampu menyesuaikan kovarian sinyal kirim terhadap daya yang diperlukan. Dengan demikian, *transmitter* tidak perlu setiap saat menyesuaikan kovarian (distribusi) simbol kirim lagi. Di sisi lain, perkalian antara matriks transformasi dengan matriks kanal MIMO dalam konsep ini dapat mengubah kanal membentuk kanal-kanal singular yang terhubung secara paralel [8]. Sehingga melalui kanal-kanal singular ini, penerapan detektor ML (*Maximum Likelihood*) di penerima akan menjadi sederhana dan kompleksitas sistem secara keseluruhan dapat diturunkan. Dari evaluasi sistem MIMO [4,8], yang membandingkan penerapan detektor ZF (*Zero*

Forcing), MMSE (*Minimum Mean-Square Error*), ataupun SIC (*Successive Interference Cancellation*), didapatkan bahwa ML memiliki performansi terbaik. Namun karena kompleksitas yang tinggi dan waktu proses yang lama, maka ML hanya menjadi teori saja dan tidak mudah diaplikasikan pada sistem MIMO. Berdasarkan penjelasan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat membuat penerapan ML pada MIMO menjadi lebih realistis.

Fundamental Sistem MIMO. Gambar 1 mengilustrasikan sebuah sistem komunikasi *wireless* MIMO dengan *spatial multiplexing* [5-9]. Seperti terlihat pada gambar tersebut, masing-masing *transmitter* dan *receiver* memiliki 3 antena kirim M_t dan 3 antena terima M_r . Pada *transmitter* deretan data serial akan dimultiplekskan menjadi deretan data paralel dengan kecepatan masing-masing $1/M_t$. Selanjutnya masing-masing sinyal simbol ditransmisikan dari tiap-tiap antena melalui kanal \underline{H} pada spektrum frekuensi yang sama.

Tugas selanjutnya adalah mengetahui bagaimana *receiver* dapat mendeteksi kembali sinyal tersebut dan mengkonversikan deretan simbol paralel menjadi serial dengan benar. Menurut Foschini *et al.* untuk *Layered Space Time Code* [2], jika kanal \underline{H} diketahui oleh *receiver* dan jika jumlah antena $M_r \geq M_t$, maka pemisahan dan estimasi sinyal terima dapat dilakukan melalui penyelesaian sistem linear sederhana dengan M_r persamaan dan M_t variabel yang tidak diketahui.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, hubungan *input-output* dari sebuah sistem MIMO dengan M_t antena *transmitter* dan M_r antena *receiver* pada kondisi *flat fading* dapat dituliskan dalam format vektor dan matriks sebagai berikut:

$$\underline{y} = \sqrt{E_s / M_t} \underline{H} \cdot \underline{s} + \underline{n} \quad \dots(1)$$

di mana didefinisikan bahwa:

- $\underline{y} = [y_1 y_2 \dots y_{M_r}]^T$ adalah vektor sinyal terima,
- $\underline{s} = [s_1 s_2 \dots s_{M_t}]^T$ adalah vektor sinyal kirim,
- $\underline{n} = [n_1 n_2 \dots n_{M_r}]^T$ adalah vektor derau ZMCSCG (zero mean circularly symmetry complex Gaussian),
- \underline{H} adalah matriks transfer kanal MIMO dengan ukuran $M_r \times M_t$, dan
- E_s adalah energi total rata-rata selama perioda simbol.

Untuk kasus ini, kapasitas kanal MIMO dapat ditentukan oleh informasi bersama antara vektor \underline{s} dan \underline{y} , yaitu $\max_{f(s)} I(\underline{s}; \underline{y}) = H(\underline{y}) - H(\underline{y}|\underline{s})$, di mana $H(\bullet)$ adalah differential entropy dari vektor tersebut dan $f(s)$ adalah distribusi peluang dari vektor \underline{s} . Karena sinyal \underline{s} dan derau \underline{n} bersifat independen maka $H(\underline{y}|\underline{s}) = H(\underline{n})$. Selanjutnya dengan diketahuinya nilai $H(\underline{y}) = \log_2(\det(\pi e \underline{R}_{yy}))$ bps/Hz dan $H(\underline{n}) = \log_2(\det(\pi e \underline{R}_{nn}))$ bps/Hz, sehingga kapasitas MIMO dapat diformulasikan sebagai [1-9]:

$$C = I(\underline{s}; \underline{y}) = \max_{\text{Tr}(\underline{R}_{ss})=M_t} \log_2 \left\{ \det \left(\underline{I}_{M_r} + \frac{\rho}{M_t} \underline{H} \underline{R}_{ss} \underline{H}^H \right) \right\} \dots(2)$$

di mana:

- C adalah kapasitas [bps/Hz].
- \underline{I}_{M_r} adalah matriks identitas ukuran $M_r \times M_r$.
- \underline{R}_{ss} adalah kovarian sinyal \underline{s} .
- ρ adalah SNR sinyal kirim.

Berdasarkan persamaan (2) terlihat bahwa besarnya kapasitas akan dipengaruhi oleh kovarian \underline{R}_{ss} dan kondisi kanal \underline{H} . Hal ini berarti bahwa transmitter dapat mengoptimalkan kapasitas melalui pengaturan nilai \underline{R}_{ss} sesuai dengan kondisi kanal dengan batasan selama tidak mengubah daya transmisi, yaitu $\text{Trace}(\underline{R}_{ss}) = M_t$. Hal ini juga berarti kapasitas akan optimal jika transmitter memiliki CSI (Channel State Information). Jika transmitter tidak kenal kanal, maka vektor \underline{s} dapat dianggap statistically non-preferential, artinya $\underline{R}_{ss} = \underline{I}_{M_t}$ yang memberi implikasi sinyal-sinyal independen dan mempunyai daya yang sama di antena-antena transmit. Kapasitas kanal yang dihasilkan bukanlah kapasitas Shannon yang sebenarnya, karena melalui CSI transmitter dapat memilih matriks kovarian sinyal \underline{R}_{ss} yang lebih baik. Dalam kasus ini formulasi kapasitas adalah:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{M_t N_o} \lambda_i \right) \dots(3)$$

2. Experimental

MIMO dengan Kanal Singular. Untuk kondisi receiver dan transmitter kenal kanal maka konfigurasi sistem MIMO dengan kanal singular dapat didesain seperti pada Gambar 2. Melalui teknik SVD yang membuat $\underline{H} = \underline{U} \underline{\Sigma} \underline{V}^H$, transmitter dan receiver dapat

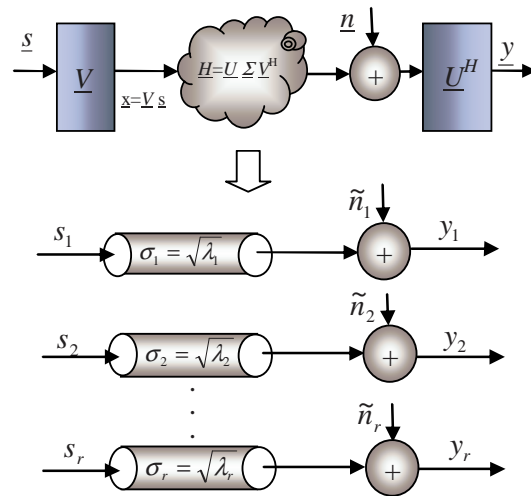
membangun matriks transformasi \underline{V} dan \underline{U} di mana matriks \underline{U} ukuran $M_r \times r$ dan matriks \underline{V} ukuran $M_t \times r$ adalah unitary, sehingga $\underline{U}^H \underline{U} = \underline{V}^H \underline{V} = \underline{I}$. Matriks singular adalah $\underline{\Sigma} = \text{diag} \{ \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r \}$, di mana $\sigma_i^2 = \lambda_i$ adalah eigen value ke- i dari $\underline{H} \underline{H}^H$ dan r adalah rank matriks. Penambahan kedua matriks ini bertujuan untuk mengeliminasi matriks \underline{V} dan \underline{U} pada \underline{H} . Tanpa kehilangan sifat umumnya, hubungan input-output dapat dibuat menjadi [6-9]:

$$\underline{y} = \sqrt{\frac{E_s}{M_t}} \underline{\Sigma} \underline{s} + \underline{U}^H \underline{n} \quad \text{atau} \quad y_i = \sqrt{\frac{E_s}{M_t}} \sigma_i s_i + \tilde{n}_i \dots(4)$$

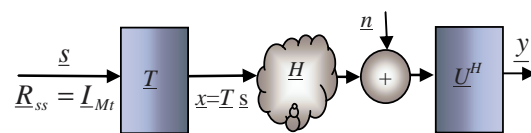
Sehingga hubungan MIMO tersebut dapat dipandang sebagai r buah kanal SISO paralel yang singular dengan semua nilai σ_i^2 adalah real positif. Keuntungan konsep ini bahwa setiap kanal singular hanya akan memberikan degradasi sinyal (pathloss) dan tidak menggeser fasa. Untuk kasus ini, melalui metoda Lagrangian dan algoritma Waterpouring, kapasitas kanal dapat dioptimalkan dan diformulasikan menjadi:

$$C = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{E_s \gamma_i}{M_t N_o} \lambda_i \right) \dots(5)$$

di mana $\underline{R}_{ss} = E\{\underline{s} \underline{s}^H\} = \underline{R}_{ss} = \text{diag} \{ \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r \}$, dan $\gamma_i = E\{|s_i|^2\}$ adalah energi di subkanal ke- i , serta memenuhi $\sum_r(\gamma_i) = M_t$. Metoda ini telah diperkenalkan sebelumnya oleh Telatar [4] dan dikenal juga dengan teknik SVD.



Gambar 2. Skema SVD dalam membuat MIMO kanal singular



Gambar 3. Konsep baru MIMO dengan matriks T.

Sayangnya, hal ini memberikan kesulitan tersendiri jika pengaturan distribusi dan jenis simbol yang dikirim harus mengikuti nilai kovarian tersebut. Banyak cara dan metode pengaturan distribusi dan jenis simbol yang telah diusulkan oleh banyak peneliti. Namun cara seperti itu memerlukan disain dan mekanisme yang rumit. Untuk menyelesaikan masalah ini, ada solusi lain yang dapat dilakukan dengan tanpa mengatur distribusi dan jenis simbol yang dikirim. Yaitu dengan menambahkan matriks transformasi yang berguna untuk mengkonversi kovarian sinyal kirim menjadi $diag\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r\}$. Gambar 3 memperlihatkan konsep yang diusulkan dalam tulisan ini. Dari gambar terlihat bahwa sebelum sinyal \underline{s} dikirim terlebih dahulu dikalikan dengan matriks transformasi \underline{T} . Kemudian barulah sinyal \underline{x} sebagai keluarannya yang dikirimkan ke kanal. Secara umum dan alami kovarian sinyal \underline{s} cenderung berbentuk matriks identitas $\underline{R}_{ss} = \underline{I}_M$. Namun dengan membuat persamaan $\underline{T} = \underline{V} (diag\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r\})^{1/2} = \underline{V} \underline{K}^{1/2}$, maka sinyal kirim \underline{x} akan memiliki kovarian $\underline{R}_{xx} = E\{\underline{x} \underline{x}^H\} = diag\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r\}$. Sehingga dengan hasil kovarian ini, optimalisasi kapasitas seperti pada persamaan (5) tidak memerlukan lagi pengaturan distribusi dan jenis simbol dengan mekanisme yang rumit, kompleks dan tentunya mahal. Karena peran pengaturan kovarian dan tentunya juga pengalokasian daya telah diambil alih oleh \underline{T} .

Detektor ML Sederhana. Untuk sinyal-sinyal sistem MIMO yang mengalami derau dan *fading* terhubung dalam persamaan (1), maka sinyal yang diterima dapat digambarkan dalam konstelasi modulasi, misalnya QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), yang terputar dan tergeser seperti ditunjukkan pada Gambar 4 di mana konstelasi terletak pada bola hitam yang memberikan daya sebesar P . Jika hanya ada AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), maka SNR adalah P/σ_n^2 . Akibat dari *fading*, maka konstelasi terputar sejauh θ dengan daya Pa . Dan jika ada AWGN dan *fading*, maka SNR menjadi Pa/σ_n^2 . Pada Gambar 4 juga diperlihatkan dengan bintang sebagai sinyal yang diterima. Untuk mendeteksi sinyal yang sebenarnya dikirim dapat dihitung *eulclidean distance* dari sinyal yang diterima tersebut terhadap konstelasi yang telah terputar dan tergeser tersebut.

Fungsi *likelihood* dari sinyal yang diterima dengan diketahuinya kanal \underline{H} jika \underline{s} yang dikirim dengan peluang bersyarat dapat direpresentasikan sebagai [1]:

$$P(\underline{y}|\underline{s} \text{ dikirim}, \underline{H}) = \frac{1}{(\pi\sigma_n^2)^{M_r}} \exp\left(-\frac{1}{\sigma_n^2} \|\underline{y} - \underline{H}\underline{s}\|_F^2\right) \quad \dots(6)$$

Karena $\log(x)$ adalah fungsi *concave*, maka estimasi sinyal-sinyal yang dikirim dapat dicari melalui eksak satu titik yang maksimal dari fungsi *log-likelihood*.

Karena *exponensial* negatif, maka fungsi *log* akan maksimal jika *magnitude*-nya minimal, yaitu:

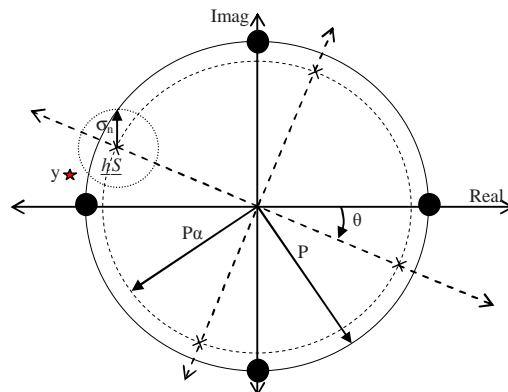
$$\hat{\underline{s}} = \arg \min_{\underline{s}} \|\underline{y} - \underline{H}\underline{s}\|_F^2 \quad \dots(7)$$

Seperti dijelaskan pada banyak literatur bahwa estimasi sinyal-sinyal kirim dengan algoritma ML seperti ini akan memberikan hasil yang optimal dibandingkan dengan ZF, SIC, dan MMSE. Namun perhitungan dan pencarian estimasi sinyal $\hat{\underline{s}}$ dalam bentuk vektor ataupun matriks tidaklah mudah dan sangat kompleks. Sehingga proses estimasinya akan membutuhkan waktu pencarian yang panjang. Misalnya, jika digunakan modulasi QPSK dengan elemen \underline{s} sebanyak 8 simbol, maka akan terdapat 4^8 proses pencarian. Untuk itu perlu digunakan algoritma pencarian yang optimal agar waktu pencarian tidak melebihi perioda simbol. Namun solusi ini memerlukan kerja paralel yang banyak dengan mesin yang besar sehingga solusi ini sangat mahal.

Sebaliknya, sinyal-sinyal terima dalam konsep yang diusulkan pada sistem MIMO ini bersifat singular dan tidak ada *interchannel interference* serta selaras dengan persamaan (4). Secara umum dapat dikatakan bahwa setiap antena *receiver* akan menerima sebuah sinyal $y_i = \sigma_i s_i + n_i$. Dengan demikian, estimasi sinyal kirim \hat{s}_i menggunakan algoritma ML dapat dilakukan di setiap antena terima secara terpisah (tidak lagi dilakukan estimasi bersama-sama dalam bentuk vektor atau matriks). Sehingga masing-masing estimasi akan mengikuti persamaan (8):

$$\hat{s}_i = \arg \min_s |y_i - \sigma_i s_i|^2 \quad \dots(8)$$

di mana $i=\{1,2,\dots,r\}$ dengan r adalah *rank* dari kanal yang nilainya lebih kecil dari $M_r=M_t=M_r$ yang berlaku pada MIMO dengan \underline{H} matriks bujur sangkar. Konsep baru ini tentunya akan mereduksi kedalaman dan waktu *searching* sinyal estimasi. Sebagai perbandingan, pada jumlah antena kirim dan terima $M_r=4$ dan modulasi 16-PSK (konstelasi $M=16$) dengan menggunakan teknik ini hanya dibutuhkan *looping* untuk proses *searching* sebanyak $4 \times 16^1 = 64$ kali. Sebaliknya, jika menggunakan



Gambar 4. Konstelasi untuk Kanal AWGN dengan *Fading*

ML biasa (dalam bentuk vektor atau matriks) diperlukan $16^4=65536$ kali proses *searching*. Berarti ada penghematan waktu sebanyak 1024 kali yang dapat diformulasikan secara umum menjadi $M^{(M_{tr}-1)}/M_{tr}$.

Penghematan waktu proses pada deteksi dan estimasi ini, dapat membuat konsep ini lebih menjanjikan dan dapat diaplikasikan guna menunjang sistem *broadband wireless* MIMO. Sedangkan untuk performansi kesalahan deteksi akan dijelaskan pada validasi hasil penelitian.

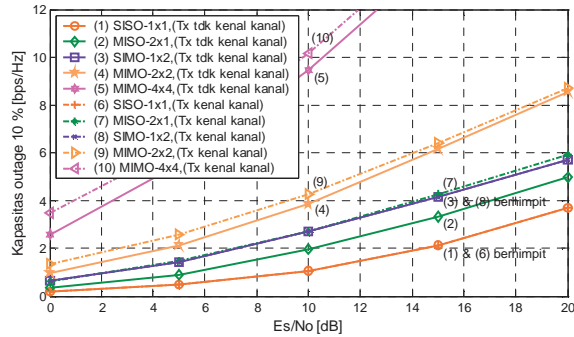
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari simulasi kapasitas kanal sistem MIMO sebagai fungsi dari SNR diperlihatkan pada Gambar 5. Sistem MIMO dengan *transmitter* kanal kanal selalu memiliki kapasitas yang lebih baik. Bahkan saat SNR 0 dB kapasitas *outage* dari sistem dengan *transmitter* kanal kanal akan lebih besar 1 bps/Hz. Hasil simulasi Gambar 5 tidak terlalu mengejutkan, karena secara linear rumusan pada persamaan (3) dan (5) telah memberikan perbandingan yang mendasar bahwa persamaan (5) akan selalu lebih besar dari persamaan (3) jika kondisi kanalnya sama. Fakta ini juga dapat didukung dengan pembuktian penurunan perbandingan kedua rumusan bahwa $\sum_{Mr} \gamma_i \lambda_i > \sum_{Mr} \lambda_i$. Pernyataan ini memberikan hubungan pada perbandingan SNR yang diterima dari sistem *transmitter* kanal kanal dan sistem *transmitter* tidak kanal kanal menjadi:

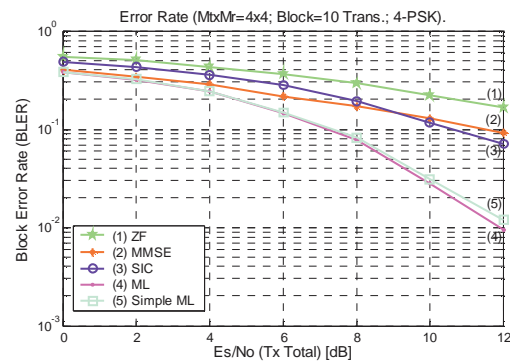
$$SNR_{KK} = \frac{E_s}{N_o Mt} \sum_{i=1}^{Mr} \lambda_i \gamma_i > SNR_{TK} = \frac{E_s}{N_o Mt} \sum_{i=1}^{Mr} \lambda_i \quad \dots(9)$$

Sehingga untuk selanjutnya, dengan SNR yang lebih baik ini juga menjadi pembuktian peningkatan kemampuan sistem dalam memperbaiki *error-rate* di penerima.

Sedangkan sebagai validasi performansi dari sistem detektor ML sederhana, Gambar 6 memperlihatkan perbandingannya terhadap hasil dari detektor lain. Terlihat bahwa detektor ML maupun ML sederhana memiliki performansi SER yang jauh lebih baik dari ZF, SIC, maupun MMSE. Pada SNR 0 dB, ML memiliki SER sampai dengan 0,2 lebih baik. Bahkan semakin besar SNR semakin unggul performansinya. Walaupun kemampuannya relatif sama dibandingkan dengan ML biasa tanpa kanal singular, namun pada SNR yang besar ML biasa akan sedikit lebih baik. Hal ini karena dalam konsep SVD kanal yang alokasi daya terkecil dihilangkan (pada algoritma *waterpouring*) untuk menghindari kesalahan sedangkan dalam perhitungan rata-rata SER kanal tersebut tetap dihitung semua sehingga akan meninggikan perhitungan kesalahan pada simple ML saat SNR yang tinggi. Terlepas dari selisih yang relatif kecil ini, *simple ML* tetap lebih mudah diaplikasikan karena proses deteksinya yang sederhana.



Gambar 5. Kapasitas *Outage* berbagai Sistem MIMO



Gambar 6. *Error Rate* untuk MIMO:4x4 dengan Modulasi *QPSK*

4. Kesimpulan

Penelitian pada *closed-loop* MIMO ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas kanal, kualitas *error-rate*, dan menurunkan kompleksitas sistem. Skenario besar konsep ini adalah penggunaan matriks transformasi yang dapat mengalokasikan daya sinyal-sinyal transmisi sesuai dengan kondisi kanal sehingga mampu mengoptimalkan kapasitas kanal. Simulasi komputer memberikan validasi bahwa pada SNR 0 dB dapat dicapai kapasitas optimal sampai 1 bps/Hz. Pencapaian ini didapat karena adanya peningkatan SNR sistem keseluruhan.

Keuntungan lainnya adalah peran pengaturan kovarian sinyal kirim yang dilakukan oleh matriks transformasi, akan mempermudah kerja *transmitter* tanpa harus mengubah distribusi sinyal kirimnya. Selain itu, perkalian dari matriks ini dengan kanal MIMO dapat membentuk kanal-kanal singular yang terhubung secara paralel. Sehingga, dengan *zero inter-channels correlation* detektor *simple ML* dapat dirancang guna meningkatkan performansi sistem. Banyak detektor yang telah diusulkan dan dievaluasi guna meningkatkan performansi sistem MIMO, seperti ZF, SIC, MMSE, dan ML sendiri. Namun dari beberapa detektor tersebut tidak ada yang dapat melebihi performansi ML. Diperlihatkan dalam penelitian ini bahwa pada SNR 0

dB, ML memiliki SER sampai dengan 0,2 lebih baik. Namun, walaupun performansi ML adalah yang terbaik, akan tetapi kerja ML sangat kompleks dan memerlukan waktu proses yang lama sehingga tidak mungkin untuk diaplikasikan pada sistem kecepatan tinggi. Hal ini juga yang mendorong penelitian *simple* ML ini. Dikatakan sederhana karena waktu prosesnya yang singkat dan performansinya tidak kalah dengan ML biasa. Detektor ini memiliki kesederhanaan $= M^{(M_{tr}-1)}/M_{tr}$ kali dari MIMO biasa seperti V-BLAST yang diusulkan oleh *Bell's Lab*.

Kondisi yang dapat menghambat sistem ini dalam mencapai performansi terbaiknya adalah kemampuan *receiver* dan *transmitter* dalam mengenal kanal yang dalam kajian ini diasumsikan dapat diestimasi dengan baik. Untuk itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan yang memperhatikan pengaruh kesalahan estimasi kanal terhadap performansi *simple* ML ini.

Daftar Acuan

- [1] K. Su, Phd Thesis, University of Cambridge, UK, 2003.
- [2] G.D. Golden, C.J. Foschini, R.A. Valenzuela, P.W. Wolniansky, *Electron. Let.*, 35/1 (1999) 14.
- [3] C.E. Shannon, *Proceedings of The IEEE*, 86/2 (1998) 447.
- [4] E. Telatar, AT&T Bell Labs Internal Tech. Memo Rm. 2C-174, Lucent Technologies, Bell Laboratories, NJ, USA, 1995.
- [5] D. Gesbert, M. Shafi, D.S. Shiu, P.J. Smith, A. Naguib, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 21/3, (2003), 281.
- [6] A. Taqwa, S. Soegijoko, Sugihartono, S. Tjondronegoro, *Proceedings of EECCIS*, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, 2006, p.C-116.
- [7] A. Taqwa, S. Soegijoko, Sugihartono, S. Tjondronegoro, *Proceedings of the 3rd International Conference on TSSA & WSSA*, ITB, Bandung, Indonesia, 2006, p.91.
- [8] A. Taqwa, S. Soegijoko, Sugihartono, S. Tjondronegoro, *Proceedings of the 8th SITIA*, ITS, Surabaya, Indonesia, 2007, p.43.
- [9] A. Taqwa, S. Soegijoko, Sugihartono, S. Tjondronegoro, *Proceedings of the 10th QIR*, UI, Depok, Indonesia, 2007, p.ICT-09.