

---

---

# Sistem MIMO sebagai Dasar Menuju 4G

Yonathan Santoso

PT. HUAWEI Tech Investment  
BRI II Building, 20<sup>th</sup> Floor, Suite 2005  
Jl. Jend. Sudirman Kav.44-46  
Jakarta 10210 – Indonesia

## Abstract

Multiple Input Multiple Output (MIMO) is a communication system that uses multiple antennas both in transmitter and receiver. The benefits of using MIMO systems are the abilities to reduce error through diversity technique as well as to increase data rate during multiplexing technique. Nowadays multiplexing technique is needed to increase the data rate of the new generation 4G. MIMO system is being used in WLAN communication system 802.11n that creates the increase of data rate goes up to 100 Mbps. The result showed that implementation of MIMO system had been proven to increase performance of wireless communication systems.

**Keywords:** MIMO, 4G, WLAN Communication

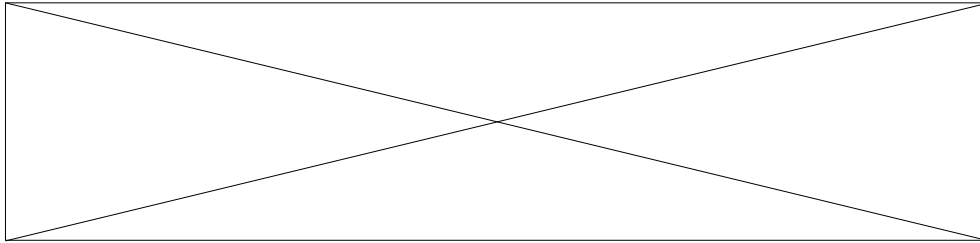
## 1. Pendahuluan

Sistem komunikasi *wireless* semakin berkembang dengan pesat dan semakin dibutuhkan oleh manusia untuk berkomunikasi dan mengirimkan data yang berupa suara (*voice*) ataupun gambar dan video (multimedia). Baru saja teknologi 3G dinikmati di Indonesia, orang sudah mulai memikirkan generasi berikutnya yaitu 4G. Sistem 4G yang sedang diteliti para pakar di dunia menjanjikan laju data hingga 100 Mbps. Ada tiga hal yang menjadi kebutuhan dari sistem 4G yaitu *high speed*, *high quality multimedia*, dan *large capacity*. Teknologi relatif baru yang kini sedang dipuji berbagai pakar karena kemampuannya meningkatkan secara drastis kapasitas kanal adalah teknologi MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Teknologi MIMO menggunakan antena lebih dari satu, baik pada bagian pemancar maupun penerimanya. Dengan menggunakan antena jamak tersebut kinerja sistem menjadi lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional *Single Input Single Output* (SISO).

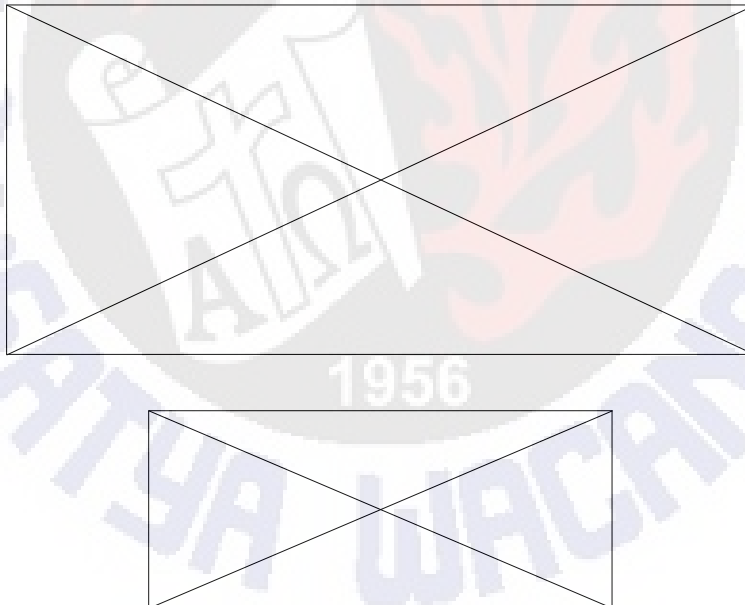
## 2. Sistem MIMO

MIMO didefinisikan sebagai sistem dengan banyak antena pada pemancar dan penerima. Sistem komunikasi tanpa kabel terdiri dari pemancar, kanal radio, dan penerima. Sistem komunikasi ini dapat dikategorikan berdasar jumlah *input* dan *outputnya*.



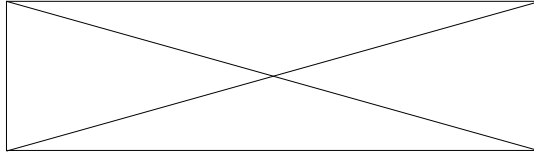
**Gambar 1** Blok Diagram Sistem MIMO [1]

MIMO dikondisikan dengan penggunaan multiantena pada pemancar dan penerima yang bekerja pada frekuensi yang sama. *Multiple in* berarti sistem mengirimkan dua atau lebih sinyal radio dengan simultan. *Multiple out* berarti dua atau lebih sinyal radio didapatkan pada penerima. Secara umum keunggulan dari sistem MIMO adalah dengan multiantena dapat mengirimkan banyak sinyal dan menerima banyak sinyal. Setiap pemancar akan terhubung melalui lintasan/banyak lintasan menuju ke setiap penerima menghasilkan fungsi pindah kanal yang secara matematis dinyatakan dalam bentuk matriks dengan ukuran  $(M_r \times M_t)$ .  $M_t$  adalah jumlah antena pemancar dan  $M_r$  adalah jumlah antena penerima.



**Gambar 2** (a)Antena Pemancar dan Penerima pada Sistem MIMO [2]  
(b) Matriks Fungsi Pindah Kanal

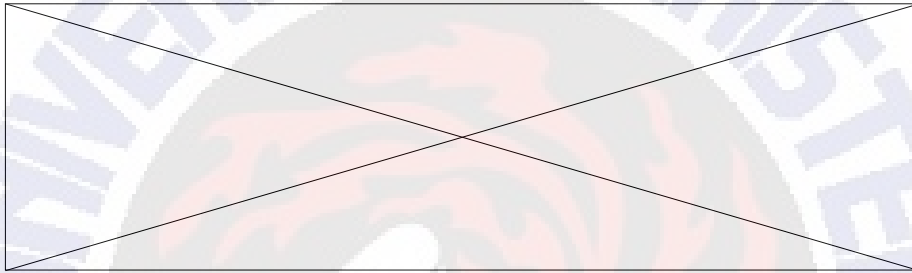
Dengan memberi data masukan dan derau (*noise*), maka didapatkan model diskrit dari sistem MIMO seperti pada Persamaan 1.



(1)

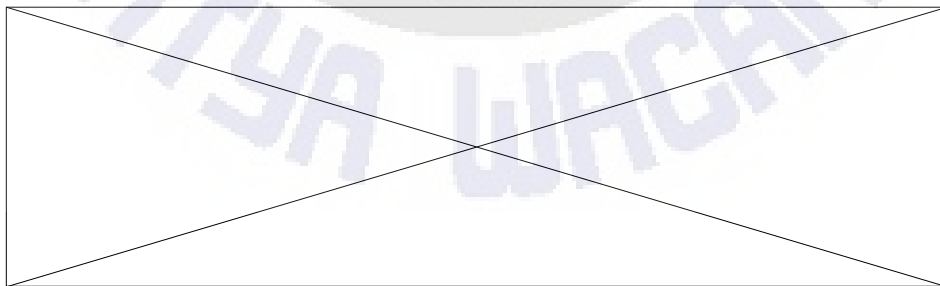
dengan  $y$  adalah isyarat keluaran yang diterima pada masing-masing antenna penerima,  $x$  adalah isyarat masukan yang dikirim pada masing-masing antenna pemancar,  $h$  adalah kanal komunikasi radio, dan  $n$  adalah derau yang ditambahkan pada masing-masing antenna penerima.

Pemodelan sistem MIMO kemudian diarahkan untuk dua tujuan yang berbeda yaitu model *diversity* dan model *spatial multiplexing*.



**Gambar 3** Antena Model *Diversity* [3]

Pada model *diversity* (Gambar 3), data yang dipancarkan pada setiap antenna pemancar adalah sama. Kemudian dapat digunakan metode *transmitter selection diversity* untuk memilih satu pemancar saja dengan kualitas terbaik. Sedangkan pada penerima digunakan metode *combining* (EGC/MRC) untuk mendapatkan diversitas murni. Model *diversity* digunakan untuk mengurangi galat akibat *fading* dan *noise* dengan diversitas antenna pada pemancar dan penerima.



**Gambar 4** Antena Model *Multiplexing* [3]

Pada model *multiplexing* (Gambar 4), data masukan dipecah menjadi beberapa bagian yang independen dan dikirimkan oleh masing-masing antenna pemancar yang bekerja pada frekuensi yang sama. Keuntungan utama MIMO *multiplexing* didapatkan dengan mengirim sinyal yang berbeda pada *bandwidth* sama dan dapat disandikan dengan tepat pada penerima. Jadi seperti terdapat satu

kanal untuk satu pemancar. Karena terdapat sejumlah kanal ekivalen sebanyak  $Mt$  pada MIMO *multiplexing* maka kapasitas dari tiap kanal dirumuskan seperti pada Persamaan 2.

$$C_{single} \quad \boxed{\times} \quad (2)$$

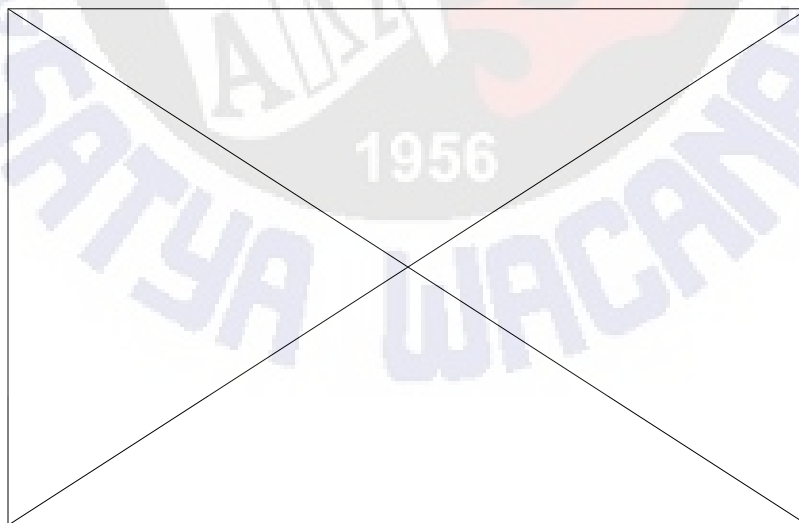
Karena terdapat kanal sebanyak  $Mt$ , maka didapatkan kapasitas total seperti terlihat pada Persamaan 3 berikut ini.

$$total\ capacity\ (C) = \boxed{\times} \quad (3)$$

Jika  $Mt = Mr$  maka didapatkan rumus kapasitas kanal untuk MIMO *multiplexing* seperti terlihat pada Persamaan 4 berikut ini.

$$C = \boxed{\times} \quad (4)$$

dengan  $C$  adalah kapasitas kanal (bps),  $Mt$  adalah jumlah antena pemancar yang digunakan,  $B$  adalah lebar pita (*bandwidth*) yang dibutuhkan (Hz),  $\times$  adalah perbandingan antara daya sinyal dengan *noise* pada penerima. Dari Persamaan 4 tersebut didapatkan bahwa peningkatan kapasitas atau *data rate* pada sistem MIMO *multiplexing* berbanding lurus secara linear dengan banyaknya antena pemancar dan dapat dilihat pada Gambar 5 [9].



**Gambar 5** Grafik Peningkatan Kapasitas Sistem MIMO

Sebagai contoh, misalkan digunakan sejumlah  $Mt$  pemancar, maka sistem ini seolah-olah memiliki  $Mt$  saluran yang terpisah satu sama lain untuk membawa  $Mt$  aliran data yang berbeda, masing-masing dengan laju rata-rata  $1/Mt$  dari laju aliran

data aslinya, padahal seluruh sistem multiantena ini bekerja pada frekuensi yang sama. Kesimpulannya jelas, telah terjadi penghematan penggunaan *bandwidth* sebesar  $1/Mt$  kali, atau dengan kata lain, terjadi peningkatan kapasitas kanal sebesar  $Mt$  kali. Kondisi ekstremnya, dengan sedikitnya 10 antena pada masing-masing sisi pemancar dan penerima, aliran data sebesar 1 Mbps dapat dikirimkan ke penerima dengan *bandwidth* sekitar 100 kHz saja apabila digunakan modulasi dengan efisiensi 1 bps/Hz. Dari sudut pandang yang berbeda, lebar spektrum 100 kHz yang sebelumnya hanya mampu membawa sinyal 100 kbps, sekarang mampu mengangkut data berlaju 1 Mbps dengan menggunakan minimal 10 antena pada setiap sisi.

Penerima untuk MIMO *multiplexing* perlu menggunakan teknik deteksi untuk dapat memisah-misahkan sinyal dari aliran data yang berbeda yang telah tercampur baur pada setiap antenanya karena semua antena bekerja pada frekuensi yang sama. Salah satu tantangan utama dalam merancang penerima MIMO adalah penyediaan estimasi respons kanal yang cepat dan akurat agar didapatkan data yang benar pada tiap antenanya. Estimasi kanal penting dalam sistem MIMO karena dari situlah sistem ini dapat bekerja. Algoritma yang digunakan pada penerima membutuhkan pengetahuan tentang kondisi kanal. Sehingga muncul pendapat bahwa sistem MIMO justru memanfaatkan keberadaan *multipath* dan menggunakan estimasi kanal *multipath* dalam proses deteksi. Penerima untuk sistem MIMO tersebut antara lain *zero forcing receiver* dan *V-BLAST receiver*.

### Zero Forcing Receiver

Algoritma *zero forcing* dirumuskan dengan estimasi keluaran  $y = Q(y_{ZF})$ . Algoritma ini didasarkan pada teknik adaptif pada antena larik konvensional yang disebut sebagai *linear nulling*. Pada metode ini, masing-masing *spatial stream* dapat dipertimbangkan sebagai sinyal yang diinginkan dan *spatial stream* yang lain diasumsikan sebagai derau atau penginterferensi. Menolkan penginterferensi dilakukan oleh pembobot linear pada sinyal yang diterima sehingga semua sinyal penginterferensi dapat dihilangkan. Pada algoritma *zero forcing*, untuk menolkan penginterferensi dilakukan dengan memilih vektor pembobot  $d_i$  dengan nilai  $i =$

$1, 2, \dots, Mt$  sehingga  $\begin{bmatrix} \times & \times \\ \times & \times \end{bmatrix}$  dengan  $\begin{bmatrix} \times \\ \times \end{bmatrix}$  adalah matriks transpose dan  $\begin{bmatrix} \times \\ \times \end{bmatrix}$  adalah kolom ke- $j$  matriks kanal  $H$ . Penyelesaian persamaan vektor pembobot tersebut adalah mencari matriks  $D$  sehingga didapatkan  $D.H = I$ ; dengan  $D$  adalah matriks yang menyatakan proses linear pada *receiver*. Baris ke- $i$  dari matriks  $D$  sama dengan tranpose ke- $i$  dari vektor pembobot  $d_i$  dan  $I$  adalah matriks identitas. Sehingga dengan memaksa semua penginterferensi menjadi nol, semua *spatial stream* dapat diestimasi. Solusi matriks  $D$  adalah menggunakan *pseudo-inverse*  $H$ .

$$D = H^+ = \left( \begin{bmatrix} \times & \times \\ \times & \times \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

dengan  $H^+$  adalah matriks *pseudo-inverse* matriks kanal  $H$ . Untuk mencari *pseudo-*



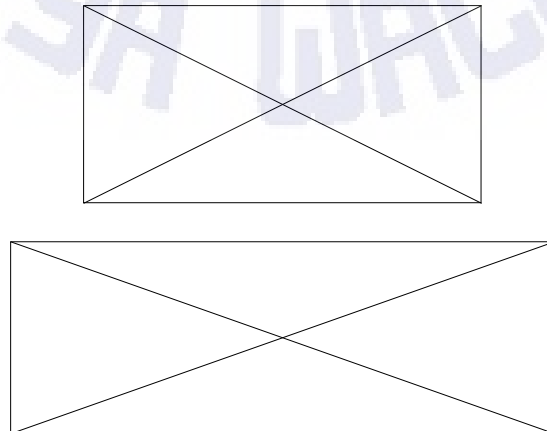
*inverse* pada *software* Matlab dapat menggunakan perintah *pinv*. Syarat agar *pseudo-invers* ada,  $M_t$  harus kurang dari atau sama dengan  $M_r$  dengan  $M_t$  adalah jumlah antenna pemancar dan  $M_r$  adalah jumlah antenna penerima. Jika  $M_t > M_r$  maka  $H^T H$  adalah *singular* dan *inverse*  $H^T H$  tidak ada. Syarat lain agar *inverse*  $H^T H$  ada adalah tiap kolom  $H$  harus tak gayut. Asumsi yang dipakai agar data tak gayut adalah jarak antar antenna harus sama dengan atau lebih besar daripada  $\lambda / 2$  dan sistem beroperasi pada lingkungan yang banyak pantulan yang dapat dimodelkan sebagai model Rayleigh *fading*. Untuk  $M_r \geq M_t$  dan *inverse*  $H^T H$  ada, keluaran dari *zero forcing receiver* ( $y$ ) dirumuskan seperti pada Persamaan 6.

$$\begin{aligned}
 y &= D \cdot r \\
 &= (H^+)^T \cdot r \\
 y &= H^+ \cdot r \quad (6)
 \end{aligned}$$

$H^+$  adalah matriks *pseudo-inverse* matriks kanal  $H$  dan  $r$  adalah keluaran sinyal setelah mengalami *fading* dan *noise*. Dengan rumusan tersebut, sebanyak  $M_t$  elemen  $y$  dapat disandikan pada *receiver*. Diversitas yang didapatkan dari sistem  $(M_t, M_r)$  dengan *zero forcing receiver* ini adalah sama dengan  $M_r - M_t + 1$ . Jika  $M_r = M_t$  maka tingkat diversitas ordennya sama dengan satu. Dengan diversitas orde satu berarti nilai *BER* membaik dengan faktor  $10^1$  jika SNR meningkat pada aras 10 dB.

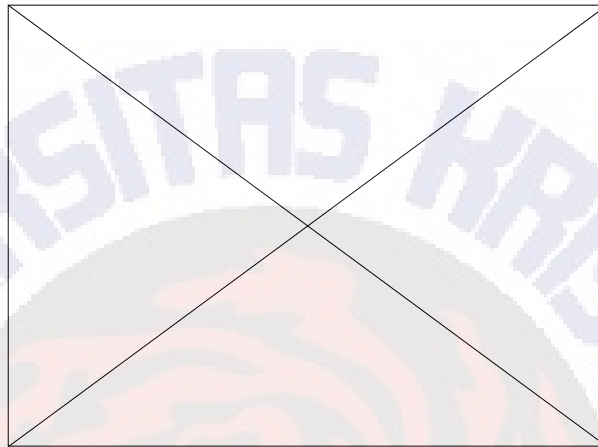
**Contoh Zero Forcing**

Sistem MIMO dengan  $(M_t, M_r) = (3, 4)$  dengan matriks koefisien kanal  $H$ . Kanal  $H$  ini adalah jalur/lintasan yang menghubungkan antara pemancar dan penerima. Pada kanal terjadi berbagai mekanisme propagasi yang menyebabkan terjadi atenuasi dan perubahan fase pada sinyal yang diterima. Karena perubahan terjadi sangat cepat dan bervariasi pada amplitudo dan fase sinyal yang sampai di penerima, maka kanal  $H$  dimodelkan dalam bentuk koefisien yang berupa *complex random variables*. Koefisien kanal  $H$  ini dimodelkan menurut model dasar kanal MIMO dengan bentuk matriks  $(M_r \times M_t)$  yang digambarkan secara lengkap sebagai berikut.



Data yang dikirimkan dengan modulasi 16-QAM adalah  $a = (1+i, -1-i, 1+3i)^T$ , konstelasi 16 QAM dirumuskan mempunyai titik koordinat  $A_i, B_i = \pm a \dots \pm (\begin{matrix} \square \\ \times \end{matrix} - 1)a$  yang digambarkan ke dalam bentuk sumbu nyata dan imajiner Sehingga didapatkan titik konstelasi untuk modulasi 16-QAM adalah  $A = (\pm 1 \pm j, \pm 1 \pm j3, \pm 3 \pm j, \pm 3 \pm j3)$ .

Diagram konstelasi dari 16-QAM digambarkan pada Gambar 6.

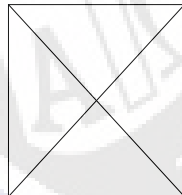


**Gambar 6** Diagram Konstelasi dari 16-QAM

Derau  $v = (0,6+0,4i, 0,4-0,1i, 0,7+0,5i, 0,2-0,2i)^T$ .

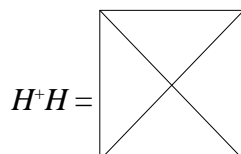
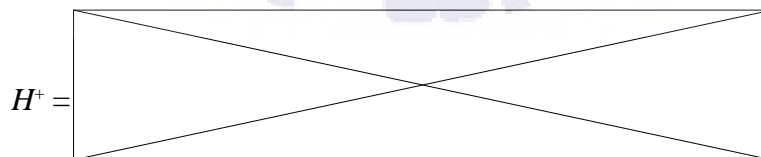
Kemudian dicari sinyal keluaran pada penerima dengan menggunakan rumus  $r = H.a + v$ .

$$r = H.a + v =$$



Matriks *pseudo-inverse*  $H^+$  dapat dicari dengan menggunakan *software* Matlab yaitu:

$$H^+ = \text{pinv}(H)$$



$H^*H = I$ , berarti interferensi antar kanal telah dapat dihilangkan.

Estimasi keluaran dengan algoritma *zero forcing* dirumuskan  $y_{ZF} = H^+ \cdot r$ .

$$y_{ZF} = \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array}$$

Jika hasil keluaran ini dipetakan dengan simbol terdekat pada titik konstelasi 16-QAM maka didapatkan keluaran *zero forcing receiver*  $y$  sebagai berikut.

$$y = \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array}$$

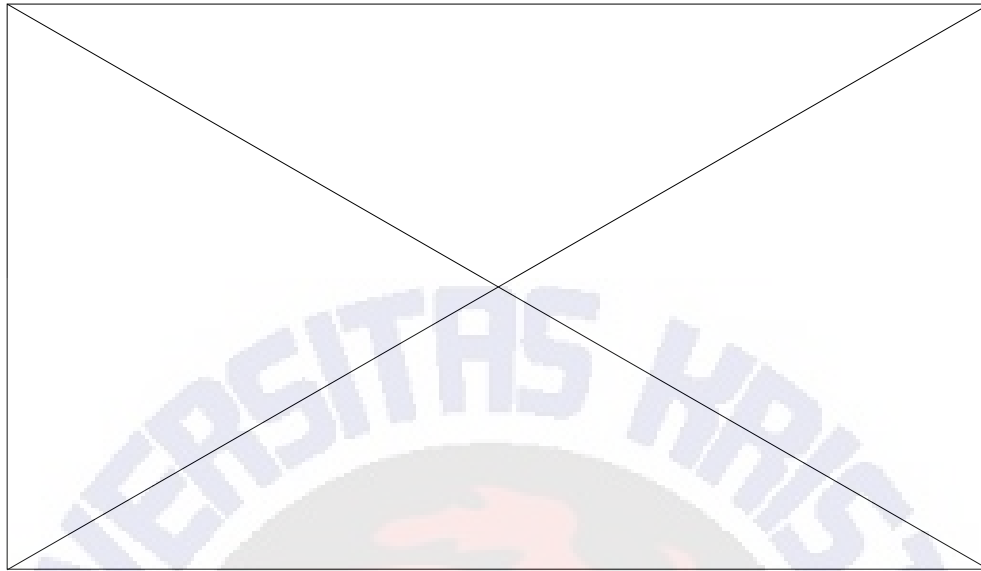
Data keluaran yang didapatkan masih terdapat galat dibandingkan dengan data masukan awal. *ZF receiver* dapat mengeliminasi interferensi pada kanal  $H$  karena  $H^*H = I$ . Tetapi *ZF receiver* tidak dapat mengatasi galat akibat derau sehingga sinyal keluaran masih terdapat kesalahan.

### ***V-BLAST Receiver***

Salah satu bentuk penerima untuk kanal MIMO dengan arsitektur *BLAST receiver* disebut dengan *parallel encoding*. Proses *parallel encoding* adalah masukan data serial *demultiplexing* menjadi  $Mt$  *independent stream*. Masing-masing *spatial stream* kemudian disandikan dahulu (*per antenna coding*) sebelum dipancarkan oleh masing-masing pemancar. Proses ini dapat dianggap sebagai mengubah data serial menjadi vektor yang vertikal dan disebut sebagai *vertical encoding* atau *V-BLAST*. *Vertical encoding* ini menghasilkan *diversity gain* sebesar  $Mr$  antenna penerima karena setiap simbol yang disandikan dipancarkan oleh satu antenna pemancar dan diterima sebanyak  $Mr$  antenna penerima. Sistem ini mempunyai tingkat kompleksitas penyandian yang meningkat secara linear dengan jumlah antenna yang digunakan.

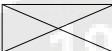
Proses yang dilakukan pertama kali pada *V-BLAST receiver* adalah dari sejumlah  $Mt$  simbol yang ditransmisikan dipilih satu simbol berdasarkan *SNR* yang diterima. Estimasi simbol yang diterima dengan *SNR* tertinggi dilakukan dengan menganggap simbol yang lain sebagai *noise* atau *interferers*. Kemudian simbol yang diestimasi tersebut dikeluarkan dan simbol selanjutnya dengan tingkatan *SNR* tertinggi diestimasi. Simbol yang sudah diestimasi kemudian dianggap sebagai *noise*. Proses tersebut berulang terus sampai semua simbol yang dipancarkan selesai diestimasi semua sehingga dapat dikatakan bahwa algoritma *V-BLAST* menggunakan prosedur rekursi untuk mendapatkan kembali dengan tepat semua simbol yang dipancarkan. Blok diagram dari *V-BLAST receiver* dapat dilihat pada Gambar 7.





**Gambar 7** *V-BLAST Receiver*

Algoritma *V-BLAST* menggunakan algoritma *zero forcing* pada bagian awal untuk proses inialisasi kanal dari sistem. *Zero forcing* menghasilkan beberapa *spatial stream* yang masing-masing mempunyai varians derau sebesar  $\frac{1}{M}$ . Kemudian akan diseleksi untuk memilih *spatial stream* dengan derau terendah. Penerima *V-BLAST* dengan *zero forcing* ini kemudian disebut sebagai *V-BLAST/ZF receiver*. Algoritma yang digunakan pada *V-BLAST/ZF receiver* dijelaskan dengan persamaan-persamaan berikut ini (Persamaan 7 sampai Persamaan 14).

Inialisasi awal :  (7)

 (8)

Rekursi :  (9)

 (10)

 (11)

 (12)

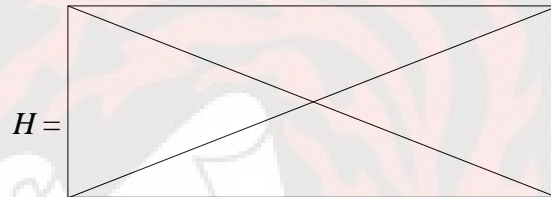
 (13)

 (14)

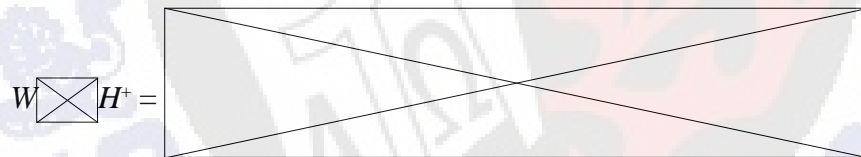
$H^+$  adalah Moore – Penrose pseudo-inverse matriks kanal  $H$ ,  $\square$  adalah baris ke- $j$  dari  $\square$ ,  $\square$  merupakan kolom ke- $\square$  dari  $H$ ,  $\square$  merupakan matriks yang dihasilkan setelah menolkan kolom ke- $\square$  dari  $H$ , dan  $\square$  adalah pseudo-inverse dari  $\square$ . Persamaan 9 memilih *spatial stream* yang hendak dideteksi dahulu berdasarkan nilai *noise varians*-nya. Kemudian Persamaan 10 untuk mencari simbol yang diestimasi pertama kali. Persamaan 11 memetakan hasil keluaran dengan simbol terdekat. Persamaan 12 adalah proses *cancellation* dengan *feedback* untuk estimasi *spatial stream* selanjutnya. Persamaan 13 untuk mencari matriks pseudo-inverse yang baru untuk estimasi *spatial stream* selanjutnya. Proses ini diulang dari awal sampai semua *spatial stream* selesai disandakan.

**Contoh V-BLAST**

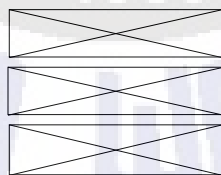
Sistem MIMO dengan parameter sama dengan soal sebelumnya  $(M_t, M_r) = (3, 4)$  dengan  $H$  adalah matriks koefisien kanal.



Proses inisialisasi awal didapatkan dari matriks pseudo-inverse dari matriks  $H$ .

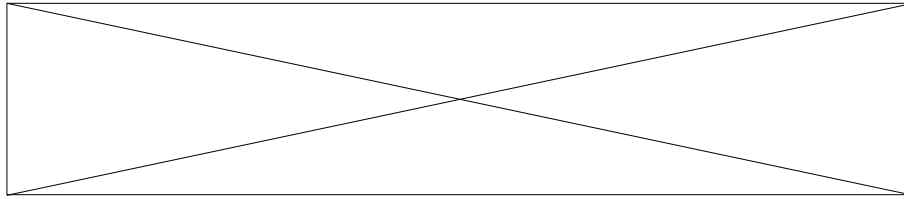


Dari  $W \square$  dicari *noise varians* pada masing-masing *layer* atau barisan.



Algoritma memilih *layer* dengan *noise* terkecil sebagai komponen pertama yang hendak diestimasi menggunakan Persamaan 9 yaitu baris ke-3 yang merupakan komponen ketiga dengan nilai paling rendah yaitu 1, 12.

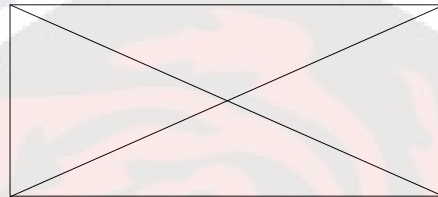
*Spatial stream* pertama yang diestimasi dicari berdasarkan Persamaan 10 dengan  $W \square$  adalah matriks  $W$  baris ketiga dan  $r_1$  adalah dari persamaan  $r = H.a + v$ .



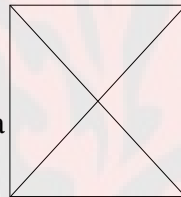
Jika dipetakan dengan simbol terdekat pada konstelasi 16-QAM menghasilkan komponen ketiga yang dipancarkan.

$$ak \begin{matrix} \diagup & \diagdown \\ \diagdown & \diagup \end{matrix}$$

Kemudian dilakukan proses *cancellation* dengan *feedback* berdasarkan Persamaan 12 sehingga sinyal yang diterima termodifikasi sebagai berikut.



adalah matriks  $H$  kolom ketiga



. Kemudian proses *can-*

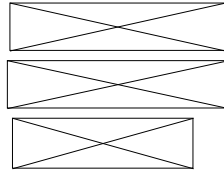
*cellation* dilanjutkan dengan menolak simbol yang sudah diestimasi dalam hal ini diwakili oleh kolom ketiga matriks  $H$  dan menghasilkan matriks  $H$  yang sudah *update* untuk estimasi simbol selanjutnya.

$$\begin{matrix} \diagup & \diagdown \\ \diagdown & \diagup \end{matrix} = \begin{matrix} \diagup & \diagdown \\ \diagdown & \diagup \end{matrix}$$

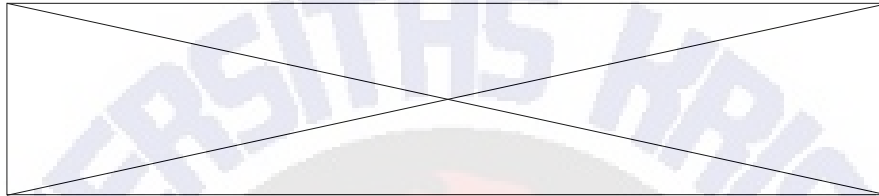
*Pseudo-inverse* matriks  $\begin{matrix} \diagup & \diagdown \\ \diagdown & \diagup \end{matrix}$  untuk proses iterasi selanjutnya didapatkan sebagai berikut.

$$W_2 = \begin{matrix} \diagup & \diagdown \\ \diagdown & \diagup \end{matrix}$$

Dicari kembali *layer* dengan *noise* terkecil.



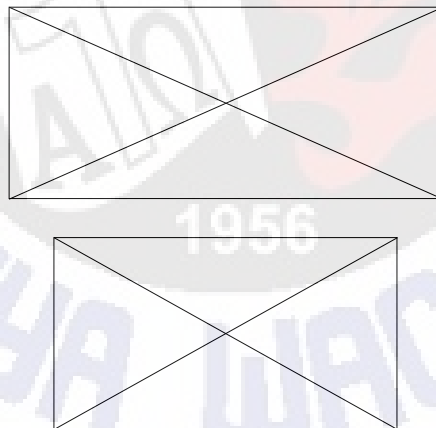
Dipilih  $W_{\text{X}} = 0,36$  untuk estimasi simbol selanjutnya.



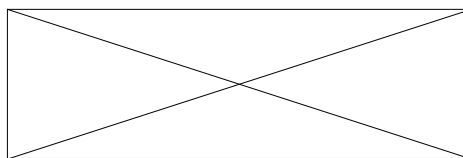
Setelah dipetakan dengan simbol terdekat didapatkan komponen kedua data yang dipancarkan.



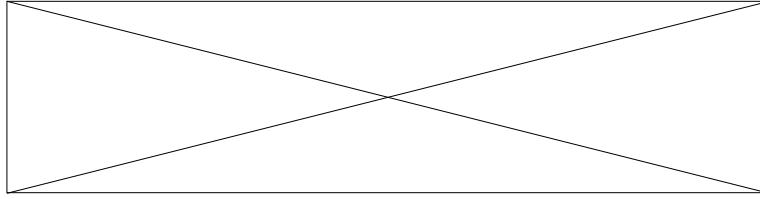
Kemudian proses *feedback* dilakukan lagi dan menghasilkan *updated vector* yang diterima.



*Pseudo-inverse* untuk proses selanjutnya didapatkan  $W_3$ .

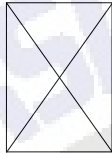


Kemudian dicari estimasi dari komponen pertama.



Dipetakan dengan simbol terdekat pada konstelasi 16-QAM menghasilkan keluaran  $ak_3 = 1 + i$ .

Dari ketiga sinyal yang dihasilkan jika digabungkan menjadi satu vektor

menghasilkan  $ak =$   merupakan estimasi yang tepat dari simbol yang dipancarkan.

*V-BLAST receiver* menghasilkan kinerja lebih baik daripada *linear receiver*. Hal ini disebabkan proses estimasi simbol dilakukan satu-persatu dan adanya proses *symbol cancellation* untuk meminimalkan galat

### 3. Penerapan MIMO

Sekarang ini aplikasi sistem MIMO bisa didapatkan pada produk *wireless LAN* generasi 802.11n. Ada enam proposal yang sudah dibuat untuk standar 802.11n dan kemudian dikelompokkan menjadi dua proposal utama dari dua kelompok yaitu *TgnSync (Task Group n Synchronization)* dan *WWiSE (World Wide Spectrum Efficiency)*. *TgnSync* terdiri dari vendor-vendor antara lain Atheros, Agere, Marvell, Cisco, dan Intel. Sedangkan *WWiSE* terdiri dari Airgo, Broadcomp, Conexant, dan Texas. Pada dasarnya kedua proposal dapat dikatakan sama dengan tujuan utama yaitu untuk meningkatkan kecepatan transmisi (*data rate*) hingga mencapai lebih dari 100 Mbps. Masing-masing menyetujui penggunaan teknologi MIMO dengan konfigurasi berbeda-beda. Sampai saat ini IEEE group belum menetapkan standar baku yang dipilih dari kedua proposal utama tersebut. Banyak pihak yang menduga bahwa penetapan standar lebih merupakan strategi politik dan bukan masalah teknis. Kedua proposal (*WWiSE* dan *TGnSync*) mengimplementasikan sistem MIMO pada WLAN.

Perhitungan *data rate* menurut proposal dari *WWiSE* adalah menggunakan rumus dasar sebagai berikut.

$$\text{Data Rate (Mbps)} = 0,675 \times \text{Bandwidth kanal} \times \text{jumlah } \textit{spatial stream} \times \textit{code bit per subcarrier} \times \textit{code rate}. \quad (15)$$

*Bandwidth* kanal = 20 untuk kanal 20 MHz atau 40 untuk kanal 40 MHz.

Jumlah *spatial stream* = bisa berjumlah 1,2,3, atau 4 dan harus kurang dari atau sama dengan jumlah antena pemancar.

Jumlah *bit* penyandi per *subcarrier* = pada umumnya ada 6 untuk modulasi 64 *QAM* atau 4 untuk 16 *QAM*. *BPSK* ada 1, *QPSK* ada 2 dan hanya bisa digunakan pada kanal 20 MHz.

*Code rate* bernilai 1/2 atau 3/4 saat menggunakan 16 *QAM* dan bernilai 2/3, 3/4, atau 5/6 saat menggunakan 64 *QAM*.

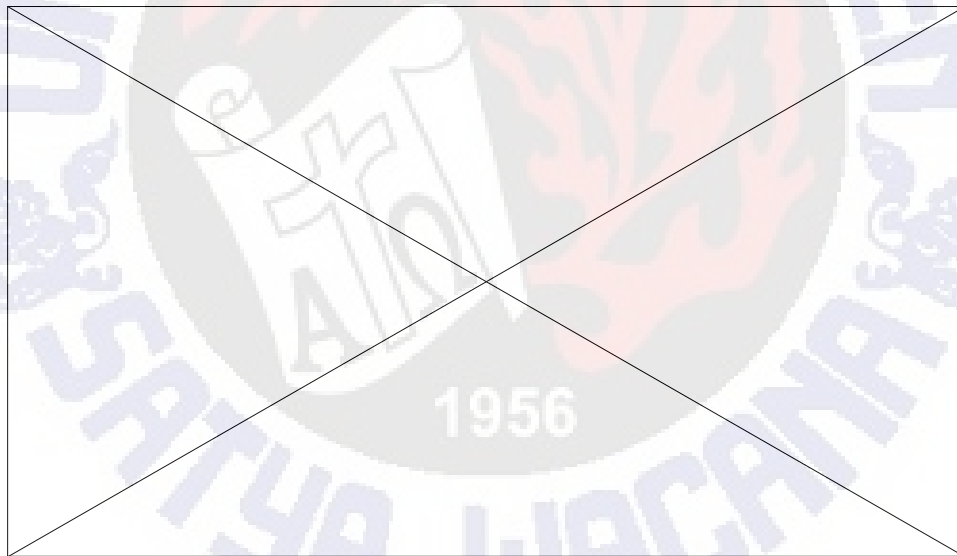
Contoh konfigurasinya adalah sebagai berikut.

Konfigurasi dengan kanal 20 MHz, 4 *spatial stream*, modulasi 16-*QAM*, Laju sandi 1/2 menghasilkan kecepatan 108 Mbps.

Konfigurasi dengan kanal 40 MHz, 4 *spatial stream*, modulasi 64-*QAM*, Laju sandi 5/6 menghasilkan kecepatan 540 Mbps.

Perbandingan spesifikasi standar WLAN 802.11 ditunjukkan oleh Tabel 1, sedangkan grafik perbandingan peningkatan kecepatan transmisi (waktu transfer data) ditunjukkan pada Gambar 8.

**Tabel 1** Spesifikasi Standar IEEE 802.11 [5]

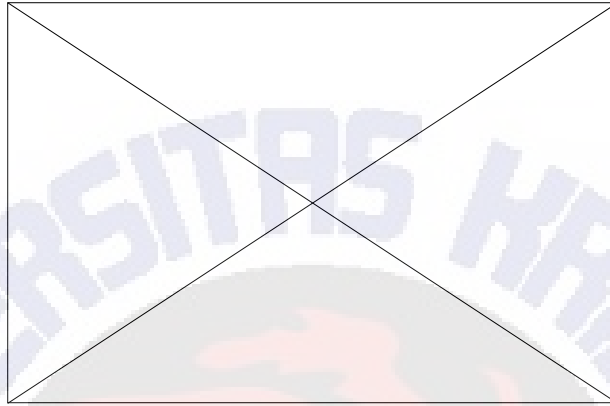


#### 4. Simpulan

Pada makalah ini diberikan sekilas pembahasan tentang sistem MIMO pada teknologi nirkabel meliputi dasar teori sistem MIMO, pemodelan sistem MIMO, algoritma yang digunakan pada penerima sistem MIMO, dan contoh penerapan sistem MIMO pada WLAN. Dari pembahasan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa, sistem MIMO adalah sistem komunikasi dengan menggunakan antena jamak pada bagian pemancar dan penerima, sistem MIMO mempunyai tujuan utama meningkatkan kapasitas atau kecepatan transmisi (*data rate*) melalui model *spatial*



*multiplexing*, peningkatan kapasitas pada sistem MIMO *multiplexing* berbanding lurus secara linear dengan jumlah antena pemancar yang digunakan dan dirumuskan pada Persamaan 4, dan penggunaan sistem MIMO pada WLAN generasi 802.11n terbukti menghasilkan peningkatan kecepatan transmisi (*data rate*) > 100 Mbps.



**Gambar 8** Diagram Waktu Transfer

## 5. Daftar Pustaka

- [1] Yavuz, Yapici. *V-BLAST / MAP : A New Symbol Detection Algorithm for MIMO Channels*. Thesis. Bilkent University.
- [2] Andrea, Goldsmith. 2005. *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- [3] Trabert, Brian. 2004. *MIMO*. University of South Florida.
- [4] Van, Zelst A. , Jones V.K., Van Nee Richard. 2005. *MIMO OFDM for Wireless Lans*. Airgo.
- [5] Ylitalo, Juha. 2004. *Tutorial MIMO Communications*. University of Oulu.