

Analisa Kinerja TCM-SM Untuk MIMO Pada Kanal Fading

Popy Maria¹; Gunawan Wibisono²

¹Teknik Elektro, Politeknik Negeri Padang
Padang, Indonesia.

Email: popy.pnp@gmail.com

²Teknik Elektro, Universitas Indonesia
Depok, 16424, Indonesia.

Email: gunawan@ee.ui.ac.id

Abstrak – Spasial Modulation (SM) adalah sebuah konsep modulasi baru dalam sistem MIMO diusulkan untuk mengurangi kompleksitas dan ICI tanpa memburuk kinerja sistem. Di SM, hanya satu pancar antenna diaktifkan untuk transmisi data setiap saat signaling. Informasi bit yang ditransmisikan mengandung dua informasi, simbol yang dipilih dari kompleks diagram konstelasi sinyal dan indeks mengirimkan antenna aktif yang dipilih dari set antenna pemancar. TCM - SM diusulkan dalam penelitian ini untuk menerapkan konsep TCM untuk sinyal poin konstelasi SM. Kode sinyal di SM (TCM-SM) bertujuan untuk meningkatkan kinerja SM di Rayleigh saluran flat fading dan saluran memudar Rician. analisis kinerja diungkapkan oleh probabilitas bit error.

Kata kunci : MIMO, SM, TCM, TCSM

Abstract – *Spatial Modulation (SM) is a new modulation concept in MIMO system was proposed to reduced complexity and ICI without deteriorating the end to end system performance. In SM, just one transmit antenna is activated for data transmission at any signaling time instance. Information bits that was transmitted are contains two information, symbol that is chosen from a complex signal constellation diagram and index transmit antenna active that is chosen from set of transmit antennas. TCM – SM was proposed in this research is to apply TCM concept to signal constellation points of SM. Have transmit coded signal in SM (TCM-SM) to aim for enhance SM performance in Rayleigh flat fading channel and Rician fading channel. Performance analysis was expressed by bit error probability.*

Keywords : MIMO, SM, TCM, TCSM

I. PENDAHULUAN

Tuntutan peningkatan *data rate* dan kualitas layanan suatu sistem komunikasi *wireless* memicu lahirnya teknik baru untuk meningkatkan efisiensi spektrum dan perbaikan kualitas saluran. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan multi antenna pada sisi pengirim dan penerima, teknik ini dikenal dengan *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Ada dua hal yang sebenarnya diberikan oleh sistem MIMO yaitu *diversity gain* dan *mutiplexing gain*. *Diversity gain* dapat dicapai dengan menerapkan teknik *spatial diversity*. Prinsipnya, diversitas mengirimkan beberapa replika sinyal informasi pada kanal *independent fading*, sehingga di *receiver* minimal ada satu sinyal yang tidak mengalami *fading* terburuk contohnya adalah teknik *Space Time Block Code* (STBC) yang diperkenalkan oleh Alamouti[1]. *Multiplexing gain* dapat dicapai dengan menggunakan *spatial multiplexing* atau *space division multiplexing* (SDM) pada sinyal yang akan dikirim. Prinsip dasar SDM yaitu *symbol stream* yang akan dikirim dipecah menjadi beberapa paralel *symbol stream* yang kemudian ditransmisikan secara simultan dengan *bandwidth* yang sama pada masing-masing antenna, Teknik yang umum digunakan yaitu dengan *Vertical Bell Labs Layered Space-Time Architecture* (VBLAST) [2]. Namun demikian *spatial multiplexing* dan *spatial diversity* belum cukup handal

untuk mengatasi *inter channel interference* (ICI) dan sistem deteksi dipenerima yang masih kompleks.

Pada sistem MIMO STBC dan VBLAST semua antenna digunakan pada satu waktu secara simultan untuk mengirimkan data dengan tujuan untuk meningkatkan efisiensi daya ataupun menaikkan *data rate*. Namun demikian dipenerima ini dapat meningkatkan kompleksitas pendeteksian. *Spatial Modulation* (SM) [3] merupakan suatu konsep teknik modulasi yang baru pada sistem MIMO dengan tujuan untuk mengurangi kompleksitas pada skema *multiple antenna* tanpa mengurangi performansi *end to end system*. Konsep dasar dari SM adalah hanya satu antenna pengirim yang aktif untuk mentransmisikan sinyal pada satu waktu. Bit informasi yang dikirim mengandung unit sinyal yang dipilih dari *complex signal-constelation* diagram dan index antenna pengirim yang dipilih dari set antenna pengirim.

R. Mesleh, Harald Haas dkk [3] memaparkan bahwa SM dapat meningkatkan efisiensi *spectrum* dan juga dapat menghindari menghindari korelasi antara antenna transmit dengan kompleksitas lebih rendah dari teknik STBC dan VBLAST. Deteksi optimum kemudian diusulkan oleh Jeyadeepan Jeganathan dkk [5] yang memamparkan bahwa deteksi optimum dengan menggunakan prinsip *maximum likelihood* (ML) memberikan performansi yang lebih baik dibandingkan

dengan deteksi sub-optimal yang menggunakan MRC. Pada [6] menggabungkan teknik *trellis coded modulation* (TCM) pada SM untuk meningkatkan performansi SM pada *correlated channel*. Teknik ini yang kemudian dikenal dengan *Trellis Code Spatial Modulation* (TCSM).

Pada [8] dipaparkan bahwa teknik pengkodean dapat digunakan untuk memperbaiki performansi kesalahan tanpa mengorbankan data rate dan tanpa membutuhkan tambahan bandwidth. Untuk mendapatkan *coding gain* maka *channel encoder* digabungkan dengan *mapping* menggunakan *set partitioning*. Ini juga akan lebih mengoptimalkan system karena dibagian deteksi digunakan algoritma Viterbi. TCM menggunakan *convolutional encoder* dengan rate $R = m/m + 1$ kemudian dimappingkan pada $(m + 1)$ PSK.

Salah satu teknik untuk meningkatkan kinerja sistem adalah dengan menggunakan teknik pengkodean [8]. Pada [3-6] sinyal yang dikirimkan adalah sinyal modulasi *uncoded*. Pada penelitian ini diusulkan untuk konstelasi sinyal yang dikirimkan pada SM adalah sinyal modulasi *coded*. Dengan mengirimkan sinyal modulasi yang telah dikodekan sebelumnya dapat meningkatkan kinerja dari sistem. Dengan mengambil kelebihan dari [8], maka untuk penelitian ini diaplikasikan teknik TCM untuk konstelasi sinyal yang dikirimkan pada SM (TCM-SM). Analisa performansi TCM pada teknik SM akan dinyatakan dengan probabilitas kesalahan bit sistem.

Untuk membedakan antara SM, TCSM dan TCM-SM dapat dilihat dari mapping bit yang digunakan untuk konstelasi sinyal dan konstelasi antenna. Sebagai contoh, jika 4 bit informasi akan dikirimkan pada MIMO 4x4, untuk teknik SM konvensional 2 bit *most significant bit* (MSB) digunakan untuk konstelasi antenna dan 2 digunakan untuk konstelasi sinyal. Artinya dengan SM dapat dikirim sinyal dengan modulasi QPSK/QAM *uncoded* untuk 4 antenna pengirim. Pada TCSM [6], 1 bit MSB digunakan untuk menentukan konstelasi antenna dengan TCM 1/2 dan 3 bit berikutnya untuk konstelasi sinyal. Sehingga TCSM dapat mentransmisikan sinyal termulasi 8PSK *uncoded* untuk 4 antenna pengirim. Pada TCM-SM, 2 bit MSB digunakan untuk konstelasi antenna dan 2 bit berikutnya untuk konstelasi sinyal. Sehingga untuk TCM-SM dapat mengirimkan sinyal TCM 2/3 (8PSK *coded*) melalui 4 antenna pengirim.

II. PERMODELAN SISTEM TCM – SM

TCM-SM merupakan pengimplementasian teknik TCM pada teknik modulasi SM MIMO untuk menentukan konstelasi sinyal. Gambar 1 merupakan blok diagram untuk TCM-SM dimana secara umum terdiri dari:

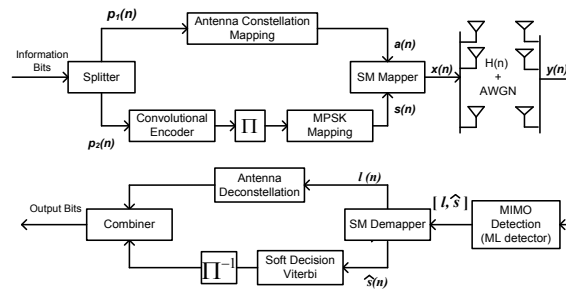
1. *Splitter*

Splitter berfungsi untuk mengelompokkan bit informasi sesuai dengan jumlah bit yang akan ditransmisikan yaitu $\log_2 N_t + \log_2 M - 1$ bit. N_t menunjukkan jumlah antenna pengirim dan M adalah orde modulasi yang digunakan.

2. TCM

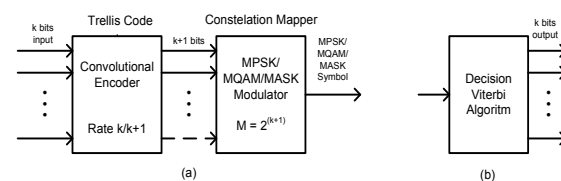
TCM merupakan skema kombinasi dari pengkodean dan modulasi untuk meningkatkan ketahanan dari sistem transmisi digital. Dalam lingkungan yang *bandwidth-limited*, penaikkan efisiensi dalam pemakaian frekuensi

dapat diperoleh dengan memilih orde yang lebih tinggi dari skema modulasi, tetapi daya sinyal yang lebih besar akan dibutuhkan untuk mempertahankan pemisahan sinyal yang sama dan untuk menyebabkan *error probability* yang sama. Representasi TCM seperti pada Gambar 2 terdiri atas:



Gambar 1. Blok Diagram TCM-SM

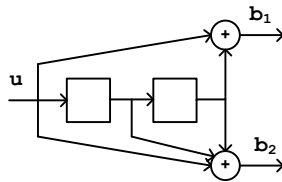
1. *Binary convolution code*, dimana mempunyai k biner input $b_i^{(1)}, b_i^{(2)}, \dots, b_i^{(k)}$ dan n biner output $c_i^{(1)}, c_i^{(2)}, \dots, c_i^{(n)}$. Jumlah memori (v) dari *encoder* menentukan jumlah *state*, dimana jumlah *state* adalah 2^v .
2. Bagian modulator, dimana bersifat *memoryless* dan terhubung dengan biner n *output convolution encoder*. k bit input dikodekan dengan convolutional encoder dengan rate $k/(k + 1)$, sehingga $(k+1)$ codeword dimappingkan pada konstelasi symbol MPSK, MQAM atau MASK dengan nilai $M = 2^{(k+1)}$. Jika $k = 1$ maka laju pengkodean adalah 1/2 dan codeword akan disimbolkan dengan menggunakan mapping QPSK atau QAM.
3. Di penerima deteksi untuk TCM menggunakan algoritma *soft decision viterbi* yang berdasarkan minimum *euglidean distance*



Gambar 2. Blok Diagram TCM

Convolutional Encoder

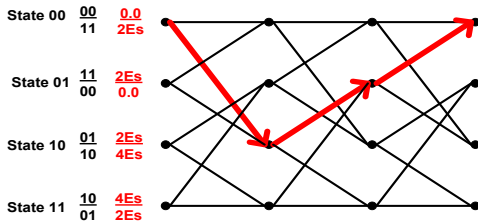
Kode konvolusional dibangkitkan dengan cara melewati deret bit informasi pada sebuah shift register. Data masukan enkoder diasumsikan berupa digit biner, dan diumpankan ke *shift register* sebanyak k bit dalam satu waktu. Jumlah bit keluaran untuk setiap k -bit masukan adalah n -bit. Dengan demikian berarti laju kode adalah $R_c = k/n$. Gambar 3 menunjukkan kode konvolusional dengan $R = 1/2$ dengan generator [5,7]_{octal} atau [101 111].



Gambar 3. Kode konvolusional dengan $R = 1/2$

Coding Gain TCM [8]

Gambar 4 merupakan diagram trellis untuk generator convolutional encoder pada Gambar 3 yang kemudian dimappingkan pada QPSK. Nilai d_{free}^2 TCM ditentukan dengan memilih jarak minimum dari perubahan state 00 kembali ke 00 yang berdasarkan pada Gambar 4. Untuk Gambar 4 nilai d_{free}^2 -nya yaitu dengan menjumlahkan nilai bobot dari state 00 ke state 10 lalu ke state 01 dan kembali ke state 00. Sehingga diperoleh nilai d_{free}^2 sebesar $6E_s$.



Gambar 4. Diagram trellis untuk TCM 1/2

Untuk menentukan nilai coding gain yang dapat diberikan oleh TCM dapat ditentukan berdasarkan pers (1). $d_{free}^2/coded$ merupakan nilai d_{free}^2 TCM dan $d_{min}^2/uncoded$ merupakan nilai minimum dari konstelasi uncoded, dimana untuk TCM 1/2 dibandingkan terhadap kuadrat jarak minimum dari konstelasi BPSK.

$$\gamma = \frac{d_{free}^2/coded}{d_{min}^2/uncoded} \frac{E_s/coded}{E_s/uncoded} \tag{1}$$

Berdasarkan pers (1) maka untuk 4 state TCM 1/2 diperoleh coding gain 1.76 dB, artinya sistem TCM dapat memberikan perbaikan kinerja 1.76 dB lebih baik dibandingkan dengan modulasi tanpa pengkodean pada kanal AWGN.

Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan generator polinomial yang diusulkan Knud J.Larsen [9] untuk TCM 1/2 dan oleh Ungerboeck [8] untuk generator pada TCM 2/3.

Tabel.1 Generator dan d_{free}^2 untuk TCM 1/2 [7]

V	Generator Polinomial	d_{free}^2	Coding Gain
2	$G(D) = \begin{bmatrix} D^2 + 1 \\ D^2 + D + 1 \end{bmatrix}$	6	1.76 dB
3	$G(D) = \begin{bmatrix} D^3 + D + 1 \\ D^3 + D^2 + D + 1 \end{bmatrix}$	8	3 dB
4	$G(D) = \begin{bmatrix} D^4 + D + 1 \\ D^4 + D^3 + D^2 + 1 \end{bmatrix}$	12	4.77 dB
5	$G(D) = \begin{bmatrix} D^5 + D^3 + D^2 + D + 1 \\ D^5 + D^4 + D^3 + D^2 + 1 \end{bmatrix}$	14	5.44 dB

Tabel.2 Generator dan d_{free}^2 untuk TCM 2/3 [8]

v	Generator Polinomial	d_{free}^2	Coding Gain
2	$G(D) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & D^2 + 1 & D \end{bmatrix}$	4	3 dB
3	$G(D) = \begin{bmatrix} D & 1 & 0 \\ 1 & D^2 & D \end{bmatrix}$	4.58	3.6 dB
4	$G(D) = \begin{bmatrix} D^2 + D & 1 & 0 \\ 1 & D^2 & D \end{bmatrix}$	5.17	4.1 dB

3. Konstelasi Antena

Pada SM informasi antena pengirim sangat penting karena posisi antena mengandung nilai bit informasi. Pada TCM-SM konstelasi antena dipilih berdasarkan indexes yang telah ditetapkan pada awal perancangan. Misalkan untuk MIMO dengan jumlah antena pengirim 4 dimappingkan seperti pada Tabel 3.

Tabel 3 Indexes Antenna

$p_1 = [a_1 \ a_2]$	Antena	Index
[0 0]	1	[1 0 0 0]
[0 1]	2	[0 1 0 0]
[1 0]	3	[0 0 1 0]
[1 1]	4	[0 0 0 1]

4. SM Mapper dan SM Demapper

SM mapper berfungsi untuk memasang antara konstelasi antena yang telah ditentukan untuk mengirimkan sinyal dengan konstelasi sinyal yang akan dikirimkan. Sedangkan SM demapper berfungsi kebalikan, dimana SM demapper memisahkan hasil deteksi detector ML yang berupa prediksi informasi antena pengirim dan prediksi informasi sinyal yang dikirimkan.

5. Detektor MIMO

Untuk deteksi digunakan detector MIMO maximum likelihood [5].

$$[j_{ML}, \hat{q}_{ML}] = \underset{j,q}{\operatorname{argmax}} pY(y|x_j, H) = \underset{j,q}{\operatorname{argmin}} \sqrt{\rho} \|g_{jq}\|_F^2 - 2 \operatorname{Re}\{y^H g_{jq}\} \tag{2}$$

Dimana j menunjukkan antena pengirim, q adalah sinyal yang dikirimkan dan H adalah kanal wireless MIMO sehingga $g_{jq} = h_j x_q$, $1 \leq j \leq N_t$, $1 \leq q \leq M$ dan $pY(y|x_{jq}, H) = \pi^{-N_r} \exp(-\|y - \sqrt{\rho} H x_{jq}\|_F^2)$ merupakan PDF dari y pada kondisi x_{jq} dan H .

6. Kanal Propagasi Wireless MIMO

a. Kanal Flat Fading

Kanal Rayleigh menggambarkan penerimaan sinyal yang berfluktuasi akibat diterimanya beberapa sinyal dengan selubung atau fasa yang berbeda. Bila jalur-jalur sinyal yang diterima begitu banyak, maka dapat digunakan teorema limit sentral di mana sinyal yang diterima bisa dimodelkan sebagai proses acak Gaussian.

Jika dianggap proses acak Gaussian dengan mean nol, maka selubung sinyal yang diterima pada waktu tertentu akan terdistribusi secara Rayleigh. Pemodelan kanal ini disebut kanal Rayleigh. Pada [11] kanal Rayleigh dengan delay sama dengan nol disebut juga dengan kanal flat fading.

$$H(t) = \alpha_I(t) + \alpha_Q(t) \tag{3}$$

dimana :

$$\alpha_I(t) = \sum_i \alpha_i(t) \cos \theta_i(t)$$

$$\alpha_Q(t) = \sum_i \alpha_i(t) \sin \theta_i(t)$$

dimana :

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c \tau_i(t)$$

Dimana $H(t)$ merupakan matrik kanal wireless, τ merupakan waktu delay dan α_i merupakan factor redaman. Untuk perhitungan secara statistical maka $\alpha_I(t)$ dan $\alpha_Q(t)$ diasumsikan terdistribusi random independent dan *identically distributed* (iid) [10].

b. Kanal Fading Rician

Rician fading termasuk ke dalam *small scale fading*. *Small scale fading* disebabkan oleh daya yang sampai ke penerima terdiri dari beberapa gelombang pantul yang masing-masing memiliki amplitud dan fasa yang saling independent. Distribusi Rician terjadi jika terdapat komponen sinyal dominant dalam pengiriman informasi, dengan kata lain, antara pengirim dan penerima terdapat sinyal *line of sight* (LOS).

$$H_{Rician} = \sqrt{\frac{K}{1+K}} \bar{H} + \sqrt{\frac{K}{1+K}} H \tag{4}$$

Dimana \bar{H} merupakan komponen LOS, H komponen fading dan K adalah faktor Rician yang merupakan perbandingan energy komponen LOS terhadap energi komponen multipath.

7. Soft Decision Viterbi

Viterbi decoding algorithm ditemukan dan dianalisis oleh Viterbi. Proses dekoding dilakukan dengan menghitung jarak *metric hamming* (*hamming distance*) untuk *hard decision decoding*, dan dapat berupa *metric euclidean* (*euclidean distance*) untuk *decoding* secara *soft decision*.

Dekoder *viterbi* bekerja berdasarkan prinsip *maximum likelihood decoding* dan pengetahuan akan diagram *trellis* enkoder di pengirim. Proses deteksi disusun dari tiga sub sistem yaitu *transition metric unit* (TMU), *add compare*

and select unit (ACSU) dan *survivor memory unit* (SMU). Pada TMU setiap simbol yang diterima dilakukan proses penghitungan nilai *branch metric*. Pada tahap ACSU setiap state pada setiap t melalui melewati *forward pass* dan akan melakukan proses: *Add* menghitung nilai *metric* untuk setiap percabangan dengan menjumlahkan nilai *metric* disetiap percabangan dengan nilai *metric* darimana path tersebut berasal; *Compare* : Menandai nilai *metric* percabangan yang terkecil untuk setiap nilai t ; *Select* : menyimpan nilai *metric* terkecil sebagai *survivor*. SMU akan menyimpan nilai *survivor* yang dihasilkan oleh ACSU untuk digunakan pada saat rekonstruksi bit informasi hasil proses dekoding.

III. PROBABILITAS KESALAHAN TCM-SM

3.1 Probabilitas Kesalahan pada TCM

Untuk kesalahan pendeteksian sinyal dapat didasarkan pada propabilitas kesalahan bit untuk transmisi TCM. Pers (5) merupakan probabilitas kesalahan untuk transmisi TCM pada kanal AWGN dan pers (6) merupakan *tighter bound* untuk probabilitas kesalahan bit TCM yang diturunkan dari Bhattacharyya bound [9]

$$P_b \leq \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial T(D, I)}{\partial I} \Big|_{I=1, D=e^{-\frac{1}{4N_0}}} \tag{5}$$

$$P_b \leq \frac{1}{2m} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{d_{free}^2}{4N_0}} \right) \cdot e^{\frac{d_{free}^2}{4N_0}} \cdot \frac{\partial T(D, I)}{\partial I} \Big|_{I=1, D=e^{-\frac{1}{4N_0}}} \tag{6}$$

$T(D, I)$ merupakan fungsi transfer dari generator convolutional yang digunakan dan m menunjukkan jumlah bit input pada TCM. Untuk menentukan fungsi transfer maka terlebih dulu ditentukan nilai *error weight profile* berdasarkan pers (7).

$$\mathcal{F}(e_i, D) = \frac{1}{2^m} \sum_{c_i=c_i^{(k)}} D^{d_E^2[\mathcal{M}(c_i), \mathcal{M}(c_i \oplus e_i)]} \tag{7}$$

$d_E^2[\mathcal{M}(c_i), \mathcal{M}(c_i \oplus e_i)]$ merupakan jarak yang didapatkan dengan mapping *one by one* yang berdasarkan pada *set partitioning* sesuai dengan *mapping* yang digunakan. Untuk transmisi pada kanal fading maka nilai *error weight profile* disesuaikan sesuai dengan kanal fading yang digunakan. Pers (8) adalah *error weight profile* untuk kanal Rayleigh. Jika kanal diketahui dengan sempurna di penerima maka digunakan yang *channel state information* (CSI) dan jika informasi kanal tidak diketahui maka dipilih non CSI.

$$f(\delta_i^2) = \begin{cases} \frac{1}{1+\delta_i^2/4N_0} & , \text{CSI} \\ e^{-\frac{\delta_i^2}{4N_0}} \left[1 - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc} \left(\frac{\delta_i^2}{2N_0} \right) e^{\frac{\delta_i^2}{2N_0}} \cdot \frac{\delta_i^2}{2N_0} \right] & , \text{non CSI} \end{cases} \tag{8}$$

Jika kanal yang digunakan adalah kanal Rician maka nilai *error weight profile* adalah

$$f(\delta_i^2) = \frac{1+K}{1+K+\delta_i^2/4N_0} \exp \left(-\frac{K \delta_i^2/4N_0}{1+K+\delta_i^2/4N_0} \right) \quad , \text{CSI}$$

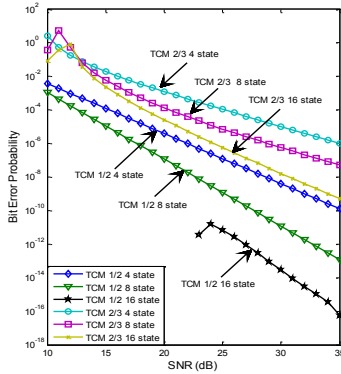
$$f(\delta_i^2) = \frac{e^{-K+\delta_i^2/4N_0}}{\pi} \int_0^\pi (1 - \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(v) e^{-v^2}) d\theta \quad , \text{non CSI} \tag{9}$$

Dimana K merupakan factor Rician dan nilai

$$v = \frac{\lambda \delta_t^2 / 4N_0}{\sqrt{1+K}} - \sqrt{K} \cos \theta \quad (10)$$

Untuk kanal fading probabilitas kesalahan bit TCM dapat ditentukan dengan [9]:

$$\frac{P_{e,TCM}}{1 - \frac{\partial T(D,I)}{\partial I}} \leq \quad (11)$$



Gambar 5. Kinerja TCM pada kanal Rayleigh

3.2 Probabilitas Kesalahan pada TCM -SM

Seperti pada SM [6], detektor MIMO yang digunakan pada TCM-SM adalah deteksi dengan menggunakan Maximum Likelihood sesuai dengan pers (2). Dengan menggunakan *union bound* diturunkan persamaan probabilitas kesalahan bit untuk TCM-SM pada kanal flat fading [5]:

$$P_{e,bit} \leq \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{q=1}^M \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{\hat{q}=1}^M \frac{N(q, \hat{q}) P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}})}{N_t M} \quad (12)$$

$$\leq \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} \frac{1}{N_t} \sum_{q=1}^M \sum_{\hat{q}=1}^M \frac{N(q, \hat{q})}{M} P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}}) \quad (13)$$

Dimana $N(q, \hat{q})$ merupakan jumlah bit yang salah antara symbol x_q dan $x_{\hat{q}}$ dan $P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}})$ menunjukkan *pairwise error probability* (PEP) untuk konstelasi vector $x_{j\hat{q}}$ yang diterima pada saat x_{jq} yang dikirim.

Pers (13) menunjukkan probabilitas kesalahan bit dipengaruhi oleh jumlah antena pengirim, orde modulasi yang digunakan dan *pairwise* kesalahan untuk konstelasi jq . Probabilitas kesalahan pada TCM seperti pada pers (11) sudah mengandung nilai kesalahan pada kanal fading yang digunakan, sehingga:

$$\sum_{q=1}^M \sum_{\hat{q}=1}^M \frac{N(q, \hat{q})}{M} \approx \frac{1}{M} \frac{P_{e-TCM}}{\mu_\alpha} \quad (14)$$

Dengan mensubstitusikan pers (14) terhadap pers (13) maka probabilitas kesalahan

$$P_{e,TCM-SM} \leq \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} \frac{1}{N_t} \cdot \frac{1}{M} \frac{P_{e-TCM}}{\mu_\alpha} \cdot P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}})$$

$$\leq \frac{1}{\mu_\alpha M} N_t P_{e-TCM} P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}}) \quad (15)$$

Pairwise error probability dihitung dengan :

$$P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}}|H) = P(d_{jq} > d_{j\hat{q}}|H) = Q(\kappa) \quad (16)$$

Dimana $d_{jq} = (\sqrt{\rho} \|g_{jq}\|_F^2 - 2Re\{y^H g_{jq}\})$ dan

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ dan}$$

$$\kappa \triangleq \frac{\rho}{2} \|g_{jq} - g_{j\hat{q}}\|_F^2 = \sum_{n=1}^{N_r} |A(n) + B(n)|^2 \quad (17)$$

Dimana $i = \sqrt{-1}$ dan

$$A(n) = \sqrt{\frac{\rho}{2}} (h_{n_j}^R x_q^R - h_{n_j}^I x_q^I - h_{n_j}^R x_{\hat{q}}^R + h_{n_j}^I x_{\hat{q}}^I)$$

$$B(n) = \sqrt{\frac{\rho}{2}} (h_{n_j}^R x_q^I + h_{n_j}^I x_q^R - h_{n_j}^R x_{\hat{q}}^I - h_{n_j}^I x_{\hat{q}}^R) \quad (18)$$

Sehingga untuk PEP didapatkan :

$$P(x_{jq} \rightarrow x_{j\hat{q}}) = \mu_\alpha^{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \binom{N_r-1+k}{k} [1 - \mu_\alpha]^k \quad (19)$$

Dimana :

$$\mu_\alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_a^2}{1 + \sigma_a^2}} \right) \quad (20)$$

Sehingga probabilitas kesalahan TCM-SM dapat dihitung dengan mensubstitusikan pers (2) pada (19) dan mensubstitusikannya pada pers (15).

IV. HASIL SIMULASI

3.1 Parameter Simulasi

Kinerja TCM-SM dilihat dengan membandingkan terhadap kinerja SM dan TCSM [6]. Jumlah bit yang ditransmisikan adalah 3, 4 dan 5 dengan mapping bit untuk setiap sistem sesuai dengan Tabel.4. Untuk permodelan kanal Rician dimodelkan berdasarkan [20]. Faktor K pada kanal Rician digunakan adalah 3 dB sesuai dengan nilai K yang diusulkan untuk lingkungan indoor [22]. Index antena untuk MIMO 4x4 berdasarkan tabel 3.

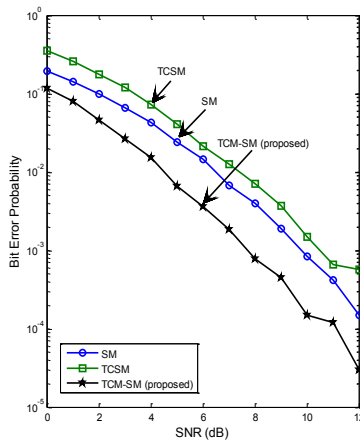
Sistem	3 bit		4 bit		5 bit	
	An-tena	Sinyal	An-tena	Sinyal	An-tena	Sinyal
TCM-SM	2 bit	1 bit (TCM 1/2)	2 bit	2 bit (TCM 2/3)	3 bit	2 bit (TCM 2/3)
TCSM	1 bit (TCM 1/2)	2 bit QPS K	1 bit (TCM 1/2)	3 bit 8PS K	2 bit (TCM 2/3)	3 bit 8PS K
SM	2 bit	1 bit BPS K	2 bit	2 bit QPS K	3 bit	2 bit QPS K

3.2 Hasil dan Analisa

Gambar 6 merupakan perbandingan kinerja TCM-SM terhadap SM dan TCSM pada kanal flat fading. TCM-SM dapat memberikan perbaikan kinerja 2 dB terhadap SM

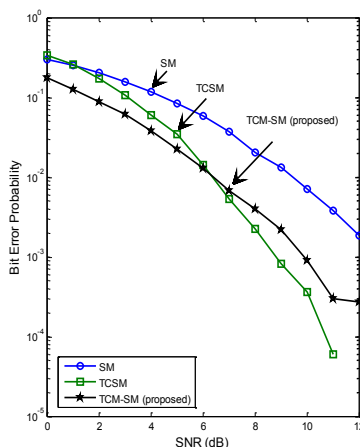
dan 2.5 dB terhadap TCSM untuk pentransmisi 3 bit perwaktu transmisi untuk probabilitas kesalahan bit SM 10^{-3} .

Gambar 7 merupakan perbandingan kinerja SM, TCSM dan TCM-SM pada kanal Rician. Untuk SNR kecil (< 6 dB) kinerja TCM-SM lebih baik dibandingkan TCSM maupun SM, namun untuk SNR lebih besar (> 6 dB) TCSM dapat menunjukkan perbaikan kinerja. TCSM memberikan perbaikan kinerja 1 dB terhadap TCM-SM dan sekitar 3 dB terhadap SM untuk probabilitas kesalahan bit SM 10^{-3} .



Gambar 6. Perbandingan kinerja untuk 3 bit pada kanal flat fading Rayleigh

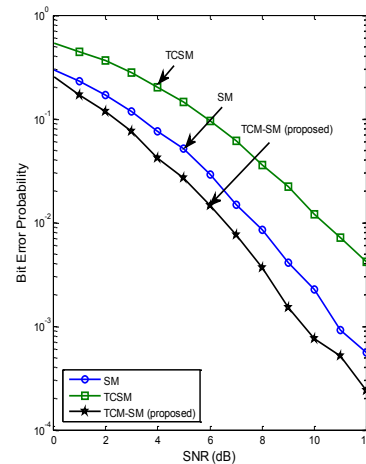
Secara umum kinerja SM pada kanal Rician (*strong correlated channel*) akan mengalami penurunan dibandingkan pada kanal flat fading Rayleigh [6]. Untuk mengatasinya diperkenalkan TCSM dengan menggunakan TCM untuk konstelasi antenna sehingga sistem SM lebih compatible di kanal Rician. Dengan membandingkan Gambar 6 dan Gambar 7, dapat dilihat bahwa SM pada kanal Rician mengalami penurunan kinerja dan TCSM sebaliknya di kanal Rician mengalami perbaikan kinerja.



Gambar 7. Perbandingan kinerja untuk 3 bit pada kanal fading Rician

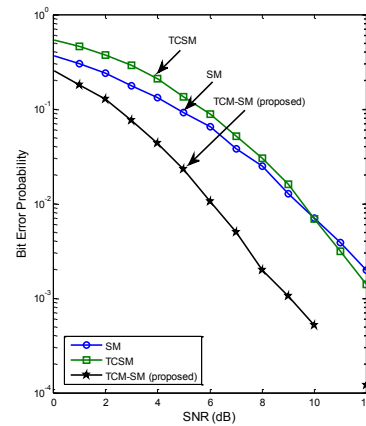
Gambar 8 menunjukkan perbandingan kinerja terhadap TCSM dan SM pada kanal flat fading Rayleigh. TCM-SM dapat memberikan perbaikan kinerja 1.5 dB terhadap SM dan lebih besar dari 3 dB terhadap TCSM untuk

pentransmisi 4 bit perwaktu transmisi untuk probabilitas kesalahan bit SM 10^{-3} .

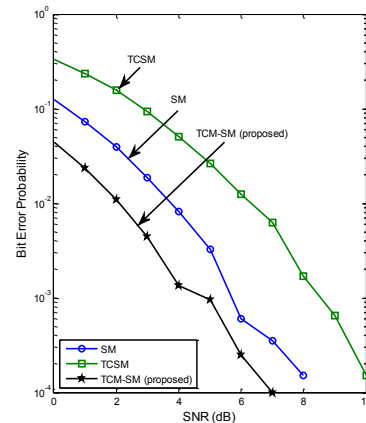


Gambar 8. Perbandingan kinerja untuk 4 bit pada kanal flat fading Rayleigh

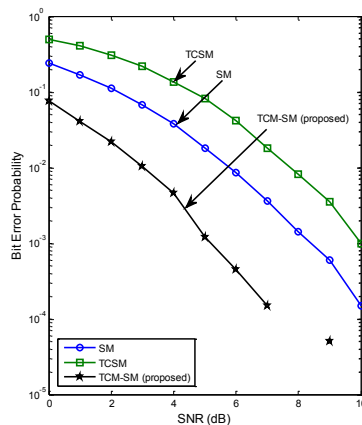
Gambar 9 menunjukkan perbandingan kinerja TCM-SM terhadap TCSM dan SM pada kanal Rician. Untuk transmisi 4 bit pada kanal Rician TCM-SM dapat memperbaiki kinerja SM dengan memberikan perbaikan kinerja lebih besar dari 3 dB terhadap SM dan dan 3 dB terhadap TCSM untuk probabilitas kesalahan bit SM 10^{-3} pada kanal Rician.



Gambar 9. Perbandingan kinerja untuk 4 bit pada kanal fading Rician



Gambar 10. Perbandingan kinerja untuk 5 bit pada kanal flat fading Rayleigh



Gambar 11. Perbandingan kinerja untuk 5 bit pada kanal fading Rician

Gambar dan Gambar 10 merupakan perbandingan kinerja TCM-SM pada kanal flat fading Rayleigh dan kanal fading Rician dengan jumlah bit yang ditransmisikan adalah 5 bit tiap waktu transmisi. Dari Gambar 6 – 11 TCM-SM menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan TCSM dan SM baik pada kanal flat fading Rayleigh maupun kanal fading Rician.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan perancangan, simulasi, dan analisa TCM-SM untuk MIMO pada kanal flat fading Rayleigh dan kanal fading Rician,

1. Simulasi dilakukan berdasarkan perancangan dan disimulasikan dengan
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja TCM-SM pada kanal flat fading Rayleigh maupun pada kanal fading Rician memberikan memiliki kinerja yang lebih baik terhadap SM maupun TCSM[6]. Untuk transmisi 4 bit perwaktu transmisi pada kanal flat fading, TCM-SM dapat memberikan perbaikan kinerja 1.5 dB terhadap SM dan lebih besar dari 3 dB terhadap TCSM pada probabilitas kesalahan bit 10^{-3} dan untuk kanal Rician TCM-SM dapat memperbaiki kinerja SM dengan memberikan perbaikan kinerja lebih besar dari 3 dB terhadap SM dan dan 3 dB terhadap TCSM untuk probabilitas kesalahan bit 10^{-3} .
3. Untuk pentransmisi dengan jumlah bit yang sama maka kinerja TCM-SM akan lebih baik untuk orde modulasi sinyal yang lebih kecil. Demikian juga dengan pentransmisi sinyal pada konstelasi antena yang sama, maka kinerja lebih baik dicapai untuk orde modulasi yang lebih kecil.
4. Jika SM mengalami penurunan kinerja pada *correlated channel* seperti pada kanal Rician dan diatasi dengan TCSM sehingga di kanal Rician SM memiliki kinerja lebih baik, maka TCM-SM dengan menggunakan konstelasi sinyal *coded* dapat

memberikan solusi SM untuk kanal flat fading Rayleigh maupun kanal fading Rician.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Siavash M. Alamouti, Vahid Tarokh dan Patrick Poon, “Trellis Coded Modulation and Transmit Diversity : Design Criteria and Performance Evaluation”, IEEE, 1998.
- [2] André Neubauer, Jürgen Freudenberger, dan Volker Kühn, “Coding Theory”, John Wiley&Sons,LTd, 2007
- [3] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation—a new low complexity spectral efficiency enhancing technique,” in *Proc. Conf. Comm. and Networking in China*, Oct. 2006.
- [4] R. Mesleh, H. Haas, Sinan Sinanovic, and Chang Wook Ahn, “Spatial Modulation”,IEEE Trans Vehicular Tech, vol. 57, No. 4, July 2008.
- [5] Jeyadeepan Jeganathan, Ali Ghayeb, dan Leszek Szczecinski, “ Spatial Modulation : Optimal Detection and Performance Analysis”, IEEE Comm., vol. 12, no 8, August 2008.
- [6] R. Mesleh, Marco Di Renzo, Harald Haas and Peter M. Grant, “Trellis Coded Spatial Modulation”, IEEE Trans Wireless Com, Vol. 9, No. 7, July 2010.
- [7] Abdelhamid Younis, Marco Di Renzo, R.Mesleh, dan Harald Haas, “Sphere Decoding for Spatial Modulation”, IEEE,2011
- [8] Gottfried Ungerboeck, “Channel Coding with Multilevel/Phase Signals”, IEEE Transaction on Information Theory, Januari 1982.
- [9] Knud J. Larsen, “Short Convolutional Codes With Maximal Free Distance for rates 1/2, 1/3, and 1/4”, IEEE Trans on Inf Theory, May 1973 .
- [10] S. H. Jamali, T. Le-Ngoc, “Coded-Modulation Technique for Fading Channels”, Boston, U. S. A., Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [11] Gunawan Wibisono, “Studies on Performance of Trellis Coded MPSK Modulations on Fading Channels”, Dissertation, Keio University, Japan, 1998.
- [12] Marco Di Renzo, Harald Haas, Peter M. Grant, “Spatial Modulation for Multiple-Antenna Wireless Systems”, IEEE Communications Magazine, December 2011.
- [13] Jacob Sharony, “Introduction to Wireless MIMO – Theory and Applications”, IEEE LI, November, 2006.
- [14] Gunawan Wibisono, dan Lydia Sari, “Teknik pengkodean Sistem komunikasi Dijital”, Rekayasa Sains Bandung, 2011.
- [15] Dariush Divsalar, Marvin K. Simon, dan Joseph H. Yuen, “Trellis Coding with Asymmetric

- Modulation”, IEEE Trans on Communication Vol. 35 No. 2, Februari 1987.
- [16] Abdelhamid Younis, R. Mesleh, Harald Haas, and Petere M. Grant, “Reduced Complexity Sphere Decoder for Spatial Modulation Detection Receivers”, IEEE, 2010.
- [17] KarenSu, “Efficient Maximum Likelihood Detection for Communication Over Multiple Input Multiple Output Channels”, Cambridge University Engineering Department, 2005.
- [18] Rodger E.Ziemer, Roger L.Peterson, “Introduction Digital Communication”, Prentice Hall International, 2001.
- [19] Proakis, “Digital Communication”, McGraw-Hill Inc, 1995.
- [20] Chengshan Xiao, Yahong R. Zheng, Norman C. Beaulieu, “Statistical Simulation Models for Rayleigh and Rician Fading”, IEEE, 2003.
- [21] Mohamed-Slim Alouini, Andrea J. Goldsmith, “ A Unified Approach for Calculating Error Rates of Linearly Modulated Signals over Generalized Fading Channels”, IEEE Trans vol. 47, no. 9, September 1999.
- [22] M. Carroll and T. Wysocki, “Fading characteristics for indoor wireless channels at 5GHz unlicensed bands,” in *Proc. IEEE Joint First Workshop on Mobile Future and Symposium on Trends in Communications (SympoTIC'03)*, Bratislava, Slovakia, Oct. 2003,