

Pemodelan *Single-Input Single-Output* (SISO) Berbasis OFDM-Cooperative

Sirmayanti Sirmayanti¹⁾, Nuraeni Umar²⁾, Lidemar Halide³⁾, Sulaeman⁴⁾

Abstrak : Komunikasi *Single-Input Single-Output* (SISO) pada dasarnya terdiri atas penggunaan pemancar (Tx) dan penerima (Rx) masing-masing untuk satu buah sistem penyambungan. *Cooperative wireless* merupakan konsep konektivitas eksis yang terjangkau signal oleh setiap perangkat Tx-Rx lain yang memiliki fungsi sama. Untuk mengandalkan pengoperasian sistem *multicarrier* maka digunakan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) agar bandwidth yang tersedia setelah spektrum dibagi menjadi sub band menjadi lebih hemat. Tulisan ini hanya mencakup hasil studi literatur yang bertujuan dalam membangun pemodelan SISO Tx-Rx berbasis OFDM-cooperative yang akan lebih mengoptimalkan fungsi perangkat Tx-Rx sebagai sebuah terminal relay, dimana Tx-Rx akan bekerjasama sebagai relay terhadap sistem lainnya.

Kata Kunci : Cooperative, Wireless, dual-hop, multi-carrier, OFDM, Komunikasi, SISO, Tx-Rx relay.

Pendahuluan

Dalam hal meningkatkan efisiensi pemakaian frekuensi maka tentu seiring dengan keadaan sistem infratruster memadai yang tersedia. Sistem teknologi ini nantinya berdampak pada efisiensi dan kapasitas yang dihasilkan. Sebuah sistem yang disebut *cooperative relay wireless* akan diperkenalkan sebagai bentuk alternatif perancangan penyediaan infrastruktur repeater yang saat ini sangat mahal pengadaannya. Setiap perngakat Tx dan Rx dapat difungsikan sebagai *relay* dan bahkan *repeater* tanpa mengganggu sistem komunikasi lain yang berlangsung pada kedua terminal ini. Permulaan konsep ini dikenal dengan transmisi *dual-hop* dimana signal dipropagasikan dari *transmitter* menuju ke *relay* dahulu sebelum sampai ke *receiver*, Pabst (2004).

Pemenuhan *high demand data rate* yang lebih besar tentu saja akan membutuhkan lebar pita (bandwidth) yang lebih besar. Dalam transmisi

single carrier misalnya bandwidth minimum yang dibutuhkan adalah sama dengan $R_s/2$ (Hz), dimana R_s adalah *symbol rate*. Ketika bandwidth sinyal menjadi lebih besar dibandingkan dengan bandwidth koheren pada kanal wireless, maka sinyal tersebut mengalami *multi-path fading* sehingga mengakibatkan terjadinya *Inter-Symbol Interference* (ISI). Sistem *adaptive equalizer* telah dikembangkan untuk mengatasi ISI akibat kanal *multi-path fading* tersebut, Cho (2010), namun karena semakin meningkatnya *data rate* maka semakin kompleks pula *equalizer* yang akan didesain sehingga akan sangat sulit untuk diimplementasikan, Sirmayanti (2010).

Untuk mengatasi masalah tersebut, maka salah satu solusi yang tepat untuk pemenuhan *data rate* yang tinggi digunakanlah transmisi multi-carrier, dimana total bandwidth yang tersedia dalam spektrum dibagi menjadi subband-subband berbentuk paralel sehingga bandwidth untuk masing-

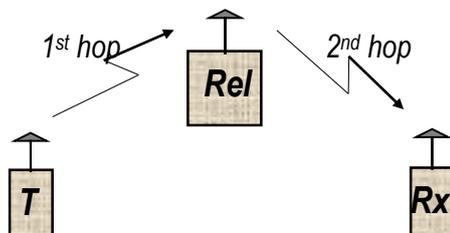
^{1),2),3)} adalah dosen Program Studi Teknik Telekomunikasi dan ⁴⁾ Teknik Elektronika Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang, Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10, Tamalanrea Makassar 90245

masing subband relative lebih kecil jika dibandingkan dengan bandwidth koheren. Sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) memungkinkan carrier-carrier tersebut memiliki jarak yang sempit bahkan hingga saling *overlapped* sehingga lebih menghemat bandwidth jika dibandingkan dengan multicarrier yang lain seperti *Frequency Division Multiplexing* (FDM).

Pada tulisan ini, proses implementasi dan evaluasi kinerja OFDM menggunakan komunikasi SISO (*Single-Input Single-Output*) akan dibahas. Metode inilah kemudian diterapkan pada sistem *cooperative relay wireless* dimana pada setiap unit Tx, Relay dan Rx didalamnya telah memiliki kinerja sistem OFDM.

Cooperative Relay

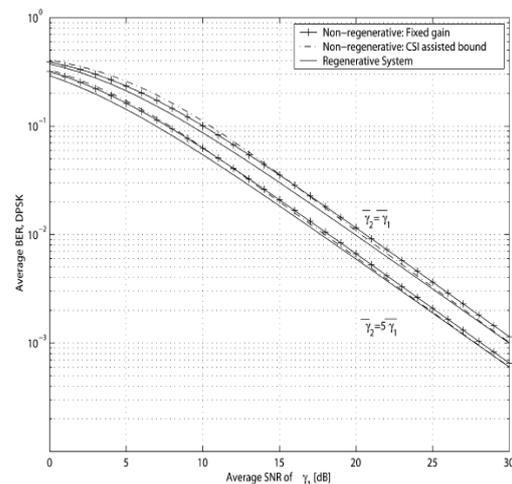
Konsep dasar sistem komunikasi *cooperative relay* berdasarkan pada sistem kerjasama bersama pentransmisian antara terminal pengirim dan terminal penerima melalui terminal relay, Sirmayanti (2009). Signal informasi terkirim dari Tx menuju terminal relay dahulu sebelum tiba pada Rx. Gambar 1 berikut menunjukkan sistem *cooperative relay* Tx-Rx dual-hop.



Gambar 1. Konsep dasar sistem komunikasi co-operative relay wireless dengan transmisi dual-hop.

Pada Gambar 1, konfigurasi network tiga-node terdiri atas Tx (terminal

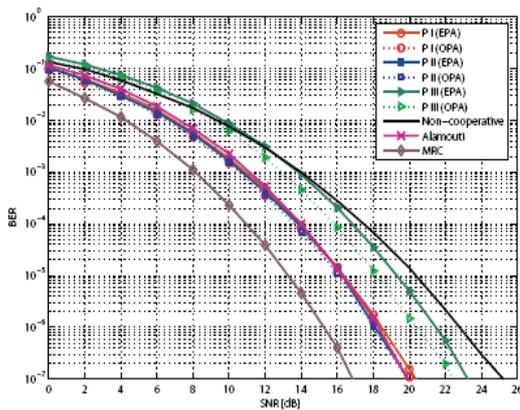
pengirim), R (terminal relay) dan Rx (terminal penerima). Link Tx - D disebut sebagai *link direct* dan link Tx - R disebut sebagai *link relay*. Jika terminal pengirim tidak memiliki hubungan langsung terhadap terminal penerima dikarenakan oleh jarak jangkauan yang luas ataupun banyak *fading*, maka signal informasi dari perngirim tidak dapat langsung dikirimkan ke penerima. Oleh karena itu, terminal pengirim dapat meneruskan informasi data tersebut melalui beberapa media terminal penghubung. Peranan relay disini sangatlah penting sebagai terminal penunjang pada sistem network tersebut. Sehingga terminal pengirim dapat mengirim signal informasi baik menuju ke relay maupun ke penerima langsung.



Gambar 2. Average BER terhadap variasi metode relay oleh Hasna (2002).

Hasna (2002) melaksanakan penelitian tentang transmisi dual-hop melalui *fixed-gain relay*. Gambar 2 menunjukkan bahwa *fixed-gain* relay mempengaruhi besaran *average power fading* yang dibutuhkan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa saat *amplitude fading* ditingkatkan menjadi

5 kali dari *amplitude fading* awalnya, karakteristik *average BER* semakin baik. Dengan *fixed-gain, non-regenerative relay (amplify-and-Forward, AF)* memiliki performasi *average bit error rate (average BER)* yang lebih baik dari kompleksitasnya yang banyak sehingga dapat meminimalkan loss dalam sistem tersebut.



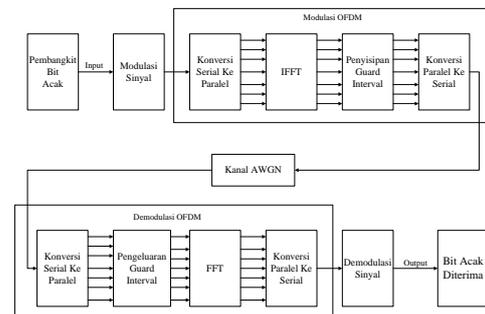
Gambar 3. Perbandingan performasi bagi Protokol I, II, dan III oleh Majid (2008).

Selanjutnya, Majid (2008) melakukan penelitian mengenai *cooperative diversity* melalui *log-normal fading channel*. Penelitian berfokus pada performasi *channel model* pada lingkungan *indoor wireless* yang menggunakan *single-relay cooperative relay* yakni AF namun dikembangkan kedalam *cooperation protocol time division multiple access (TDMA)*. Hasil yang dicapai, terlihat pada Gambar 3, menunjukkan bahwa implementasi MIMO dan SIMO melalui *single relay* lebih dapat menyediakan performasi yang cocok bagi *maximum-ratation combining (MRC)* pada sistem diversity dengan memasang dua antena pada relay sehingga sifat multi-function

terminal user dapat digunakan dengan tepat.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Prinsip kerja dasar OFDM seperti terlihat pada Gambar 4. Pada sisi pemancar, setiap input data diumpangkan ke modulator untuk dimodulasi, modulasi ini dapat berupa *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*, *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*, *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*, dan lain lain. Sinyal yang telah termodulasi tersebut dibagi secara paralel pada sejumlah carrier (subcarrier) yang memiliki pita dengan saluran yang sempit, kemudian data tersebut ditambahkan *cyclic prefix (CP)* dan diaplikasikan ke dalam *spectral density* melalui *inverse fast Fourier transform (IFFT)*. Setelah itu data dilewatkan melalui konverter paralel ke serial, selanjutnya data siap untuk ditransmisikan melalui kanal.



Gambar 4. Sistem OFDM sederhana.

Pada sisi penerima OFDM, data yang diterima dilewatkan melalui konverter serial ke paralel, dan selanjutnya dilewatkan pada proses *fast Fourier transform (FFT)*, kemudian melepas bagian CP pada data dan selanjutnya dilewatkan data dikembalikan dalam bentuk serial lalu diumpangkan ke demodulator.

Setiap input data pada sisi pemancar OFDM dapat berupa sinyal acak dalam bit. Dengan kata lain, pembangkitan data informasi dilakukan secara random atau acak. Data yang dibangkitkan nilainya sesuai dengan level modulasi yang digunakan. Konsep data serial yang berupa bit-bit tersebut kemudian diubah ke dalam ukuran simbol yang dibutuhkan dalam transmisi, sebagai contoh 2 bit per simbol untuk QPSK, sebelum akhirnya masuk ke dalam blok serial ke paralel. Blok serial ke paralel berfungsi untuk mengubah aliran data yang terdiri dari satu baris menjadi beberapa baris dan beberapa kolom. Hasil dari konversi serial ke paralel berupa matriks bit-bit dengan jumlah baris menyatakan jumlah *subcarrier* yang akan digunakan dan jumlah kolom menyatakan jumlah simbol data yang dikirimkan pada tiap *subcarrier*. Pembangkitan IFFT tergantung pada besarnya nilai frekuensi carrier yang dikirimkan, amplitude dan phase dari frekuensi tersebut dinyatakan dengan tanggapan nilai x dan y , kemudian ditempatkan pada N -point IFFT. Panjang CP yang digunakan adalah hasil penjumlahan dari banyaknya titik IFFT dan *guardtime* yang kemudian ditempatkan di belakang simbol. Tujuan penyisipan CP ini adalah mencegah ISI dan *inter carrier interference* (ICI) pada sistem OFDM. Sebelum memasuki kanal transmisi, simbol OFDM dalam bentuk stream paralel dikonversi ke bentuk stream serial sinyal baseband OFDM.

Pemodelan Komunikasi SISO Berbasis OFDM-Cooperative

Sistem relay yang digunakan untuk analisis performansi pada *cooperative relay wireless* terdiri atas *Amplify-and-Forward* (AF) dan *Decode-and-*

Forward (DF), Laneman (2004). Secara sederhana perbedaan kedua konsep ini dapat dilihat pada Sirmayanti (2009). Dalam AF, masing-masing node secara cooperative menerima noise dari hasil penerimaan signal. Kemudian, node ini akan menguatkan dan mengirimkan kembali versi signal tersebut. Sedangkan pada DF, Penguatan tidak dibutuhkan dalam node relay ini. Node cooperative relay terlebih dahulu mengkode ulang signal yang diterima dari terminal pengirim kemudian meneruskannya kembali ke terminal penerima.

Skema *cooperative relay wireless* melalui analisis performansi pada *cooperative* AF dan DF telah dilaksanakan oleh Sirmayanti (2009). Dengan memilih *fixed-gain* G pada terminal relay terjadi penguatan penerimaan signal pada Rx . *Mixed multipath fading channel* terjadi jika selama propagasi signal terdapat area *line of sight* (LOS) dan non-LOS (NLOS) baik antara Tx – Relay dan Relay – Rx dengan asumsi bahwa *Rician fading* terjadi pada hop pertama dan *Rayleigh fading* terjadi pada hop kedua, dan sebaliknya,

Lebih lanjut lagi, studi dan analisis pemodelan *end-to-end* SNR pada relay *dual-hop* dengan *instantaneous end-to-end* SNR, apakah berupa *CSI-assisted relay* atau *fixed-gain relay* yang cocok pada metode transmisi *dual-hop* telah dilakukan oleh Sirmayanti (2015). Hasil menunjukkan bahwa pengaruh propagasi *multipath* dengan pertimbangan persyaratan LOS dapat mengurangi *error probability* propagasi.

Dalam menerapkan bandwidth besar sesuai dengan standar sistem transmisi yang ada maka input bit data serial *single frequency* perlu untuk

dilaksanakan modulasi yang tepat. Teknik OFDM mampu mentransmisikan dengan multi-carrier menggunakan *discrete Fourier transform* (DFT). Dengan demikian masing-masing terminal Tx dan Rx memerlukan kerjasama input yang baik melalui teknik OFDM untuk diimplementasikan ke dalam sistem *cooperative relay*, Gui (2008).

METODE PENELITIAN

a. Konstektual pemodelan

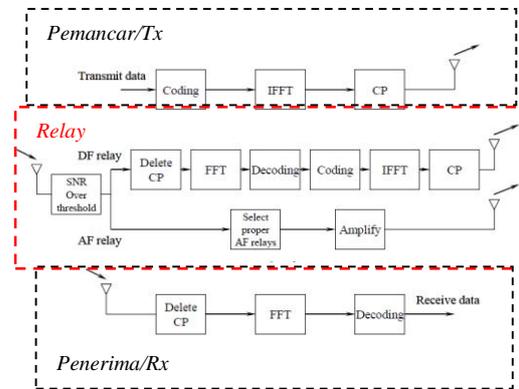
Pemodelan ini dapat mencakup tiga tahap yaitu pemodelan OFDM-Tx, model OFDM-Relay, dan model OFDM-Rx. Ketiga model ini kemudian akan terintegrasi dalam sistem OFDM-cooperative. Adapun konsep penelitian seperti Gambar 5.

Model OFDM-Tx adalah pada sisi pemancar. Blok ini terdiri atas Coding (konverter Serial Ke Paralel), IFFT dan *cyclic prefix* (CP). FFT merupakan komponen yang paling utama pada bagian perencanaan demodulasi. Ketika lebih dari satu pembawa dimasukan, FFT merupakan suatu metoda praktis untuk memperbaiki data dari pembawa (*carrier*) yang *overlap*. Pada blok ini simbol-simbol OFDM akan dipisahkan dari frekuensi *carriernya*, proses ini tidak lain merupakan proses kebalikan dari blok IFFT. FFT dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \left(\cos\left(\frac{2\pi ux}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi ux}{N}\right) \right) \tag{1}$$

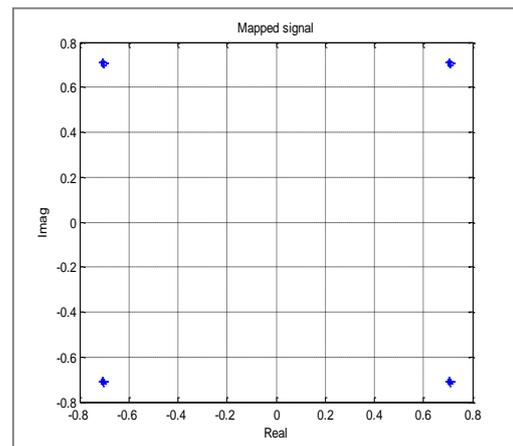
Model OFDM-Relay terdiri atas blok CP, FFT/IFFT, coding/decoding. Blok ini sebenarnya berfungsi sebagai terminal Tx/Rx sehingga skenario AF

dan DF dapat dibangkitkan dalam model ini. Sedangkan, model OFDM-Rx adalah pada sisi penerima. Blok ini terdiri atas Decoding (konverter Paralel ke Serial), FFT dan *delete-CP*.



Gambar 5. Konseptual pemodelan OFDM-cooperative.

b. Analisis spectrum OFDM



Gambar 6. Mapping QPSK.

Pemodelan ini dapat dilakukan melalui analisis dasar OFDM sebelum diaplikasikan ke dalam OFDM cooperative sistem. Data input berupa data acak yang dibangkitkan merupakan data $n > 100000$ bit dengan tipe integer. Selanjutnya, proses mapping dan modulasi QPSK. Proses mapping dilaksanakan untuk memisahkan

komponen *inphase* dan *quadrature* data yang bernilai 0 diubah menjadi -1 sehingga hal ini memudahkan untuk menghasilkan bit binary untuk proses QPSK, misalnya dalam menghasilkan 4 kuadran konstelasi QPSK. Responsi mapping pemodulasian QPSK dapat diperlihatkan pada Gambar 6. Hasil mapping ini pada dasarnya dapat disebut juga dengan sinyal termodulasi QPSK.

Proses selanjutnya yaitu sistem konversi serial-to-paralel. Dalam simulasi yang dilakukan, bit-bit output dari mapper disusun kedalam matriks paralel sehingga memudahkan untuk dilakukan Fourier transform IFFT dan penyisipan bit CP untuk memudahkan pembentukan subcarriernya.

IFFT/FFT merupakan salah satu konsep dasar beroperasinya OFDM system. *Spectral density* yang dihasilkan merupakan salah satu hal bagi keunggulan OFDM melalui pengoperasian IFFT/FFT untuk memastikan terbentuknya subcarrier-subcarrier yang tidak saling mengganggu (interferensi) dengan yang lainnya. Setiap sample symbol pada IFFT akan membentuk sebuah simbol bagi OFDM, dan signal time domain B_T merupakan hasil dari proses IFFT yang siap ditransmisikan. Pada sisi penerima, blok FFT berfungsi untuk penerimaan signal penerima B_T dan membawanya ke dalam domain frekuensi. Dalam simulasi yang dilakukan, kami menggunakan panjang 64 bit dari tiap-tiap blok IFFT/FFT hasil dari Gray QPSK.

Pada blok IFFT, bit pada *cyclic prefix* akan dikalikan dengan nilai *oversampling ratio* (OSR) yang dua kali lebih besar dari data yang ditransmisikan (*Nyquist rate*), sehingga ukuran data akan menjadi lebih panjang.

Pada dasarnya, proses oversampling pada blok IFFT bertujuan untuk mengurangi *noise* dan membantu mencegah *aliasing* dan *distorsi fase*.

Pada sistem penerima sebagaimana dilakukan pula demapping and decoding, proses ini bertujuan untuk mengembalikan kondisi semula data informasi dari pengirim setelah tergabung dalam subcarrier yang terpisah.

Data yang telah melewati blok FFT yang bertujuan untuk mengembalikan data seperti semula sebelum tahapan demapping yang merupakan data serial. Sebelum proses FFT, pemisahan CP dilaksanakan pada blok 'delete CP'. Pada blok ini CP yang telah ditambahkan pada transmitter akan dilepas, begitu juga dengan data samplingnya sehingga data yang dihasilkan sama dengan sejumlah bit data seperti pada blok Mapper.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian OFDM melalui BER dari kanal Additive White Gaussian Noise (AWGN)

Pemodelan OFDM-cooperative dapat diuji melalui pengukuran melalui kinerja BER. Pengukuran BER ditempatkan pada titik ukur sebelum blok Mapper dan sesudah blok Demapper. Hal ini untuk memastikan jumlah probabilitas error yang terjadi pada saat data input terkirim hingga sampai pada penerima. Final output yang terdapat pada penerima (output blok Demapper) kemudian dibandingkan dengan input data asalnya. Dalam analisa ini, formulasi BER secara teori juga dapat dibandingkan menggunakan persamaan (2).

Sistem pengujian dilakukan melalui AWGN channel. Hal ini dapat bertujuan

untuk mengetahui ketahanan sistem model yang terbentuk pada keadaan tidak ada noise yang sampai pada unit penerima. Dengan asumsi bahwa noise dibangkitkan secara acak, sehingga dapat mudah terukur melalui BER ketika power noisenya ditingkatkan. Dalam hal ini, kami membandingkan kinerja pada skema konstelasi signal yang berbeda-beda melalui BER-nya dengan jumlah *noise per binary* disetiap data yang ditransmisikan ($\frac{E_b}{N_o}$). $\frac{E_b}{N_o}$ dinyatakan dengan N_o merupakan *noise power spectral density* (W/Hz) dan E_b adalah energy per bit.

Sebagai perbandingan dalam pengujian berikutnya, formulasi BER pada signal konstelasi QPSK secara teori dapat dihitung dengan persamaan:

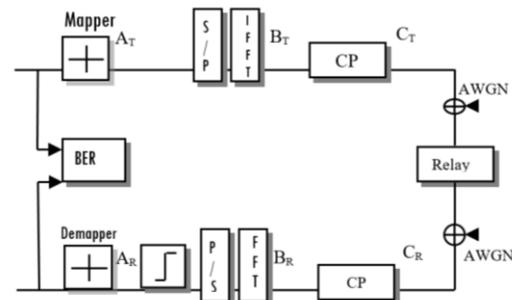
$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \quad (2)$$

dimana fungsi-Q tidak dapat dihitung secara normative biasa ketika bernilai invinitif sehingga fungsi yang digunakan dalam simulasi Matlab akan menggunakan fungsi $\operatorname{erfc}()$. Fungsi ini memudahkan untuk menghasilkan plot kurva BER.

Skema pengukuran dan pengujian BER dapat dilihat pada blok Gambar 7. Pemodelan OFDM-cooperative telah berlaku disini dimana setiap unit Tx, Relay dan Rx menggunakan skema OFDM. Pada gambar terlihat bahwa Tx-OFDM terhubung dengan Relay-OFDM dan dari Relay terhubung kembali menuju Rx-OFDM. AWGN channel dipasang pada unit diantara link Tx-Relay dan Relay-Rx.

Dalam tahap pengujian ini maka keseluruhan link OFDM-cooperative dapat dibuat pemodelan lengkapnya. Output pengujian A_T ialah output pada Mapper di pengirim. Setelah

ditambahkan dengan AWGN maka Nampak konstelasi signal termasuk gabungan noise telah di petakan sesuai yang yang pada gambar. Perubahan hasil mapping sebelum dan setelah ditambahkan AWGN kemudian dapat dibandingkan



Gambar 7. Pengujian BER dan spectrum waveform pada pada A_T , B_T , dan C_T .

Spectrum OFDM dapat dilihat melalui output blok IFFT dan melalui AWGN channel. Ketika signal dilewatkan pada kanal AWGN maka akan terjadi penurunan dan kenaikan level signal yang disebabkan oleh *random noise* yang dibangkitkan pada kanal, **Gui (2008)**.

Dalam pengujian probabilitas error, peningkatan $\frac{E_b}{N_o}$ perlu diuji. Kenaikan jumlah SNR memungkinkan error akan semakin kecil bahkan bisa mencapai nol. Perlu diperhatikan bahwa dalam melaksanakan simulasi program Matlab biasanya ukuran set data OFDM (satu frame saja) bisa terbatas. Bisa saja jumlah frame yang terkirim melalui OFDM ini ditingkatkan sehingga keakuratan error yang dihasilkan bisa lebih memadai, namun hal tersebut dalam pengerjaannya membutuhkan daya processing yang besar pada PC/laptop untuk mengerjakannya dan juga waktu respon (program running) yang cukup lama.

Pembahasan

Pemodelan end-to-end SNR dual hop cooperative relay melalui OFDM dilaksanakan dengan beberapa skenario melalui mixed multipath fading channel, dimana karakteristik model fading channel yang digunakan yaitu Rayleigh dan Rician Distribution. Dengan fixed-gain G pada terminal relay, terjadi penguatan penerimaan signal pada R_x .

Analisis BER diperlukan untuk mengetahui end-to-end SNR pada link Tx-Rx. Pemodelan OFDM-cooperative relay memungkinkan pengurangan infrastruktur transmitter dalam suatu sistem komunikasi jarak jauh. Selain efektif dalam mengurangi sumber daya, konsep ini pun tetap memiliki karakteristik bandwidth besar dalam pemenuhan data rate yang cukup tinggi pula.

Simulasi yang dikerjakan melalui Matlab berkerja dengan baik. Dengan menggunakan AWGN channel sebagai noise pengganggu dalam transmisi signal maka diperoleh konstelasi 4 QAM. Bagi SNR yang kecil maka terhitung probability error yang besar dan ISI pun terbantu dengan power noise yang besar. Jika SNR diperbesar, maka probability error akan berkurang sebagai yang diharapkan.

Metode pemodelan yang dapat direkomendasikan untuk dilakukan setelah pembahasan literure ini adalah dengan cara mensimulasikan karakteristik multipath fading channel pada transmisi cooperative-relay. Skenarionya dapat menggunakan dual-hop hingga ke multi-hop. Dengan demikian implementasi bagi pemodelan end-to-end SNR berbasis OFDM-cooperative melalui kombinasi multipath fading cahnnel dapat dengan mudah dilaksanakan.

KESIMPULAN

Sistem terbaru metode OFDM-cooperative relay wireless dengan skenario mixed-multipath fading channel dapat berhubungan dengan pengembangan sistem RF transmisi GHz berbasis software untuk generasi future sistem komunikasi bergerak (4G dan 5G). OFDM-cooperative memiliki kehandalan pada integrasi pengolahan sinyal dengan baik. Dengan kata lain, hal ini sangat membantu misalnya dalam mengurangi biaya produksi pembangunan BTS (Base transceiver station), tower antenna dan tambahan eksternal perangkat user bagi para penyedia operator selular di Indonesia.

Hal lain yang diperlu dicatat dalam hal pengembangan multi-hop OFDM-cooperative yaitu beberapa aspek dalam penggunaan guard interval, interpolation dan decimation, slicer, sistem coding awal pada data originalnya, simulation melalui multipath channel dan lain-lain. Dengan demikian kelengkapan multi-carrier OFDM dapat lebih mudah menyesuaikan dengan standar-standar wireless yang sudah ada hingga saat ini.

DAFTAR PUSTAKA

- B. Gui, L. Dai dan L. J. Cimini Jr. 2008. "Selective Relaying in Cooperative OFDM Systems: Two-Hop Random Network" IEEE Wireless comm. Dan Net conf, hal 996-1001.
- I. Lee. 2007. "BER analysis for Decode-and-forward relaying in dissimilar rayleigh fading channels," *IEEE Comm. Letters*.
- J. N. Laneman, D. N. C. Tse, dan G. W. Wornell. 2004. "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage

- behavior,” *IEEE Trans. Inform. Theory*.
- M. K. Simon and M. S. Alouini, 2000. “Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis.” John Wiley & Sons, Inc: Canada.
- R. Pabst, R dkk. 2004. “Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio,” *IEEE Comm. Mag.*
- S. Majid dan M. Uysal. 2008. “Cooperative Diversity over Log-Normal Fading Channels: Performance Analysis and Optimization”. *IEEE Trans.wireless communication*.
- S. Sirmayanti. 2009. "End-to-end SNR modeling dual-hop with multipath fading channel", UNM Media Elektrik Journal, Vol. 4, No. 2, p.148-223,ISSN 1907-1728
- S. Sirmayanti dan Arni Litha. 2010. *Perancangan adaptive duplexer sistem software radio multiband untuk mengatasi kelemahan fungsi radio analog menuju sistem sirkuit integrasi*.Laporan Penelitian Hibah Bersaing DIKTI 2010. Perpustakaan PNUP.
- S. Sirmayanti dan Lidemar Halide. 2015. Studi dan analisis pemodelan *end-to-end* SNR pada transmisi relay *dual-hop* dengan *mixed-multipath fading channel*. Laporan Penelitian Hibah Bersaing DIKTI 2015. Perpustakaan PNUP.
- Y. S, Cho, et al (2010) “MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB”, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.