

TEKNIK SINKRONISASI *CARRIER FREQUENCY OFFSET* (CFO) DALAM SYSTEM OFDM UNTUK OPIMASI IMPLEMENTASI *FREQUENCY SHARING* 5G

Sirmayanti¹⁾, Ichsan Mahjud¹⁾, Muhammad Mimsyad¹⁾, Winnie Felycia Patiung²⁾, Mutiara Sukma²⁾

¹⁾ Dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

²⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

ABSTRACT

This research aims to study modeling estimation techniques for CFO and simulate OFDM synchronization for appropriate frequency sharing 5G standard. The CFO estimation process through OFDM synchronization is carried out to produce zero-mean with a target signal without noise and interference reduction when frequency sharing is implemented, as is the application of using this frequency sharing will often happen on 5G. The research method using three comparison parameters in OFDM-MIMO scenarios, namely Zero-Forcing (ZF), Minimum-Mean-Square-Error (MMSE), and Maximum-Likelihood (ML). The results found are CFO synchronization techniques using the SISO and MIMO operation spatial multiplexing method can well achieve. While the test on the performance of BER Rx-optimum Maximum-Likelihood (ML) versus Eb/No against the use of the number of receiving antennas ($M \times N$) shows that MIMO with more $M \times N$ levels indicates lower BER levels small compared to SISO, but both remain stable in synchronization CFO.

Keywords: MIMO, SISO, CFO, 5G, frequency sharing, OFDM

1. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi nirkabel Generasi 5 (5G) mendatang akan mendukung berbagai layanan dengan beragam persyaratan. 5G bertujuan untuk memberikan kecepatan data sebesar 10-100 kali lebih cepat dari jaringan Generasi 4 (4G) yang ada saat ini dan kecepatan unduhan pada gigabit per detik (Gb/s), yang akan jauh lebih besar dari puluhan megabit per detik (Mb/s) kecepatan 4G. Untuk mencapai penerapan 5G ini maka persyaratan MIMO perlu secara massif. Terobosan yang dilakukan adalah mengkonfigurasi antena-antena Tx-Rx yang lebih kecil dengan gelombang milimeter agar dapat meningkatkan jumlah port antena di setiap fungsi *base transceiver station* (BTS).

Teknologi MIMO melalui penguatan *spatial multiplexing* telah menghasilkan penggunaan *multi sub-streams* (dua bit *streams*) sehingga *interference reduction* disetiap proses *transceiver* BTS dapat diterapkan [1] Kajian hasil dua bit *streams* MIMO tersebut berdasarkan metode operasi *layer mapping* and *pre-coding* pada lapisan fisik (*physical layer*) yang melibatkan seluruh processing dalam bit data hingga sampai ke *Long Term Evolution Physical Layer* (LTE-PHY). Dalam hasil penelitian tersebut, untuk mencapai efisiensi spectral yang tinggi maka performansi MIMO dipengaruhi oleh kombinasi jumlah antena pada sisi pengirim (Tx) dan penerima (Rx), penggunaan *multi sub-streams* untuk mengakomodasi kapasitas *bandwidth* (lebar pita) besar dan juga algoritma deteksi MIMO yang digunakan.

Hasil penelitian merupakan pengembangan penelitian pada [1] terkait penerapan MIMO di blok digital RF-transmitter 5G dengan dua permasalahan utama. Permasalahan pertama, metode *quadrature phase shift keying* (QPSK) dengan dua bit *streams* pada penelitian sebelumnya masih dianggap belum memenuhi persyaratan standar *multi sub-streams* dan *multi-user* 5G dengan efisiensi frekuensi spektral yang sempurna. Permasalahan kedua bahwa *multipath* dan *efek doppler* adalah penyebab utama terjadinya pergeseran frekuensi pada subcarrier sinyal OFDM yang dikirimkan, yang disebut *carrier frequency offset* (CFO). Oleh karena itu CFO harus dihilangkan untuk meningkatkan kinerja sistem. Masih diperlukan teknik sinkronisasi agar potensi interferensi *multi-user* berupa *inter-channel interference* (ICI) dan *inter-symbol-interferensi* (ISI) dapat lebih dikurangi. Kinerja *Bit Error Rate* (BER) terhadap level modulasi orde QPSK dengan *multi sub-streams* dan variasi $M \times N$ antenna menunjukkan bahwa level modulasi orde rendah dan level $M \times N$ MIMO yang lebih banyak mencapai kestabilan *transceiver* Tx-Rx yang baik disertai BER yang kecil [2]. Dengan kata lain, optimalisasi Rx 5G dapat tercapai dengan baik sebagaimana yang dipersyaratkan [3].

Solusi kombinasi teknologi MIMO dan OFDM merupakan sistem transmisi wideband yang digunakan untuk mengurangi interferensi antar simbol dan meningkatkan kapasitas system [4]. Sistem OFDM unggul membawa data hanya melalui *orthogonal subcarrier* dalam transmisi paralel. Keuntungan ini menjadi sumber solusi menurunkan distorsi yang disebabkan oleh proses *frequency selective channel* atau pada kejadian ISI untuk

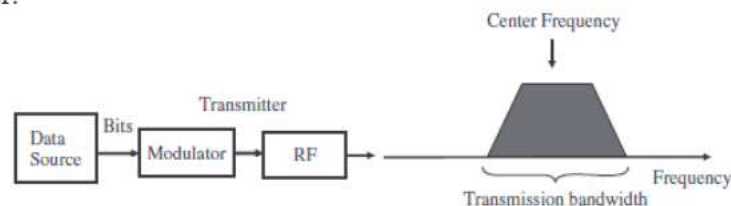
¹ Korespondensi penulis: Sirmayanti, 082291298633, sirmayanti.sirmayanti@poliupg.ac.id

semua saluran *multi-path fading* [5]. Namun, jika dijumpai sistem OFDM yang tidak *orthogonal*, maka dampak ISI dan bahkan ICI akan semakin membahayakan [6].

Konsep pemodelan *Single-Input Single-Output* (SISO) berbasis OFDM-Cooperative oleh [7] dapat mengoptimalkan fungsi perangkat Tx-Rx sebagai sebuah terminal relay, dimana Tx-Rx akan bekerjasama sebagai relay terhadap sistem lainnya. Komunikasi 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 OFDM agar bandwidth yang tersedia setelah spektrum dibagi menjadi sub band menjadi lebih hemat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 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, terutama terkait standar LTE yang sedang akan dikaji dalam usulan penelitian ini.

Hasil pengembangan teknik OFDM kemudian dikembangkan sebagai sistem modulasi digital untuk diaplikasikan dalam beberapa sistem transmisi digital wireless full *digital signal processing* (DSP) berbasis *software defined-radio* (SDR). SDR dapat menjawab penggunaan frekuensi dari keterbatasan sumber frekuensi tinggi dalam komunikasi wireless. [8] melakukan pendalaman tentang spectrum analysis melalui input signal OFDM pada struktur *upconverter* agar diketahui pentingnya mengetahui kinerja sumber sinyal pada sebuah konektivitas komunikasi yang memiliki data rate tinggi dan berbandwidth besar seperti pada OFDM. Kelemahan OFDM pada permasalahan *high-peak-to-average power ratio* (PAPR) namun dapat ditanggulangi jika sistem ini diintegrasikan sebagai input masukan pada struktur upconverter Cartesian Delta Sigma. Solusi OFDM ini menggunakan aplikasi OFDM IEEE 802.11g dengan bandwidth sebesar 16 MHz pada carrier frequency 1.024 GHz. Dengan demikian, karakteristik sinyal uji masukan OFDM menunjukkan skema struktur RF-upconverter Cartesian Delta Sigma dapat diaplikasikan pada sistem transmisi nirkabel digital, misalnya yakni pada teknologi LTE and WIMAX serta pada sistem perancangan transceiver GHz upconverter dimasa yang akan datang.

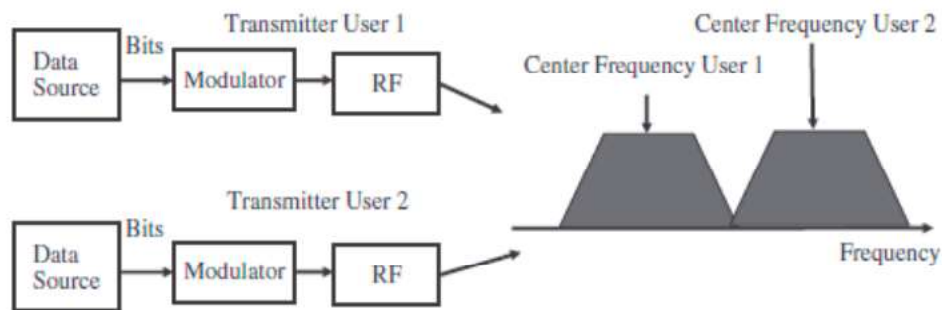
Metode penelitian ini akan melaksanakan sinkronisasi CFO. Sinyal baseband perlu dikonversi terlebih dahulu menjadi passband melalui sistem modulasi carrier OFDM, setelah itu akan dikonversikan kembali menjadi baseband dalam frekuensi carrier (f_c) yang sama di sisi penerima (Tx) [5]. Tujuan akan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah agar diperoleh estimasi CFO ketika sinkronisasi OFDM dilakukan untuk menghasilkan *zero-mean* dengan target signal tanpa noise dan *interference reduction* saat dilaksanakan *frequency sharing*. Penelitian ini diharapkan menjadi inovasi baru dari pengembangan terapan teknologi 5G khususnya pada pembangunan infrastruktur miniaturisasi BTS yang sangat dibutuhkan oleh industri provider/operator seluler.



Gambar 1. SC-FDMA [9].

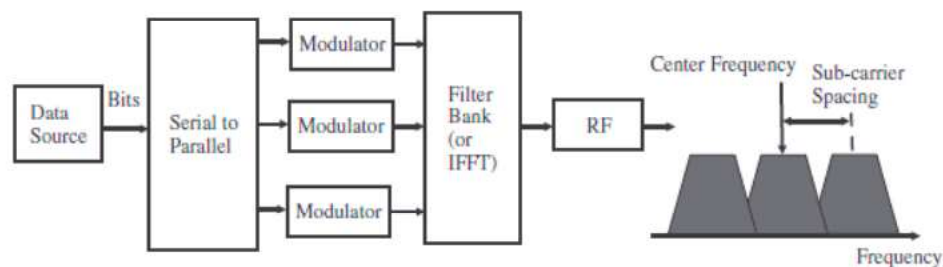
Dalam LTE, akses downlink didasarkan pada *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) dan akses uplink didasarkan pada *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA). Pada *Multiple Access Single carrier* (SC), informasi dimodulasi hanya untuk satu carrier, menyesuaikan fase atau amplitudo pembawa atau keduanya [10]. Frekuensi juga bisa disesuaikan, tetapi dalam LTE ini tidak terpengaruh. Semakin tinggi kecepatan data, semakin tinggi tingkat symbol dalam sistem digital dan dengan demikian bandwidth juga lebih tinggi. Misalnya dengan menggunakan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) pemancar menyesuaikan sinyal untuk membawa jumlah yang diinginkan dari bit per simbol modulasi. Gelombang spektrum yang dihasilkan adalah pembawa spektrum tunggal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Dengan prinsip FDMA, pengguna yang berbeda akan kemudian akan menggunakan carrier yang berbeda atau subcarrier, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. SC-FDMA dengan dua pengguna [9].

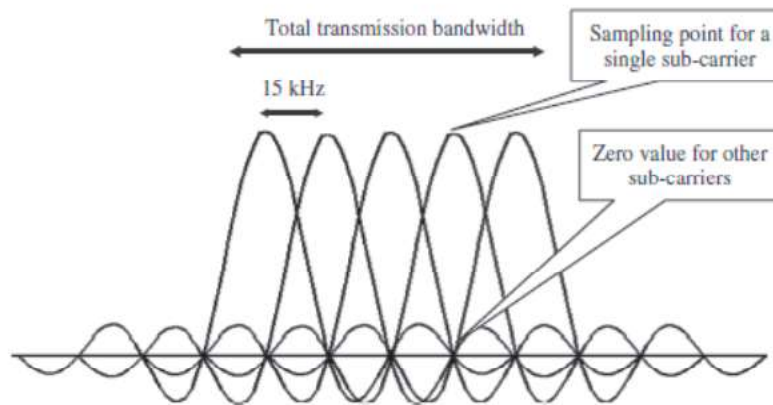
Penggunaan prinsip multi-carrier ditunjukkan pada Gambar 3, dimana data dibagi pada sub-carrier yang berbeda dari satu pemancar. Filter bank dipasang sebagai solusi praktisnya dan biasanya diganti dengan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dimana jumlah subcarrier banyak.



Gambar 3. Prinsip Multicarrier [9].

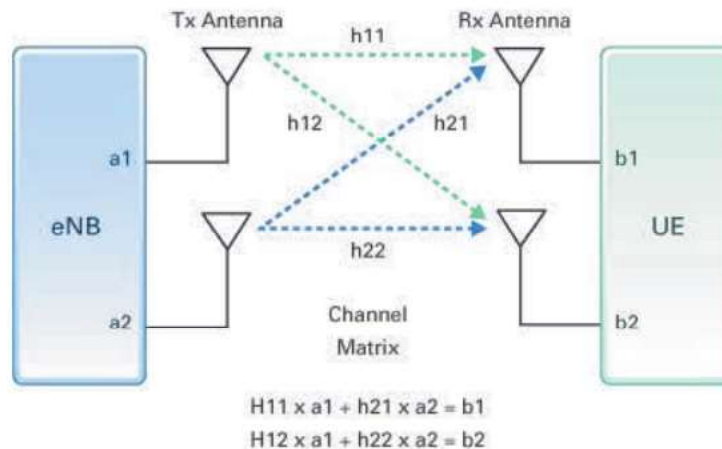
Salah satu contoh pendekatan multi-carrier adalah dual carrier WCDMA (dual cell HSDPA), yang mana menggunakan dual carrier WCDMA namun tidak menggunakan prinsip-prinsip pemanfaatan spektrum tinggi. Untuk mengatasinya, digunakan pendekatan orthogonality diantara transmisi yang berbeda, untuk menciptakan sub-carrier yang tidak mengganggu satu sama lain, meskipun spektrum masih tumpang tindih dalam domain frekuensi. Ini adalah dapat dicapai dengan prinsip OFDMA, di mana masing-masing frekuensi sub-carrier ini memiliki perbedaan dalam domain frekuensi, kemudian sub-carrier yang berdekatan memiliki nilai nol saat itulah dilakukan sampling dari sub-carrier yang diinginkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Sistem MIMO adalah sistem yang menggunakan multi antena baik pada transmitter maupun receiver untuk mengatasi kelemahan pada sistem komunikasi wireless konvensional diantaranya adalah large scale fading, small scale fading termasuk dildalamnya multipath fading serta interferensi dari sinyal lain. Sistem MIMO memberikan penambahan efisiensi spektral yang didasarkan pada penggunaan space diversity pada transmitter dan receiver. Sistem MIMO disebut juga sistem *multiple element antenna* (MEA) dilihat dari penggunaan space diversity. Dengan teknologi MIMO, sebuah receiver atau transmitter menggunakan lebih dari satu antena, tujuannya adalah untuk menjadikan sinyal pantulan sebagai penguat sinyal utama sehingga tidak saling menggagalkan. MIMO juga memiliki kelemahan, yaitu adanya waktu interval yang menyebabkan adanya sedikit delay pada antena saat mengirimkan sinyal, meskipun pengiriman sinyalnya sendiri lebih cepat. Waktu interval ini terjadi karena adanya proses dimana sistem harus membagi sinyal mengikuti jumlah antena yang dimiliki oleh perangkat MIMO yang jumlahnya lebih dari satu.



Gambar 4. Sub-Carrier [9].

Dalam sistemnya, MIMO tidak hanya menggunakan satu antenna tetapi menggunakan dua atau lebih banyak (jamak) baik pada pemancar maupun penerimanya, Gambar 5. Dengan menggunakan antenna jamak tersebut mengakibatkan kinerja menjadi lebih baik, hal tersebut dapat dibandingkan dengan sistem SISO.



Gambar 5. Sistem MIMO [11].

Beberapa teknologi yang telah menggunakan MIMO adalah IEEE 802.11n (WIFI), IEEE 802.11ac (WIFI), 4G, 3GPP Long Term Evolution, Wimax dan HSPA+. MIMO dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

a. *Pre-coding*

Precoding dikenal juga dengan multi-stream beamforming. Dalam istilah yang lebih umum adalah proses spatial yang terjadi pada transmitter. Tujuan dari beamforming adalah untuk meningkatkan sinyal gain yang diterima, dengan sinyal yang dipancarkan dari antenna yang berbeda secara konstruktif, dan juga mengurangi multipath fading. Kelemahan dari beamforming adalah pengiriman data tidak dilakukan secara bersamaan sehingga menambah delay yang terjadi. Precoding membutuhkan informasi tentang *Channel State Information* (CSI) pada sisi transmitter dan receiver.

b. *Spatial Multiplexing*

Spatial Multiplexing merupakan teknik yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas kanal sehingga menghasilkan *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang lebih tinggi. Untuk meningkatkan kecepatan sinyal maka sinyal dibagi menjadi aliran sinyal yang lebih kecil, setiap aliran yang dikirimkan dari antenna yang berbeda tetap menggunakan frekuensi yang sama. Jika sinyal yang datang pada receiver, pada beberapa antenna yang berbeda, maka akan dilakukan proses signatur dan proses CSI di sisi penerima. Spatial multiplexing dapat digunakan tanpa CSI di sisi transmitter akan tetapi dapat dikombinasikan antara precoding dan CSI. Spatial multiplexing dapat digunakan secara transmisi secara bersamaan ke multiple receivers, ini yang kita kenal dengan space division multiple access atau Multi User MIMO, dimana CSI dibutuhkan pada transmitter.

c. *Diversity Coding*

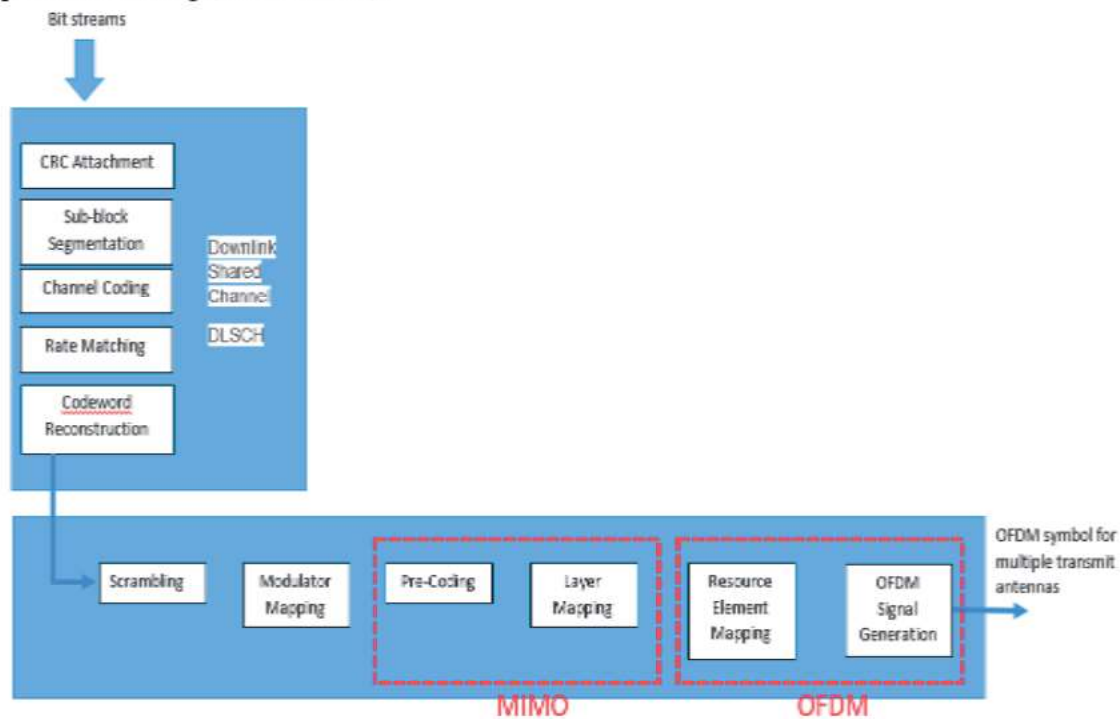
Teknik yang digunakan untuk ketika tidak ada kanal informasi di sisi pengirim. Metode diversity, menggunakan aliran single ketika ditransmisikan tetapi sinyal sudah dikodekan atau yang kita sebut dengan

space time coding. Diversity coding dapat dikombinasikan antara spatial multiplexing dengan beberapa kanal informasi pada sisi transmitter.

2. METODE PENELITIAN

Langkah kerja penelitian meliputi persiapan dan pengadaan bahan & alat termasuk instalasi software atau update lisensi dari software yang dibutuhkan. Pendalaman literatur dan studi pustaka senantiasa akan dilaksanakan sepanjang penelitian ini dalam hal mendapatkan informasi kesamaan dan perbedaan metode yang dikerjakan pada referensi yang terkait. Tujuan studi pustaka ini juga untuk menelaah tindakan dan kebijakan saat melaksanakan pemodelan, pemilihan data primer yang dibutuhkan dan kesesuaian variable data yang yang digunakan. Selanjutnya pengerjaan simulasi, penulisan code pemograman dan simulasi pemodelan. Pemodelan *estimation techniques* untuk CFO akan menggunakan estimasi variable yang digunakan pada penelitian sebelumnya dengan menambah variable $M \times N$ antenna dan variasi *bit-stream* sesuai peruntukan m-ary QPSK. Pemodelan berikutnya yaitu sinkronisasi OFDM bagi *frequency sharing* sistem standar 5G melalui analisis spectrum dan karakteristik grafik yang diperoleh.

Penelitian ini dilaksanakan melalui percobaan simulasi menggunakan software Matlab. Proses pembangkitan sinyal dan modeling modulator dilakukan keseluruhannya dengan software, hal ini mengingat untuk kemudahan melakukan simulasi dengan beragam variable input dibandingkan dengan pengukuran langsung menggunakan alat yang masih memiliki keterbatasan spesifikasi. Spesifikasi input signal dan spectrum analyser yang dibutuhkan adalah mencapai pada frekuensi tinggi GHz, sementara peralatan di laboratorium yang tersedia belum memadai. Kebutuhan software yang akan digunakan harus dilengkapi dengan beberapa Tool box seperti sistem DSP dan Communication tools. Urutan pengerjaan melalui Matlab akan dikerjakan melalui penulisan coding (Matlab Code).



Gambar 6. Skenario pemodelan standar Transmitter LTE.

Metode penelitian ini berdasarkan skenario pemodelan standar Transmitter LTE dengan blok dasar struktur MIMO dan OFDM (Gambar 6). Skenario meliputi *flowchart* algoritma dilengkapi dengan deskripsi setiap fungsi prosesnya (Tabel 1).

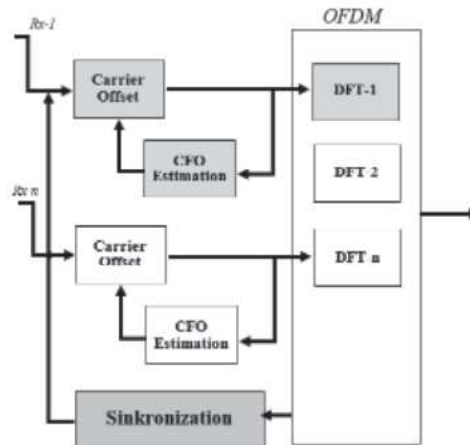
Tabel 1. Flowchart dan deskripsi function algoritma

Flowchart	Deskripsi Functions
	<p>Input Variables menggunakan data utama: $M \times N$ Antenna, Mod Orde, dan N-Bit streams. $M \times N$ akan bervariasi yang masing-masing menunjukkan jumlah antenna Tx (M) dan Rx (N) pada BTS. Mod Orde adalah orde yang digunakan dalam modulasi m-ary QPSK. N-Bit stream menunjukkan standar jumlah bit data yang digunakan. Satuan bit-data dalam Gbps.</p>
<p>Setup PHY dan Cell-ID</p>	<p>Setup PHY dan Cell-ID meliputi proses identifikasi <i>physicl layer</i> BTS. Proses ini akan menghasilkan <i>number of resources blocks</i> dan <i>cell-specific reference signal ports</i></p>
<p>Setup DL-SCH Setting</p>	<p>Setup DL-SCH Setting meliputi Transport/Physical channel settings bagi DL-SCH and PDSCH. Proses ini juga meliputi Cell-wide Settings.</p>
<p>OFDM</p>	<p>OFDM meliputi modulasi <i>m-ary</i> QPSK <i>subcarrier setting</i>, dan <i>sharing frequency set</i></p>
<p>RF-upconverters</p>	<p>RF-unconverter merupakan paket digital block yang mencakup koneksi transmitter Tx-Rx</p>
<p>Synchronize ?</p>	<p>Sinkronisasi <i>carrier frequency offset</i> (CFO) dan <i>Noise & Interferensi Reduction</i></p>
<p>Output Variables: E_b/N_o BER(ZF, MMSE, ML)</p>	<p>Hasil simulasi akan membandingkan nilai E_b/N_o dan BER pada tiga skema yaitu ZF, MMSE, ML.</p>

Gambar 7 menunjukkan skenario metode CFO estimation sehingga sinkronisasi OFDM struktur MIMO sebagaimana pada Gambar 6 dapat dilaksanakan. Dalam tahapan simulasi pemodelannya, metode yang digunakan menggunakan analisis untuk pengkajian pada:

- ✓ Pemodelan *estimation techniques* untuk CFO
- ✓ Sinkronisasi OFDM bagi *frequency sharing* sistem standar 5G

Terdapat tiga parameter yang digunakan dalam perbandingan hasil skenario ini yaitu: *non-linear interference cancellation* yakni *Zero-Forcing* (ZF) dan *Minimum-Mean-Square-Error* (MMSE), dan tipe kinerja pada penerimaan Rx-optimal atau disebut *Maximum-Likelihood* (ML).

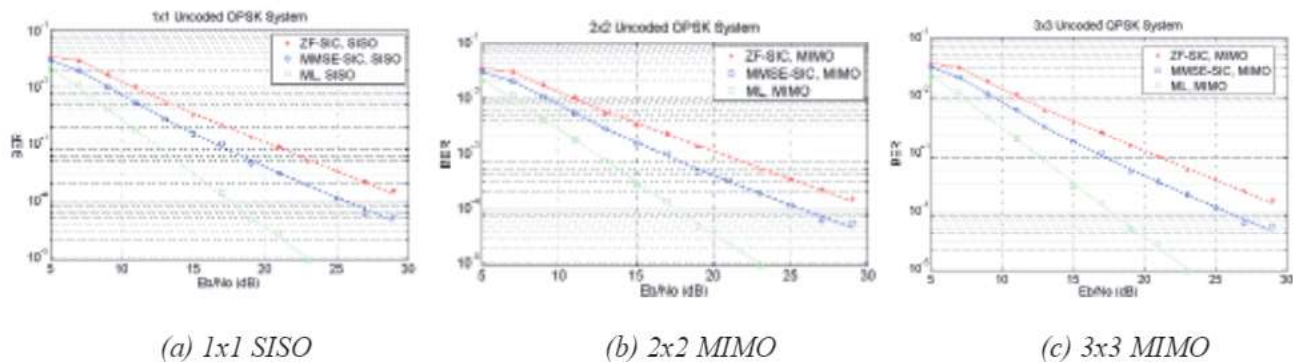


Gambar 7. Skenario pemodelan sinkronisasi OFDM metode CFO estimation.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknik sinkronisasi *Carrier Frequency Offset* (CFO) menggunakan metode multiplexing spasial operasi SISO dan MIMO dilaksanakan dengan membagi aliran data menjadi sub-aliran yang bebas (independen), dimana masing-masing dihubungkan dengan satu untuk setiap antenna pengirim yang digunakan. Konsep skema ini memberikan keuntungan multiplexing sehingga tidak memerlukan ortogonisasi eksplisit. Melalui Teknik ini, system sinkronisasinya membutuhkan teknik decoding (demodulasi) yang kuat di penerima. Pada data termodulasi QPSK, input Rayleigh fading pada masing-masing Tx-Rx tetap saling independen. Sedangkan pada sisi penerima Rx, telah di set saluran dengan umpan balik (feedback) ke pemancar, dengan demikian sistem proses sinkronisasi mudah dilaksanakan.

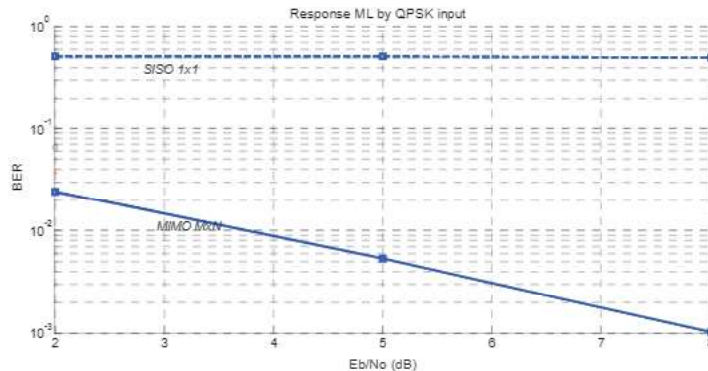
Selain itu, sama halnya pada konsep spatial multiplexing [1], metode penelitian ini juga menggunakan dua parameter sebagai perbandingan yaitu *non-linear interference cancellation* yakni *Zero-Forcing* (ZF) dan *Minimum-Mean-Square-Error* (MMSE). Dengan kedua parameter ini, dapat diperlihatkan hasil kinerja pada penerimaan Rx-optimal atau yang disebut *Maximum-Likelihood* (ML). Hasil menunjukkan bahwa sinkronisasi CFO pada SISO dan MIMO tidak berdampak pada ML. Atau dengan kata lain, baik pada SISO dan MIMO maka CFO dapat dilaksanakan dengan mudah dan tidak memperhatikan lagi proses tuning atau persyaratan apakah infrastrukturnya SISO atau MIMO.



Gambar 8. Kinerja BER Rx dengan perbandingan tiga skenario: 1x1 SISO (a), 2x2 MIMO (b) dan 3x3 MIMO (c)

Dari hasil pada Gambar 8 menunjukkan bahwa kinerja Rx-ML adalah yang terbaik, diikuti selanjutnya oleh Rx-MMSE-SIC dan Rx- ZF-SIC. Secara eksponensial, Rx-ML linear terhadap jumlah antenna yang digunakan sedangkan bagi Rx-MMSE-SIC dan Rx- ZF-SIC masih senantiasa terpengaruh dengan interferensi cancellation. Ketiga skenario di atas menggunakan orde modulasi 2.

Pada kurva Gambar 9 menunjukkan kinerja BER Rx-optimum ML versus Eb/No terhadap penggunaan jumlah antena penerima ($M \times N$). Melalui teknik spatial multiplexing ini menunjukkan bahwa MIMO dengan tingkat $M \times N$ yang lebih banyak menunjukkan level BER yang kecil dibandingkan SISO, namun keduanya tetap stabil dalam pelaksanaan sinkronisasi *Carrier Frequency Offset* (CFO), sebagaimana yang diuraikan sebelumnya.



Gambar 9. BER Rx-optimum ML versus Eb/No terhadap penggunaan jumlah antena penerima ($M \times N$), SISO vs MIMO models.

4. KESIMPULAN

- Teknik sinkronisasi *Carrier Frequency Offset* (CFO) menggunakan metode multiplexing spasial operasi SISO dan MIMO dapat dilakukan.
- kinerja BER Rx-optimum Maximum-Likelihood (ML) versus Eb/No terhadap penggunaan jumlah antena penerima ($M \times N$) menunjukkan bahwa MIMO dengan tingkat $M \times N$ yang lebih banyak menunjukkan level BER yang kecil dibandingkan SISO, namun keduanya tetap stabil dalam pelaksanaan sinkronisasi CFO.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sirmayanti, S dan Ichsan Mahjud (2019). Optimalisasi Operasi Mimo Dengan Teknik Spatial Multiplexing Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M 2019) PNUP, hal.103-108, ISBN. 978-602-60766-7-0, November 2019.
- [2] Tsoulos, G, Ed (2018). MIMO System Technology for Wireless Communications. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [3] Ji, H.S. Park, J. Yeo, Y. Kim, J. Lee dan B. Shim (2018). Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in 5G Downlink: Physical Layer Aspects, IEEE Wireless Communications Journal, vol. 25, no. 3, hal. 124-130, doi: 10.1109/MWC.2018.1700294.
- [4] Gupta, B., dan Saini, D. S (2011). BER analysis of space-frequency block coded MIMO-OFDM systems using different equalizers in quasi-static mobile radio channel. Prosiding IEEE *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, hal. 520-524.
- [5] Sirmayanti, S., Ulfiah, F., & Airin, D. U. T. (2017). Spectrum Analysis with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Input Signal for Upconverter Structure, hal 252-257.
- [6] Sklar, B. (2002) *Digital Communications: Fundamentals and Applications 2/E*, Prentice Hall.
- [7] Sirmayanti, S., Umar, N., Halide, L., & Sulaeman, S. (2016). Pemodelan Single-Input Single-Output (SISO) Berbasis OFDM-Cooperative. *Jurnal Teknologi Elektroika*, 13(2), hal. 186-194.
- [8] Sirmayanti, S dan Ichsan Mahjud (2017). Spectrum Analysis with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Input Signal. Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika, hal. 252-257, ISBN. 978-602-18168-2-0 SNTEI2017_TEL02, November 2017.
- [9] Tarokh V., Seshadri N., dan Calderbank A. R (1998). Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction. *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 44(2), hal. 744-765.
- [10] Zarrinkoub Housman (2014). *Understanding LTE with MATLAB*. John Wiley & Son. UK.
- [11] Singh, Arun Kumar, Neelam Srivastava, dan Saurabh Dixit (2020). Optimizing Resource Allocation of MIMO-OFDM in 4G and Beyond Systems. *Advances in VLSI, Comm and Signal Processing*. Springer, Singapore. Hal 241-249.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Unit Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Politeknik Negeri Ujung Pandang. Penelitian ini dibiayai oleh DIPA Politeknik Negeri Ujung Pandang, sesuai dengan Surat perjanjian Pelaksanaan Penelitian Nomor: B/32/PL10.13/PT.01.05/ 2021, tanggal 23 April 2021.