

Implementasi Sistem Komunikasi Nirkabel OFDM Berbasis *Software Defined Radio* (SDR)

Ida Anisah¹, Hendy Briantoro², Ahmad Zainudin³, Desy Intan Permatasari⁴

Abstract—Nowadays, wireless communication technology is developing rapidly. However, this technology still has some weaknesses, e.g. large bandwidth requirement and multipath fading. To overcome these weaknesses, MIMO OFDM technique is needed. This paper implements MIMO OFDM 2x2 communication system in Universal Software Radio Peripheral (USRP). The performance of MIMO OFDM 2x2 is shown by the throughput value. This value is compared to the throughput value of single carrier and SISO OFDM. The modulations used are BPSK, 4-QAM, and 16-QAM. In 4-QAM modulation, the throughput value of MIMO OFDM is significantly larger than throughput value of single carrier and SISO OFDM. The throughput value of single carrier communication system is 27.71 Mbit/s, while the throughput value of the SISO OFDM communication system is 60.27 Mbit/s, and the throughput value of the MIMO OFDM 2x2 communication system is 123.03 Mbit/s.

Intisari—Dewasa ini teknologi komunikasi nirkabel berkembang dengan cepat. Meskipun demikian, teknologi ini masih memiliki beberapa kekurangan, yakni kebutuhan lebar pita yang besar dan adanya *multipath fading*. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan adanya teknik MIMO OFDM. Makalah ini mengimplementasikan sistem komunikasi MIMO OFDM 2x2 pada *Universal Software Radio Peripheral* (USRP). Kinerja dari sistem komunikasi MIMO OFDM 2x2 ini dilihat dari nilai *throughput*. Nilai *throughput* tersebut dibandingkan dengan nilai *throughput* pada *single carrier* dan SISO OFDM. Modulasi yang digunakan ialah BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM. Pada modulasi 4-QAM, *throughput* MIMO mengalami kenaikan yang signifikan dibandingkan *single carrier* dan SISO OFDM. Nilai *throughput* yang dihasilkan pada sistem komunikasi *single carrier* sebesar 27,74 Mbit/s, sedangkan nilai *throughput* pada SISO OFDM sebesar 60,27 Mbit/s, dan *throughput* pada MIMO OFDM 2x2 adalah sebesar 123,03 Mbit/s.

Kata Kunci—SDR, USRP, *single carrier*, OFDM, MIMO, *throughput*.

I. PENDAHULUAN

Sejalan dengan perkembangan teknologi nirkabel, perubahan standar komunikasi dan permasalahan kompatibilitas menjadi masalah baru bagi para penyedia jasa telekomunikasi. Perubahan standar komunikasi sebagian besar diimplementasikan dalam bentuk perangkat keras, sehingga diperlukan investasi perangkat keras baru yang menyebabkan

mahalnya biaya langganan [1]. *Software Defined Radio* (SDR) merupakan teknologi komunikasi berbasis nirkabel yang fungsinya ditentukan oleh perangkat lunak, sehingga dengan adanya perubahan layanan, standar, dan teknologi, tidak diperlukan perubahan perangkat keras baru. Hanya tinggal mengubah konfigurasi perangkat lunak pada SDR yang digunakan. *Universal Software Radio Peripheral* (USRP) merupakan bagian *front end* pada arsitektur sistem SDR. USRP menggunakan batas frekuensi yang cukup lebar, antara 0-5 GHz. Batas frekuensi bergantung pada *daughterboard* yang digunakan [2]. Perpaduan antara USRP dan platform SDR menghasilkan kinerja yang baik untuk implementasi komunikasi nirkabel.

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel saat ini semakin signifikan. Hal ini diikuti dengan meningkatnya permintaan kompleksitas tipe data yang dikirim oleh pengguna perangkat nirkabel. Pengiriman data meliputi data *file*, gambar, dan video pita lebar yang dikirim melalui kanal suara yang sudah ada. Akibatnya, diperlukan lebar pita cukup besar dengan cara meningkatkan jumlah spektrum, padahal lebar pita merupakan sumber daya alam terbatas. Oleh sebab itu, diperlukan teknik dalam peningkatan efisiensi penggunaan spektrum. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan salah satu solusi yang dapat diterapkan pada lapisan fisik untuk komunikasi perangkat nirkabel yang membutuhkan pita lebar. OFDM merupakan teknik transmisi banyak frekuensi (*multicarrier*), dengan masing-masing frekuensi saling tegak lurus (ortogonal), sehingga saat terjadi *overlapping* tidak menyebabkan interferens dan dapat memperbesar efisiensi spektrum.

Selain kendala lebar pita, gangguan pada sistem komunikasi nirkabel yang paling dominan adalah *multipath fading*. Untuk mengatasi *multipath fading*, digunakan teknik *multiple* antena (*Multiple Input Multiple Output*/MIMO) [3]. MIMO merupakan teknik pada komunikasi nirkabel yang menggunakan lebih dari satu antena pengirim dan penerima. Setiap antena mengirimkan data yang independen dan simultan. MIMO dapat memberikan *diversity gain* dan *multiplexing gain*. *Diversity gain* diperoleh dengan menerapkan teknik *spatial diversity*, sedangkan *multiplexing gain* diperoleh dengan menerapkan teknik *spatial multiplexing* pada sistem komunikasi nirkabel. Prinsip dari *spatial diversity* adalah setiap antena pengirim mengirimkan sinyal informasi yang sama secara paralel dengan menggunakan *coding* yang berbeda pada kanal *independent fading*, sehingga di penerima minimal ada satu sinyal yang tidak mengalami *deep fade*. Teknik *spatial diversity* dapat menanggulangi *fading* dan secara signifikan dapat menambah *link quality* dan meningkatkan *signal-to-noise ratio* (SNR) [4].

Sementara itu, pembelajaran mengenai implementasi sistem MIMO menggunakan SDR dan USRP telah dikembangkan

^{1,2,3} Staf Pengajar, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jalan Raya ITS, Kampus PENS, Sukolilo, Surabaya 60111 tlp:031-5947280; fax: 031-5946111; e-mail: ida@pens.ac.id, hendy@pens.ac.id, zai@pens.ac.id

⁴ Staf Pengajar, Departemen Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jalan Raya ITS, Kampus PENS, Sukolilo, Surabaya 60111 tlp:031-5947280; fax: 031-5946111; e-mail: desy@pens.ac.id

oleh beberapa peneliti. Sistem MIMO dengan teknik modulasi BPSK di USRP telah diterapkan pada sebuah penelitian [5]. Data yang dikirim berupa deretan *PN Sequence* melalui *single carrier*. Sementara sistem OFDM dengan modulasi BPSK dan QPSK juga telah diimplementasikan, dengan kinerja paling baik dicapai saat digunakan modulasi QPSK [6], [7]. Pada sistem OFDM yang dibangun masih digunakan konfigurasi dasar. Data yang dikirim berupa aliran bit yang dibangkitkan pada sisi pemancar. Keandalan sistem pada sistem ini tidak diperhitungkan. Pada sebuah penelitian, kinerja *Bit Error Rate* (BER) terhadap SNR dibandingkan antara hasil simulasi MATLAB dengan hasil pengujian implementasi sistem secara nyata [8]. Pada pengujian implementasi, sulit dilakukan pengukuran besarnya SNR. Keandalan pengiriman data ditawarkan dengan menerapkan *Forward Error Correction* (FEC). Kinerja dari FEC yang dicapai menjadi menurun ketika SNR lebih rendah dari batas ambang [9], [10]. Implementasi sistem OFDM pada USRP juga pernah dilakukan pada penelitian lain, tetapi sistem komunikasi yang digunakan adalah SISO OFDM [11]. Sedangkan pada makalah ini diimplementasikan secara *real time* sistem komunikasi nirkabel MIMO OFDM menggunakan perangkat USRP dan LabVIEW sebagai platform SDR. Selain implementasi MIMO, pada makalah ini juga dibandingkan *throughput* antara *single carrier*, SISO OFDM, dan MIMO OFDM.

II. PERANCANGAN SISTEM

Pada bagian ini dibahas mengenai perancangan sistem, baik mengenai perangkat keras maupun perangkat lunak yang digunakan. Konsep dasar perencanaan penelitian ini adalah membuat prototipe sistem komunikasi.

A. Skema Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDM adalah skema *multiplexing* dengan membagi aliran data menjadi beberapa kanal pita sempit dengan memanfaatkan lebar pita yang tersedia. Kanal pita sempit (*narrow band*) biasanya dikenal dengan istilah *subcarrier* yang dikirim dengan memodulasi fase atau amplitude. Perbedaan antara OFDM dengan *Frequency Division Multiplexing* (FDM) yaitu OFDM mempunyai *subcarrier* yang saling ortogonal. Sifat ortogonal ini dapat mengurangi interferensi antar kanal dan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum.

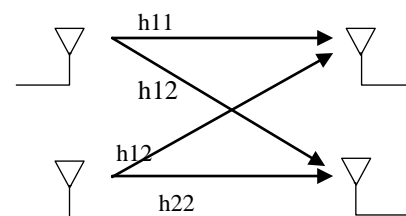
Data yang dikirim berupa aliran bit data yang dimodulasi menggunakan modulasi fase atau amplitude. Apabila menggunakan modulasi fase digunakan BPSK, sedangkan apabila menggunakan modulasi amplitude digunakan 4-QAM atau 16-QAM. Saat digunakan modulasi BPSK, setiap simbol terdiri atas 1 bit, pada modulasi 4-QAM setiap simbol terdiri atas 2 bit, sedangkan pada modulasi 16-QAM setiap simbolnya terdiri atas 4 bit. Sinyal hasil modulasi diubah dari aliran serial menjadi paralel dan sinyal diubah ke dalam domain waktu pada blok *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT). Pada proses ini ditambahkan simbol pilot pada masing-masing simbol OFDM yang akan dikirim. Pada makalah ini digunakan tipe *comb* untuk penambahan simbol pilotnya. Penambahan simbol pilot ini digunakan untuk

estimasi kanal pada sisi penerima. Selanjutnya, sinyal diubah kembali dari aliran paralel menjadi serial dan dilakukan penambahan *cyclic prefix*. Penambahan *cyclic prefix* dilakukan dengan cara menyalin sebagian pada bagian belakang simbol OFDM dan diletakkan pada bagian depan simbol OFDM. Penambahan *cyclic prefix* ini dilakukan dengan tujuan salah satunya untuk menangani interferensi simbol di sebelahnya dan menangani permasalahan *intercarrier interference* (ICI). Setelah itu, sinyal digital diubah menjadi sinyal analog menggunakan DAC dan sinyal dipancarkan melalui antenna.

Pada sisi penerima, sinyal diterima oleh antenna dan diubah menjadi sinyal digital pada blok ADC. Selanjutnya, *cyclic prefix* dihilangkan sehingga tinggal simbol OFDM asli. Aliran data sinyal diubah dari serial menjadi paralel, setelah itu sinyal diubah ke dalam domain frekuensi menggunakan blok *Fast Fourier Transform* (FFT). Pada proses ini, simbol pilot dihilangkan dan aliran data diubah dari paralel ke serial. Sinyal didemodulasi sesuai dengan jenis modulasi yang digunakan pada pemancar dan didapatkan aliran data bit yang dikirim.

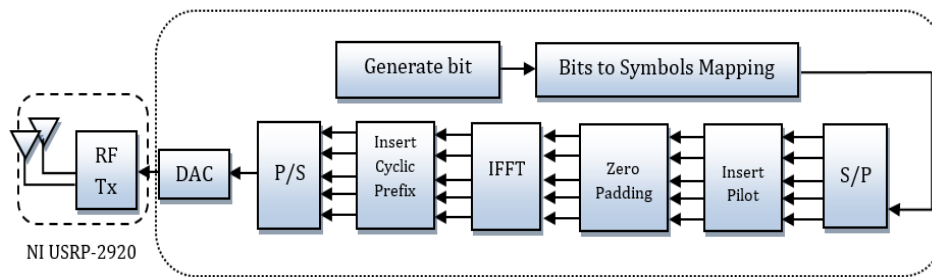
B. Multiple Input Multiple Output

MIMO merupakan teknik pada komunikasi nirkabel yang menggunakan lebih dari satu antenna pengirim dan penerima. Setiap antenna mengirimkan data yang independen dan simultan. MIMO dapat memberikan *diversity gain* dan *multiplexing gain*. *Diversity gain* diperoleh dengan menerapkan teknik *spatial diversity*, sedangkan *multiplexing gain* diperoleh dengan menerapkan teknik *spatial multiplexing* pada sistem komunikasi nirkabel. Prinsip dari *spatial diversity* adalah setiap antenna pengirim mengirimkan sinyal informasi yang sama secara paralel dengan menggunakan *coding* yang berbeda pada kanal *independent fading*, sehingga di penerima minimal ada satu sinyal yang tidak mengalami *deep fade*. Teknik *spatial diversity* dapat menanggulangi *fading* dan secara signifikan menambah *link quality* dan meningkatkan SNR [6].

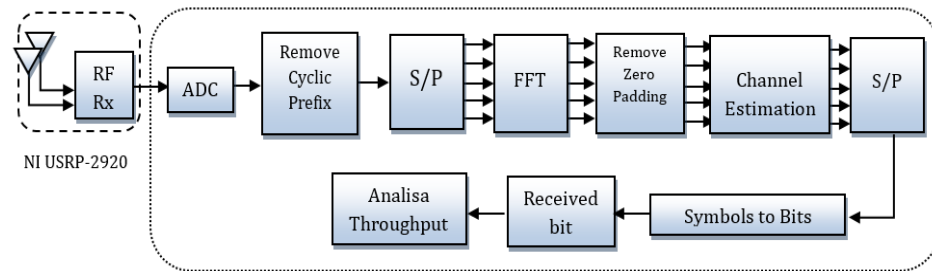


Gbr. 1 Kanal MIMO.

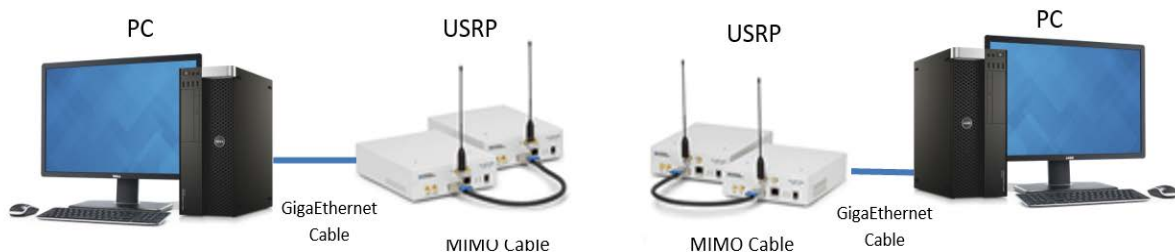
Teknik *spatial multiplexing* mengirimkan data yang berbeda secara paralel dan dikodekan secara paralel untuk setiap antenna pengirim. Tujuan utama teknik ini adalah untuk meningkatkan kapasitas kanal, dengan memecah aliran data berlaju tinggi menjadi sejumlah aliran data paralel sesuai dengan jumlah antenna pengirim. Dengan kanal *independent fading* antara pasangan pengirim dan penerima pada kondisi *multipath*, MIMO memberikan peningkatan kapasitas yang linier dengan jumlah antenna yang digunakan tanpa perlu meningkatkan lebar pita dan daya pancar. Karakteristik dari kanal MIMO 2x2 ditunjukkan pada Gbr. 1.



Gbr. 2 Diagram blok sistem pada sisi pemancar.



Gbr. 3 Diagram blok sistem pada sisi penerima.



Gbr. 4 Rancangan perangkat implementasi MIMO OFDM dengan menggunakan USRP.

C. Implementasi

Sistem komunikasi nirkabel yang dibangun dalam makalah ini menggunakan skema MIMO OFDM 2x2 dengan menerapkan *ZF equalizer* pada sisi penerima. *Equalizer* digunakan untuk menangani permasalahan ISI dan meningkatkan keandalan sistem. Sistem komunikasi MIMO OFDM ini diimplementasikan pada USRP dan platform SDR. Prototipe sistem komunikasi terdiri atas pemancar dan penerima. Pemancar dan penerima masing-masing berupa *PC host* yang terhubung dengan perangkat NI USRP-2921. Sistem komunikasi nirkabel pada sisi pemancar diperlihatkan pada Gbr. 2, sedangkan sistem komunikasi nirkabel pada sisi penerima ditunjukkan pada Gbr. 3.

Makalah ini menekankan pada bagian implementasi lapisan fisik sistem komunikasi nirkabel menggunakan skema MIMO OFDM 2x2. Pemancar dan penerima diimplementasikan menggunakan NI USRP-2921 dan perangkat SDR LabView. Pada sisi pengirim, proses pertama ialah mengatur alamat IP dari USRP dan membuka *session* dari USRP. Kemudian, dilanjutkan dengan mengatur *IQ rate* dan frekuensi *carrier*. *Bit stream* yang akan dikirimkan dimodulasi menjadi simbol-simbol. Modulasi yang digunakan adalah BPSK, 4QAM, dan 16-QAM. Simbol-simbol kemudian diparalelkan. Setelah itu, simbol pilot dimasukkan ke dalam simbol-simbol tersebut.

Ukuran simbol pilot adalah 34 bit. Kemudian *zero padding* ditambahkan pada awal simbol sebanyak 43 *zero*, yaitu 42 *zero* di akhir simbol dan 1 *zero* pada *DC carrier*. Simbol tersebut kemudian diubah dari domain frekuensi ke domain waktu menggunakan IFFT. Setelah itu, ditambahkan *cyclic prefix* pada awal simbol untuk mengurangi efek ISI. *Cyclic Prefix* diambil dari penduplikasian 64 bit terakhir dari simbol. Kemudian, simbol tersebut diubah ke sinyal analog dan ditransmisikan menggunakan USRP.

Pada implementasi USRP MIMO OFDM 2x2, digunakan dua USRP sebagai pengirim dan dua USRP sebagai penerima, seperti diperlihatkan pada Gbr. 4.

Proses yang dilakukan pada sistem penerima merupakan kebalikan dari sistem pemancar. Setelah proses di penerima selesai dan diperoleh bit yang diterima, selanjutnya dilakukan pengujian *throughput* pada sistem komunikasi SISO OFDM dan MIMO OFDM 2x2 dengan modulasi BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM.

Adapun parameter dari sistem yang digunakan disajikan pada Tabel I.

D. Pengukuran Throughput

Throughput adalah salah satu parameter lain dalam evaluasi kinerja jaringan yang juga cukup penting. Nilai *throughput* dapat diperoleh dengan membandingkan jumlah data atau

informasi yang diterima dengan sukses di terminal penerima terhadap seluruh data atau informasi yang dikirim per satuan waktu (detik) [12]. Perhitungan *throughput* dilakukan berdasarkan (1).

$$\text{Throughput} = \frac{N}{T} = \frac{D \times m \times r}{T} \quad (1)$$

dengan:

N = Number of uncoded bits per OFDM symbol

T = OFDM symbol duration (pada eksperimen, $T = 4,69 \mu\text{s}$)

D = Data of symbol OFDM (pada eksperimen, $D = 192$)

m = Bit of modulation (untuk BPSK, $m = 1$; untuk 4QAM, $m = 2$; untuk 16QAM, $m = 4$)

r = ratio of OFDM (pada eksperimen, $r = 3/4$).

TABEL I
PARAMETER SISTEM

	Parameter	Nilai
Pengirim	Pilot Sequence	34 simbol
	Modulasi	BPSK, 4QAM, 16QAM
	Jumlah subcarrier	256
	Ukuran FFT	256
	Guard Intervals	86 bits (43 zeroes at the edges of the passband and at 1 zero at DC)
	Data Rate	200 Kbps
	Frekuensi Carrier	910 MHz
	1 Frame Data	320 bit
	Ratio Cyclic Prefix	1/4
	Data of symbol OFDM	136 bit
Penerima	Equalizer	Zero Forcing

III. EKSPERIMEN DAN ANALISIS

Pada bagian ini dijelaskan beberapa hasil pengujian dan dilakukan analisis. Pengujian meliputi pengukuran diagram konstelasi SISO OFDM, MIMO OFDM, serta *throughput* dari sistem komunikasi *single carrier*, SISO OFDM, dan MIMO OFDM. Modulasi yang digunakan adalah BPSK, 4-QAM, 16-QAM.

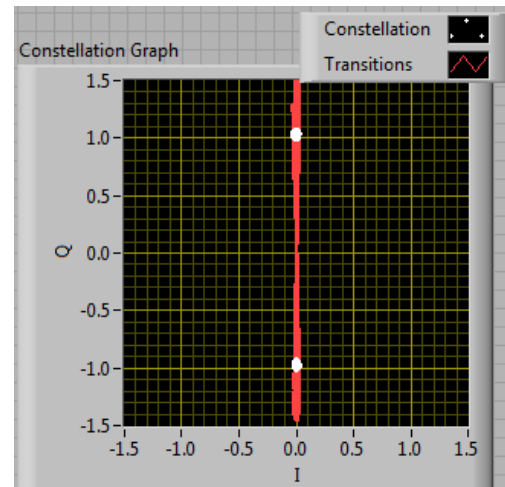
A. Pengukuran Diagram Konstelasi pada SISO OFDM

Pengujian OFDM menggunakan USRP dilakukan dengan satu antenna pada sisi pengirim dan satu antenna di sisi penerima. Frekuensi *carrier* yang digunakan adalah 910 MHz dan *rate* yang digunakan adalah 1 MS/s. Diagram konstelasi dengan modulasi BPSK ditunjukkan pada Gbr. 5, diagram konstelasi dengan modulasi 4-QAM ditunjukkan pada Gbr. 6, dan diagram konstelasi dengan modulasi 16-QAM ditunjukkan pada Gbr. 7.

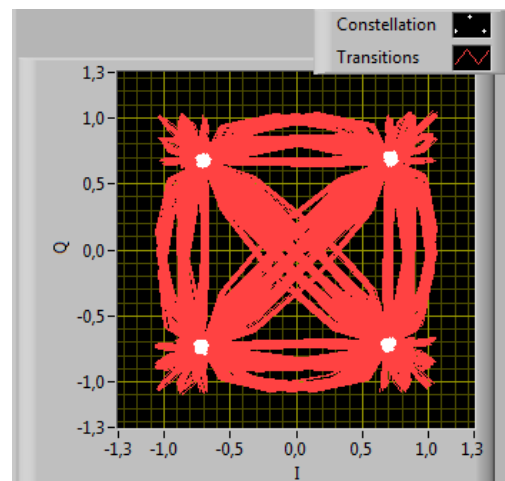
B. Pengukuran Diagram Konstelasi pada MIMO OFDM

Pengujian MIMO OFDM 2x2 menggunakan USRP menggunakan dua antenna pada sisi pengirim dan dua antenna di sisi penerima. Pada pengujian ini modulasi yang digunakan adalah 4-QAM, frekuensi *carrier* yang digunakan adalah 900 MHz, dan *rate* yang digunakan adalah 50KS/s. *Delay* antara pengiriman dan penerimaan sebesar 0,01 detik. Diberikan

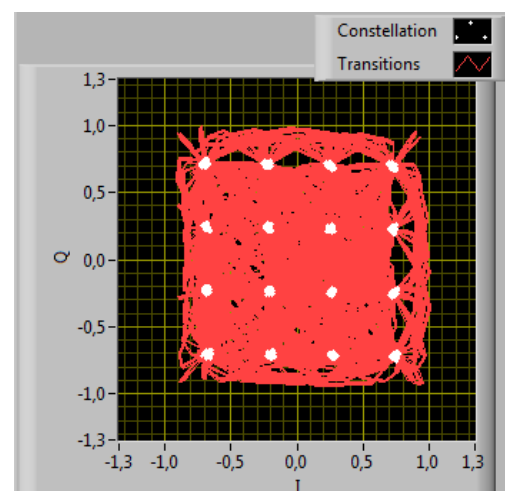
delay karena penerima tidak dapat langsung menerima data yang dikirim. Diagram konstelasi 4-QAM pada sisi penerima pada antenna 1 ditunjukkan pada Gbr. 8 dan diagram konstelasi 4-QAM pada sisi penerima pada antenna 2 ditunjukkan pada Gbr. 9.



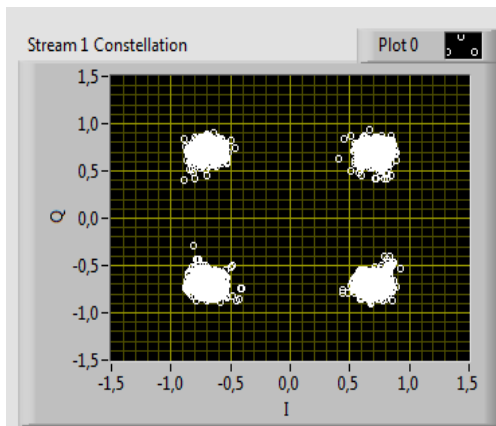
Gbr. 5 Diagram konstelasi OFDM dengan modulasi BPSK.



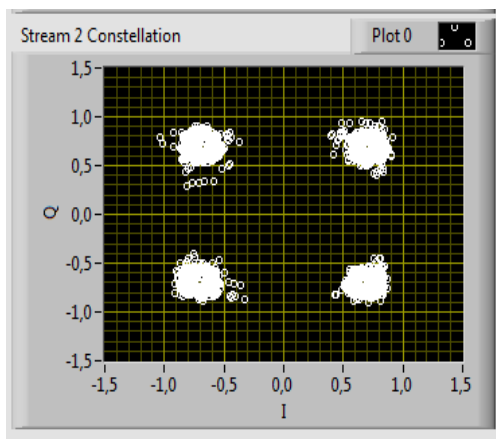
Gbr. 6 Diagram konstelasi OFDM dengan modulasi 4-QAM.



Gbr. 7 Diagram konstelasi OFDM dengan modulasi 16-QAM.

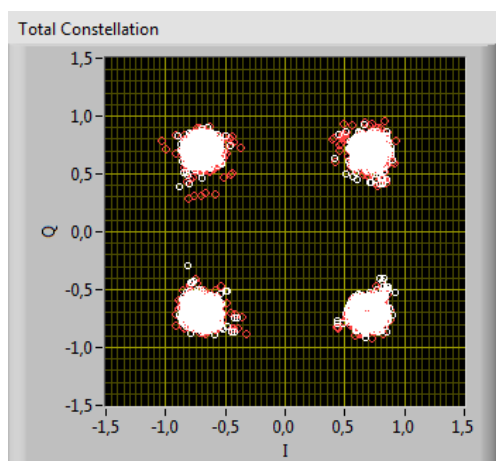


Gbr. 8 Diagram konstelasi 2x2 MIMO OFDM 4-QAM pada sisi penerima antenna 1.



Gbr. 9 Diagram konstelasi 2x2 MIMO OFDM 4-QAM pada sisi penerima antenna 2.

Kemudian setelah digabungkan, maka hasil diagram konstelasi yang dihasilkan ditunjukkan pada Gbr. 10. Diagram konstelasi yang dihasilkan sudah baik.

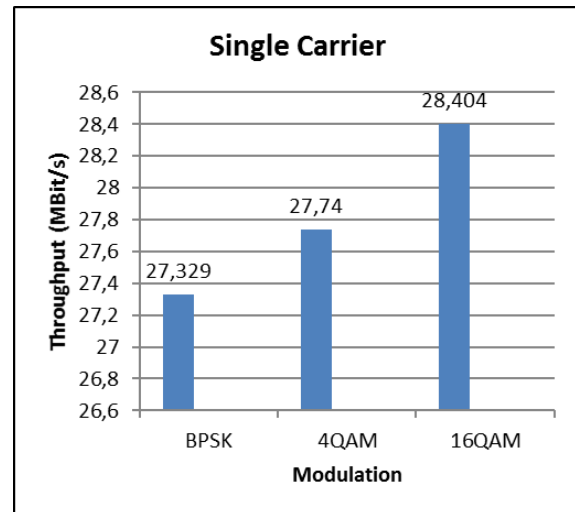


Gbr. 10 Diagram konstelasi 4-QAM setelah digabungkan.

C. Pengukuran Throughput

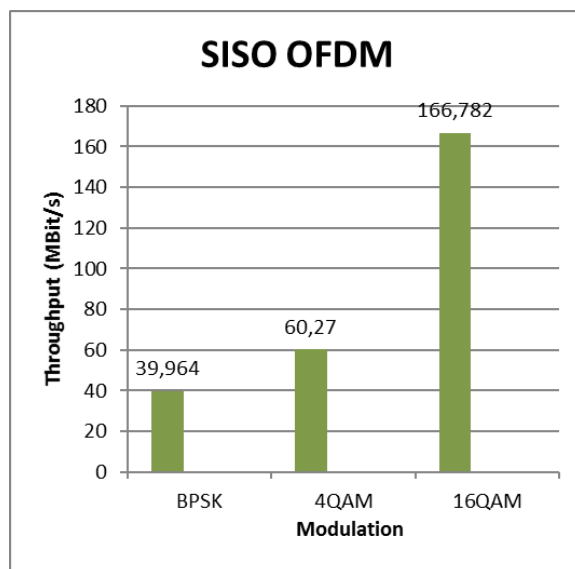
Pada pengujian selanjutnya, dilakukan pengukuran *throughput* pada sistem *single carrier* dengan modulasi BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM.

4-QAM, dan 16-QAM. *IQ Rate* yang digunakan adalah 1 Msample/s. Hasil *throughput* ditunjukkan pada Gbr. 11. Berdasarkan diagram batang pada Gbr. 11, dapat dilihat bahwa *throughput* pada *single carrier* dengan modulasi 16-QAM lebih tinggi daripada ketika digunakan modulasi BPSK dan 4-QAM. Ketika digunakan modulasi BPSK, nilai *throughput* adalah 27,329 Mbit/s, sedangkan dengan modulasi 4-QAM, nilai *throughput* sebesar 27,74 Mbit/s, dan ketika digunakan modulasi 16-QAM, *throughput* meningkat menjadi 28,404 Mbit/s.



Gbr. 11 *Throughput* sistem *single carrier* dengan modulasi BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM.

Pengujian selanjutnya adalah pengukuran *throughput* pada sistem SISO OFDM dengan modulasi BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM. *Throughput* hasil pengukuran ditunjukkan pada Gbr. 12.

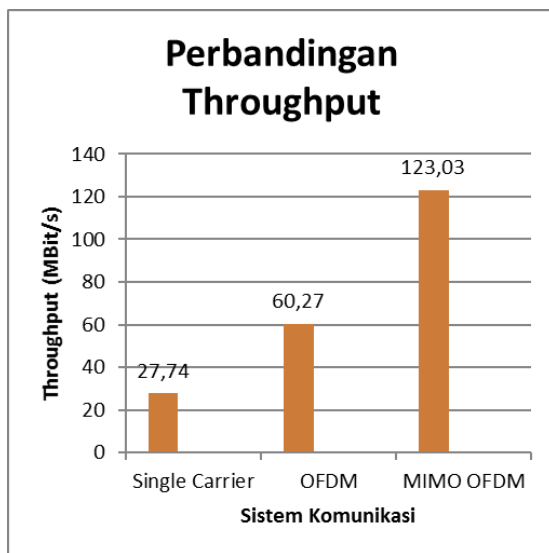


Gbr. 12 *Throughput* sistem OFDM dengan modulasi BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM.

Pola pengukuran *throughput* sistem OFDM adalah seperti halnya pengukuran *throughput* pada *single carrier*, yaitu

throughput tertinggi terjadi jika digunakan modulasi 16-QAM dan *throughput* terendah terjadi ketika digunakan modulasi BPSK. Namun, nilai *throughput* yang dicapai saat digunakan sistem OFDM jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *throughput* pada *single carrier*. Ketika digunakan modulasi BPSK, nilai *throughput* sebesar 39,964 Mbit/s, ketika digunakan modulasi 4-QAM, nilai *throughput* adalah 60,27 Mbit/s, sedangkan ketika digunakan modulasi 16-QAM, *throughput* meningkat menjadi 166,782 Mbit/s.

Pengukuran selanjutnya adalah membandingkan *throughput* antara *single carrier*, SISO OFDM, dan MIMO OFDM 2x2 dengan modulasi yang sama, yaitu 4-QAM.



Gbr. 13 *Throughput* sistem *single carrier*, OFDM, dan MIMO OFDM dengan modulasi 4-QAM.

TABEL II
PERBANDINGAN *THROUGHPUT* SECARA PERHITUNGAN DAN PENGUKURAN

Sistem Komunikasi	<i>Throughput</i> Perhitungan	<i>Throughput</i> Pengukuran	Persentase Kesalahan
SISO OFDM BPSK	30,703 Mbps	30,087 MBps	2,1%
SISO OFDM 4-QAM	61,607 Mbps	60,270 MBps	2,2%
SISO OFDM 16-QAM	122,814 Mbps	119,189 MBps	2,95%
MIMO OFDM 4-QAM	123,214 Mbps	123,033 MBps	0,15%

Hasil perbandingan *throughput* ditunjukkan pada Gbr. 13. Tampak bahwa dengan menggunakan modulasi yang sama, *throughput* pada sistem komunikasi MIMO OFDM mengalami kenaikan yang signifikan dibandingkan dengan sistem komunikasi *single carrier* dan SISO OFDM. Ketika digunakan sistem komunikasi *single carrier*, nilai *throughput* adalah 27,74 Mbit/s, pada sistem komunikasi SISO OFDM nilai *throughput* sebesar 60,27 Mbit/s, sedangkan ketika digunakan sistem komunikasi MIMO OFDM 2x2, *throughput* mengalami kenaikan yang signifikan, yaitu sebesar 123,03 Mbit/s.

Hasil pengukuran *throughput* menggunakan USRP ini dibandingkan dengan perhitungan *throughput* menggunakan

(1). Tabel II menyajikan perbandingan nilai *throughput* hasil pengukuran dan perhitungan. Berdasarkan Tabel II, dapat dilihat bahwa hasil pengukuran dengan menggunakan USRP mendekati hasil perhitungan dengan persentase kesalahan kurang dari 3%.

IV. KESIMPULAN

Pada makalah ini dilakukan implementasi sistem komunikasi *single carrier*, sistem komunikasi SISO OFDM, dan sistem komunikasi MIMO OFDM 2x2 dengan menggunakan modulasi BPSK, 4-QAM, dan 16-QAM. Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis *throughput*, dapat disimpulkan bahwa *throughput* tertinggi dicapai ketika digunakan modulasi 16-QAM dan *throughput* terendah ketika digunakan modulasi BPSK. Pada sistem komunikasi *single carrier*, saat digunakan modulasi BPSK, nilai *throughput* adalah 27,329 Mbit/s, saat digunakan modulasi 4-QAM nilai *throughput* sebesar 27,74 Mbit/s, dan ketika digunakan modulasi 16-QAM *throughput* meningkat menjadi 28,404 Mbit/s. Begitu juga dengan sistem komunikasi menggunakan SISO OFDM, ketika digunakan modulasi BPSK, nilai *throughput* sebesar 39,964 Mbit/s, ketika digunakan modulasi 4-QAM nilai *throughput* sebesar 60,27 Mbit/s, sedangkan ketika digunakan modulasi 16-QAM *throughput* meningkat menjadi 166,782 Mbit/s.

Jika dibandingkan *throughput* pada sistem komunikasi *single carrier*, SISO OFDM, dan MIMO OFDM 2x2, nilai *throughput* pada sistem komunikasi MIMO OFDM 2x2 lebih tinggi daripada pada SISO OFDM dan *single carrier*. Dengan menggunakan modulasi yang sama, yaitu 4-QAM, *throughput* pada sistem komunikasi MIMO OFDM mengalami kenaikan yang signifikan dibandingkan dengan sistem komunikasi *single carrier* dan SISO OFDM. Ketika digunakan sistem komunikasi *single carrier*, nilai *throughput* adalah 27,74 Mbit/s, pada sistem komunikasi SISO OFDM, nilai *throughput* sebesar 60,27 Mbit/s, sedangkan dengan sistem komunikasi MIMO OFDM 2x2, *throughput* mengalami kenaikan yang signifikan, yaitu sebesar 123,03 Mbit/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi yang telah mendanai penelitian ini melalui program Penelitian Dosen Pemula 2018.

REFERENSI

- [1] E. Marpanaji, B. Riyanto, A. Z.R. Langi, A. Kurniawan, "Pengukuran Unjuk Kerja Modulasi GMSK pada Platform Software-Defined Radio (SDR)", *Jurnal Telkomnika*, Vol. 5, No. 2, hal. 73-84, Agustus 2007.
- [2] Z. Tong, M. S. Arifianto, C. F. Liao, "Wireless Transmission using Universal Software Radio Peripheral", *Proceeding of the 2009 International Conference on Space Science and Communication*, 2009, hal. 19-23.
- [3] Suwadi, Titiek Suryani, Ida Anisah, "Performance Analysis of Cooperative Communication Systems Using Wireless Open Access Research Platform for Indoor and Outdoor Environment", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 83. No. 3, hal. 474-481, Januari 2016.
- [4] Gordon L. Stüber, John R. Barry, Steve W. McLaughlin, Ye(Geoffrey) Li, Mary Ann Ingram, dan Thomas G. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM Wireless Communication", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 2, hal. 271-294, February, 2004

- [5] Martianda Erste A, P. Handayani, G. Hendratoro, "Double-Directional Outdoor MIMO Channel Measurement at 2.4 GHz Using SDR", *Proc. of 2016 Int. Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2016, hal. 255-260.
- [6] A. Y. F. Youssef, K. M. H. Hassan, M. G. Mostafa, M. T. Saad, M. Khairy, "Implementation of a Wireless OFDM System Using USRP2 and USRP N210 Kits", Graduation Project Report, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt, July 2012.
- [7] I. Kardaras, A. Liavas, "Software-Defined Radio Implementation of an OFDM Link", M.Sc. thesis, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2010.
- [8] A. Kaschub, C. Muller, M. Proebster, T. Werthmann, M. Schmidt, "Design and Implementation of an OFDM-based Communication System for the GNU Radio Platform", Master thesis, Institut fur Kommunikationsnetze und Rechnersysteme, Universitat Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2009.
- [9] A. Karnik, "Performance of TCP Congestion Control with Rate Feedback: TCP/ABR and Rate Adaptive TCP/IP," M. Eng. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Jan. 1999.
- [10] J. Padhye, V. Firoiu, dan D. Towsley, "A Stochastic Model of TCP Reno Congestion Avoidance and Control," Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, CMPSCI Tech., hal. 99-02, 1999.
- [11] Hendy B., I Gede P.A., Amang S., "Implementation of Digital Modulation with Single Carrier and Multi Carrier OFDM Schemes Using USRP", *Proceedings of International Electronics Symposium (IES)*, 2014, hal. 134-139.
- [12] Prasetyono Hari M., Ardhan E.P., Gatot K., "Evaluasi VoIP Menggunakan Mean Opinion Score pada Jaringan Testbed-WiMAX Berbasis IEEE 802.16-2004", *JNTETI*, Vol. 4, No. 4, hal. 228-235, November 2015.