

**ANALISIS PERBANDINGAN MODULASI BPSK, QPSK, 8-PSK,
DENGAN DCO-OFDM PADA KOMUNIKASI ANTARSATELIT
MENGUNAKAN TEKNOLOGI FREE SPACE OPTIC**

***COMPARATIVE ANALYSIS OF BPSK, QPSK, 8-PSK, WITH
DCO-OFDM MODULATION FOR INTERSATELLITE LINK
USING FREE SPACE OPTIC TECHNOLOGY***

Ridho Nurhuda¹, Heroe Wijanto², Brian Pamukti³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹ridhonurhuda@mail.com, ²heroe.wijanto@gmail.com, ³brianp@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Peluncuran satelit dengan membentuk konstelasi semakin masif karena kebutuhan akan data rate semakin meningkat. Penggunaan frekuensi radio pada *Inter-satellite Link* (ISL) juga semakin banyak sebagai akibat dari masifnya konstelasi satelit. Dengan resource yang terbatas membuat penggunaan frekuensi radio semakin padat. Maka dari itu, penerapan teknologi *Optical Wireless Communication* (OWC) diharapkan dapat menjadi salah satu solusi untuk mengatasi terbatasnya resource frekuensi radio.

Pada penelitian ini dilakukan simulasi ISL menggunakan teknologi OWC dengan panjang gelombang Laser 1300 nm serta jarak antarsatelit dan daya transmitter yang digunakan bervariasi. Parameter yang digunakan adalah *Link Power Budget*, *Rise Time Budget*, *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Throughput*, dan *Latency*.

Hasil yang didapat pada Tugas Akhir ini adalah nilai BER paling rendah dengan SNR yang sama terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK. Didapat nilai BER DCO-OFDM BPSK satelit LEO 1 sebesar $2,972 \times 10^{-8}$, satelit LEO 2 sebesar $7,403 \times 10^{-9}$, dan satelit LEO 3 sebesar $1,552 \times 10^{-9}$. Kemudian *Throughput* paling tinggi didapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK dengan SNR yang sama. Didapat nilai *Throughput* DCO-OFDM BPSK satelit LEO 1 sebesar 15,45 Gbps, satelit LEO 2 sebesar 15,96 Gbps, dan satelit LEO 3 sebesar 16,56 Gbps.

Kata kunci : Optical Intersatellite Link (OISL) , Modulasi, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), *Phase Shift Keying* (PSK), *Bit Error Rate* (BER).

Abstract

Satellite launches by forming a constellation are getting bigger because the need for data rate is increasing. The use of radio frequency on Intersatellite Link (ISL) is also increasing as a result of the massive constellation of satellites. With a limited resource it makes the use of radio frequency even denser. Therefore, the application of *Optical Wireless Communication* (OWC) technology is expected to be a solution to overcome the limited radio frequency resource.

In this study, a simulation of ISL was carried out using OWC technology with a laser wavelength of 1300 nm and the distance between the satellites and the transmitter power used varies. Final parameters has used are *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Throughput*, and *Latency*.

The results obtained in this Final Project is the lowest BER value with the same SNR found in DCO-OFDM BPSK modulation. BER value DCO-OFDM BPSK for LEO 1 satellite is $2,972 \times 10^{-8}$, for LEO 2 satellite is $7,043 \times 10^{-9}$, and for LEO3 satellite is $1,552 \times 10^{-9}$. Then, *Throughput* is highest in the DCO-OFDM BPSK modulation with the same SNR. Obtained *Throughput* value of BPSK DCO-OFDM for LEO 1 satellite is 15,45 Gbps, for LEO 2 satellite is 15,96 Gbps, and for LEO 2 satellite is 16,56 Gbps.

Keywords : Optical Intersatellite Link (OISL), Modulation, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), *Phase Shift Keying* (PSK), *Bit Error Rate* (BER)

1. Pendahuluan

Free Space Optic (FSO) merupakan salah satu klasifikasi dari teknologi *Optical Wireless Communication* (OWC) yang dalam mengirimkan suatu informasi menggunakan cahaya sebagai sinyal pembawa. Keunggulan teknologi FSO antara lain spektrum cahaya yang tidak terlisensi,

memberikan kecepatan yang tinggi, dan daya *transmitter* yang relatif lebih rendah. Spektrum cahaya juga tidak teregulasi oleh *International Telecommunication Union (ITU)* sehingga tidak ada batasan tertentu dalam menggunakan spektrum tersebut.

Salah satu penerapan FSO antarsatelit telah dilakukan oleh lembaga antariksa *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) atau dikenal sebagai German Aerospace Center. Satelit yang dikembangkan lembaga DLR adalah Alphasat dengan fungsi sebagai *Data Relay Satellite* dengan menggunakan teknologi FSO untuk komunikasi dengan satelit lain serta menggunakan *radio frequency* untuk komunikasi dengan ground segment. *Link optical ISL* yang dihasilkan satelit Alphasat dapat menjangkau hingga 45.000 km. Proses komunikasi *optical ISL* pertama yang dilakukan oleh satelit Alphasat yaitu komunikasi dengan satelit Sentinel-1 yang berada pada orbit LEO dengan data berupa observasi bumi. Komunikasi antar kedua satelit tersebut dapat meraih kecepatan pengiriman data sebesar 1,8 Gbps untuk *optical ISL* dan 600 Mbps untuk *radio frequency*.

Dengan melihat hasil yang diterapkan pada *optical ISL* tersebut, masih memungkinkan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut. Maka dari itu, pada Tugas Akhir ini mensimulasikan perbandingan modulasi BPSK, QPSK, 8-PSK, dan DCO-OFDM. Simulasi tersebut menggunakan beberapa skenario dan mengevaluasi performansi dari beberapa parameter seperti SNR dan BER.

2. Dasar Teori

2.1 Inter-Satellite Link (ISL)

Inter-satellite Link (ISL) merupakan suatu komunikasi langsung antar dua atau lebih satelit yang saling mengirimkan data. ISL diperlukan karena posisi suatu satelit tidak selalu berada dalam jangkauan stasiun bumi tujuan sehingga digunakan hubungan komunikasi dengan satelit lain untuk mengirimkan maupun menerima data. Data yang dikirim/diterima dapat berupa informasi sistem, data perhitungan, maupun *attitude control signals*.

Secara umum, blok sistem terdiri dari *transmitter*, *receiver*, dan kanal *free space*. Pada bagian *transmitter* terdapat beberapa proses antara lain proses modulasi untuk menumpangkan sumber data kedalam sinyal pembawa, kemudian *data encryption channel encoding*, dan *scrambling* yang bertujuan menjamin keamanan saat data ditransmisikan, dan pada bagian terakhir terdapat *optical transmitter* yang berupa laser. Pada bagian *receiver* yaitu *photodetector* yang berfungsi untuk mengubah sinyal cahaya menjadi sinyal listrik, proses demodulasi untuk memisahkan data dari sinyal pembawa.

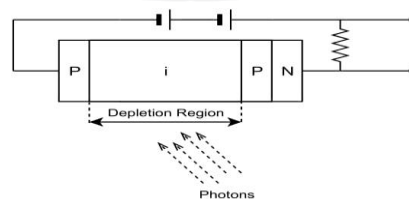
2.2 LASER

Laser merupakan akronim dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Laser adalah komponen elektronika yang dapat memancarkan cahaya jika dialiri arus listrik bias maju. Dengan menggunakan laser, cahaya yang berpropagasi akan menghasilkan sudut divergensi yang relatif kecil dibandingkan dengan LED sehingga lebar berkas cahaya yang dihasilkan sempit.

Laser mempunyai cara kerja berdasarkan prinsip emisi terstimulasi seperti pada. Asumsikan terdapat dua level energi yaitu E_1 dan E_2 ($E_1 < E_2$). Suatu energi foton eksternal sebesar $h\nu = E_2 - E_1$ merangsang/menstimulasi elektron yang berada pada E_2 menuju E_1 . Sehingga terdapat proses perubahan energi. Perubahan energi dilepaskan sebagai foton dengan fasa dan frekuensinya sama dengan foton eksternal.

2.3 Avalanche Photodetector

Photodetector merupakan suatu komponen/perangkat yang digunakan untuk mengubah sinyal cahaya menjadi sinyal listrik yang mempunyai prinsip kerja efek fotolistrik. Jenis *Photodetector* yang sering dijumpai yaitu *Positive intrinsic Negative (PIN) Photodetector* dan *Avalanche Photodetector (APD)*. Perbedaan mendasar antara *Photodetector PIN* dan *APD* terletak pada sensitivitasnya. Sensitivitas *photodetector APD* lebih baik dibandingkan dengan *PIN* karena terdapat proses ionisasi *Avalanche* sehingga memungkinkan adanya multiplikasi gain.



Gambar 2.1 Struktur *Avalanche Photodiode*

Terdapat struktur *photodetector* APD yang dijelaskan pada Gambar 2.2. *photodetektor* APD dialiri oleh bias mundur (*reverse bias*) yang pada bagian kutub negatif sumber dihubungkan dengan bahan semikonduktor tipe P dan bagian kutub positif sumber dihubungkan dengan bahan semikonduktor tipe N. Dalam struktur tersebut juga terdapat bagian *depletion region* yang merupakan suatu area penipisan yang disebabkan karena pertemuan P dengan N.

2.4 Modulasi Digital

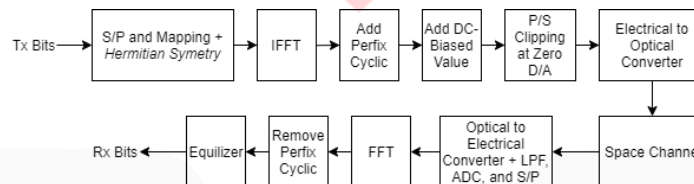
Modulasi adalah teknik pemrosesan sinyal yang melibatkan proses *switching* yang mengubah amplitudo, frekuensi, atau fasa gelombang menjadi informasi kedalam bentuk biner. Pada dasarnya, modulasi digital dibagi menjadi tiga yaitu *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), dan *Phase Shift Keying* (PSK). Persamaan sinyal input modulasi digital ditunjukkan oleh :

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_n), (n-1)T_s \leq t \leq T_s$$

dengan nilai A dan ϕ_n masing-masing merupakan amplitudo dan n^{th} fasa dari sinyal. Nilai T_s merupakan durasi dan f_c adalah frekuensi sinyal pembawa. Pada modulasi M-PSK, terdapat M simbol kemungkinan fasa yang dipresentasikan oleh sinyal pembawa. Aliran bit masing-masing dibagi kedalam b -bit blok. Setiap simbol pada sinyal pembawa merupakan sinyal sinusoid yang mempunyai jarak spasi antar simbol $2\pi/M$.

2.5 DC biased Orthogonal Frequency Division Multiplexing (DCO-OFDM)

Secara umum penerapan metode OFDM pada OWC diperlukan suatu blok yang disebut *Hermitian Symetry*. Blok *Hermitian Symetry* memungkinkan untuk menghasilkan sinyal keluaran bernilai *real*. Pada DCO-OFDM, sinyal akan ditambahkan DC *bias* sehingga sinyal bersifat unipolar.



Gambar 2.2 OFDM

Sistem kerja DCO-OFDM dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3. Setelah sinyal informasi Tx Bits diproses hingga ditambahkan DC bias, sinyal menjadi masukan oleh blok *Electrical to Optical Converter* yang berupa sumber cahaya (LED maupun laser). Kemudian pada bagian *receiver*, cahaya diubah kembali menjadi listrik pada blok *Optical to Electrical Converter* dan diproses hingga menghasilkan sinyal Rx Bits.

2.7 Link Budget Satelit

Dalam merencanakan suatu *link* komunikasi, diperlukan estimasi kebutuhan daya khususnya komunikasi OISL. *Link Budget* satelit merupakan perhitungan estimasi kebutuhan daya yang bertujuan untuk memastikan level daya penerimaan lebih besar atau sama dengan level *threshold* (batas daya minimal). Perhitungan *Link Budget* satelit dapat digunakan untuk menentukan jarak maksimal komunikasi OISL. Total daya terima pada *receiver* didefinisikan dalam :

$$P_r = P_T \eta_T \eta_r \left(\frac{\lambda}{4\pi Z} \right)^2 G_T G_r L_T(\theta_T) L_r(\theta_r)$$

dengan P_T merupakan daya *transmitter* (Watt), η_T dan η_r masing-masing merupakan efisiensi *transmitter* dan *receiver*, λ merupakan panjang gelombang *transmitter* (nm), Z adalah jarak antarsatelit (Km), G_T dan G_r masing-masing merupakan *gain transmitter* dan *receiver*, dan $L_T(\theta_T)$ dan $L_r(\theta_r)$ masing-masing merupakan *loss pointing factor transmitter* dan *receiver*.

2.8 Rise Time Budget Satelit

RTB merupakan perhitungan dispersi/pelebaran pulsa yang terjadi pada saat proses pengiriman sinyal. Analisis terhadap RTB perlu dilakukan agar dapat menentukan limitasi atau batasan dispersi suatu komunikasi optik. Parameter yang terdapat pada RTB antara lain *transmitter riset time*, *group-velocity dispersion* (GVD) *rise time*, *modal dispersion rise time*, dan *receiver rise time*. RTB dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$t_{sys} = [t_{tx}^2 + t_{mod}^2 + t_{GVD}^2 + t_{rx}^2]^{\frac{1}{2}}$$

dengan t_{tx}^2 merupakan *riset time* dari pengirim, t_{mod}^2 merupakan *rise time* modus, t_{GVD}^2 merupakan karakteristik dispersi medium, dan t_{rx}^2 merupakan *riset time* dari penerima.

2.9 Signal to Noise Ratio

SNR merupakan nilai yang menunjukkan perbandingan antara besar daya yang dikirim dengan besar noise. Nilai SNR menggambarkan kualitas suatu kanal komunikasi, semakin tinggi nilai SNR

maka semakin baik kualitas kanal komunikasi tersebut. Kualitas kanal yang baik memungkinkan proses komunikasi suatu *link* dapat mencapai kecepatan data yang tinggi dan mendapatkan nilai probabilitas kesalahan yang rendah. nilai SNR dapat didefinisikan dengan :

$$SNR = \frac{I_p^2}{N_T} = \frac{(RMP_r)^2}{\sigma_q^2 + \sigma_d^2 + \sigma_{bg}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{in}^2}$$

dengan R adalah nilai responsivitas *photodetector*, M merupakan nilai multiplikasi, P_r adalah nilai daya terima *photodetector*, σ_q^2 merupakan nilai *shot noise*, σ_d^2 adalah nilai *dark current*, σ_{bg}^2 adalah nilai *background radiation*, σ_{th}^2 merupakan nilai dari *thermal noise*, dan σ_{in}^2 adalah nilai *intensity noise*.

2.10 Bit Error Rate

BER merupakan jumlah kesalahan bit per satuan waktu. Pada sistem telekomunikasi, BER adalah indikasi seberapa sering data harus ditransmisikan ulang karena kesalahan. Apabila ditunjukkan nilai BER suatu sistem sebesar 10^{-9} , artinya terdapat kesalahan paling besar satu bit dalam pengiriman data sebanyak 1.000.000 bit. BER yang tinggi mengartikan bahwa laju data suatu sistem telekomunikasi lebih lambat dan menyebabkan waktu transmisi secara keseluruhan lebih lambat untuk jumlah data yang ditransmisikan. BER dapat ditekan dengan cara penggunaan skema modulasi yang lambat dan menggunakan skema *line coding*. Perhitungan BER modulasi M-PSK dan DCO-OFDM yang didefinisikan dalam :

$$BER = \left(\sqrt{2k \frac{E_b}{N_0} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)} \right)$$

$$BER_{DCO-OFDM} = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M} \log_{2\sqrt{M}}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3SNR}{2(M-1)}} \right)$$

dengan nilai $k = \log_2 M$ dan $\frac{E_b}{2N_0}$ merupakan nilai SNR.

2.11 Throughput

Throughput merupakan jumlah data yang berhasil diterima oleh tujuan selama waktu interval tertentu yang diukur dalam satuan *bit per second* (bps). *Throughput* menggambarkan *bandwidth* yang aktual pada suatu kondisi dan waktu dalam suatu komunikasi satelit. *Throughput* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Channel Capacity C* yang didefinisikan sebagai :

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

dengan *B* merupakan *bandwidth* dan SNR merupakan nilai *Signal to Noise Ratio*.

2.12 Latency

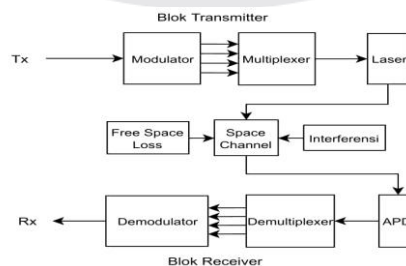
Latency merupakan salah satu parameter dalam komunikasi satelit yang menghitung waktu yang dibutuhkan untuk merambatkan hingga memproses sinyal dari sumber ke tujuan. Komponen yang menyusun keseluruhan *Latency* antara lain *Propagation Latency*, *Transmission Latency*, dan *Processing Latency*. total *Latency* diperoleh dengan persamaan sebagai berikut :

$$t_{latency} = t_{propagation\ latency} + t_{transmission\ latency} + t_{processing\ latency}$$

3. Perancangan Sistem

3.1 Blok Diagram Sistem

Secara umum blok diagram pada Tugas akhir ini dibagi menjadi 3 blok bagian, yaitu blok *transmitter* sebagai pengirim data, blok kanal dengan jenis kanal LOS, dan blok *receiver* untuk menerima data.

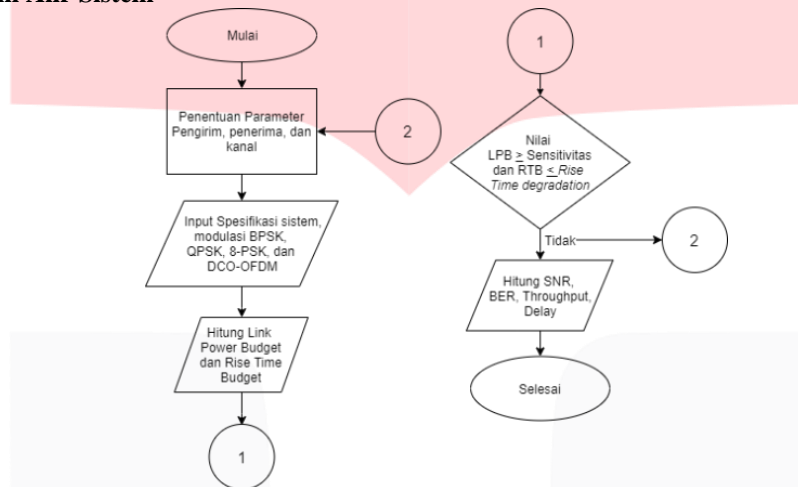


Gambar 3.1 Blok Diagram Optical ISL

Berdasarkan pada gambar 3.1, terdapat beberapa komponen yang menyusun setiap blok. Komponen awal penyusun blok *transmitter* yaitu modulator. Teknik modulasi yang digunakan antara lain BPSK, QPSK, 8-PSK, dan DCO-OFDM. Selanjutnya terdapat blok *multiplexer* yang mempunyai cara kerja dengan meyalurkan satu atau lebih sinyal informasi secara bersamaan melalui satu saluran.

Kemudian terdapat blok laser yang berfungsi sebagai *light source*. Cahaya laser yang dihasilkan akan berpropagasi dan menghasilkan sudut divergensi yang sangat kecil sehingga lebar berkas cahaya relatif sempit sehingga penyaluran energi terfokus pada satu titik. Selanjutnya terdapat blok kanal. Jenis kanal yang digunakan adalah kanal LOS yaitu kondisi pengirim dan penerima saling berhadapan dalam satu garis tanpa adanya penghalang. Kemudian untuk komponen penyusun blok *receiver* terdapat *photodetector* dengan jenis *Avalanche Photodiode* (APD). Kemudian terdapat blok *demultiplexer* yang mempunyai proses kerja kebalikan dari *multiplexer*, yaitu menggabungkan kembali sinyal informasi pada suatu saluran. Terakhir terdapat blok *demodulator* yang berfungsi memisahkan sinyal informasi dari sinyal pembawa.

3.2 Diagram Alir Sistem



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian *optical ISL*

Gambar 3.2 menjelaskan tentang proses penelitian dalam Tugas Akhir ini. Hal pertama yang dilakukan adalah memasukkan spesifikasi sistem dan skema modulasi yang pada penelitian ini menggunakan modulasi BPSK, QPSK, 8-PSK, dan DCO-OFDM. Kemudian melakukan perhitungan parameter akhir BER, SNR, *Throughput*, dan *Latency*.

3.3 Spesifikasi Sistem

Percobaan pada simulasi sistem OISL dengan melihat perbandingan setiap modulasi memiliki beberapa parameter ditunjukkan pada Tabel 1

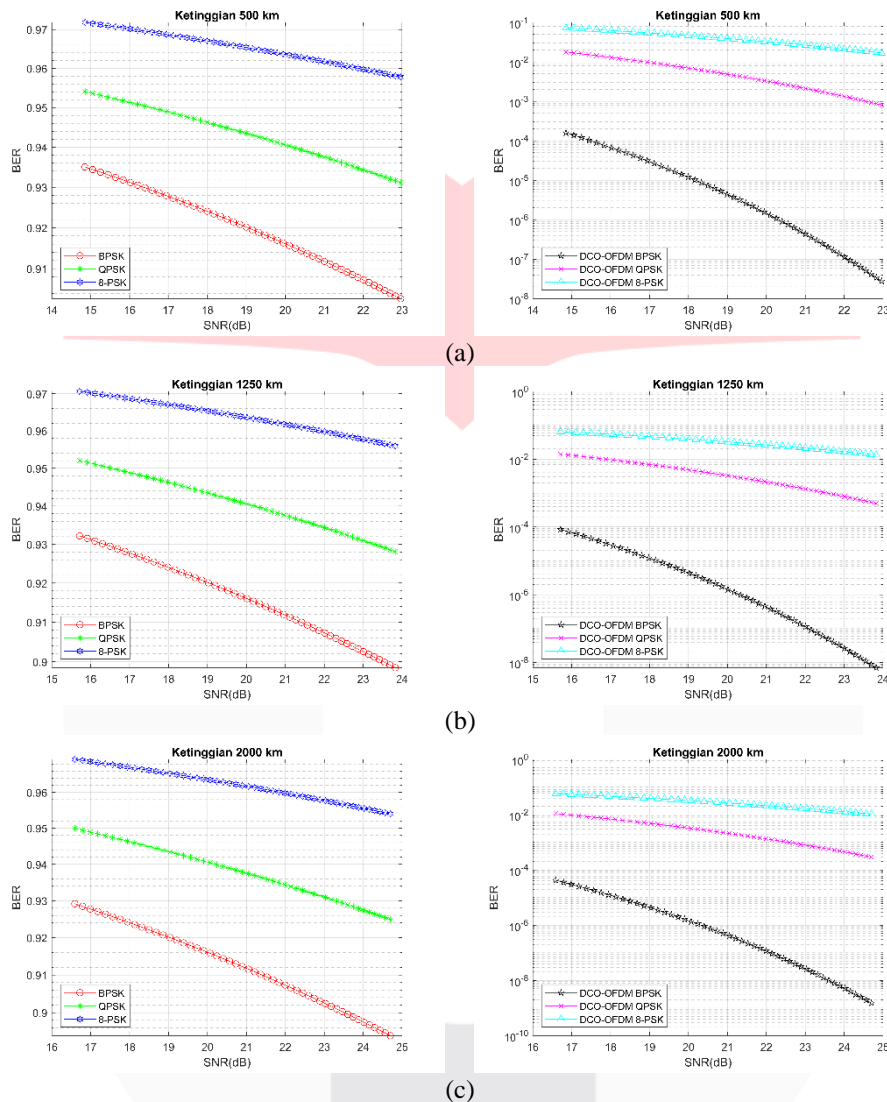
Tabel 3.1 Spesifikasi Sistem

Parameter		Nilai
Transmitter	Daya	1-1,5 Watt
	Panjang Gelombang	1300 nm
	Efisiensi	1
	Diameter Laser	0,5 m
Kanal	Background Radiation	<i>Sun & Sky Irradiance</i>
Receiver	Jenis	APD Ga
	Efisiensi	0,7
	Sensitivitas	-61 dB
	Multiplikasi	14
	Diameter Detektor	0,5 m
Lain-lain	Modulasi	BPSK, QPSK, 8-PSK, DCO OFDM
	CMRR	25 dB
	OBPF	1×10^{-3}
	Field of View	0,6

4 Hasil Simulasi dan Analisis

4.1 Analisis BER terhadap SNR

Dalam analisis ini, perbandingan antara BER terhadap SNR berdasarkan ketinggian satelit LEO serta jenis modulasi. Nilai SNR ditunjukkan pada sumbu x dan BER ditunjukkan pada sumbu y. Nilai SNR yang dihasilkan ada pada rentang 4,41 dB sampai 11,82 dB. Modulasi yang dibandingkan antara lain BPSK, QPSK, 8-PSK, DCO-OFDM BPSK, DCO-OFDM QPSK, dan DCO-OFDM 8-PSK.



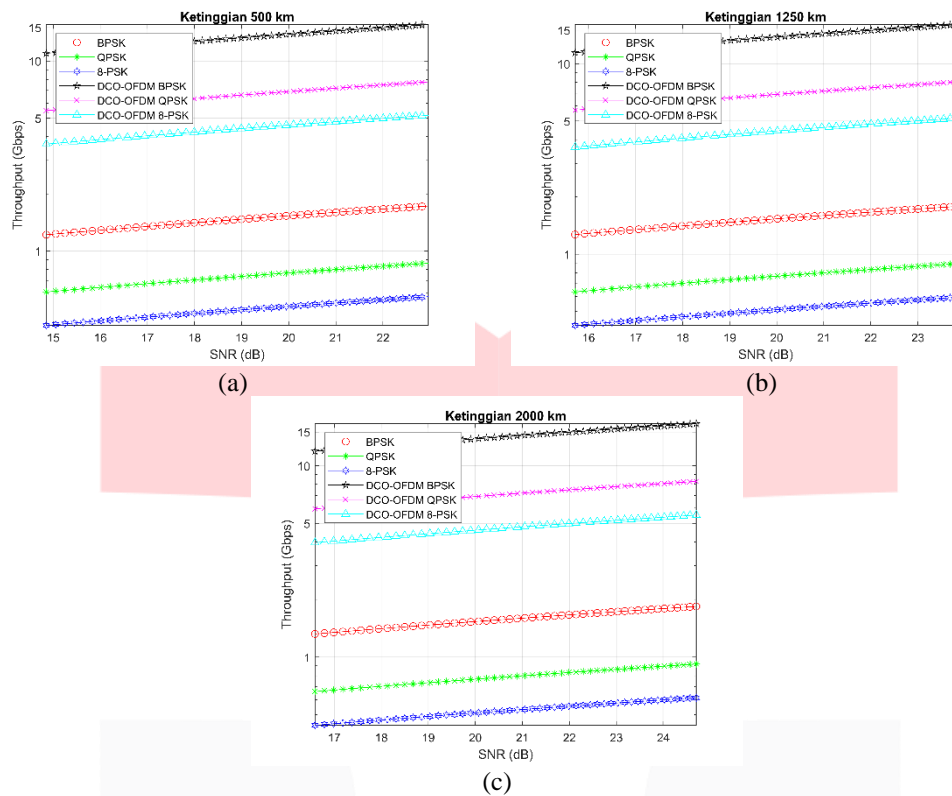
Gambar 4.1 Perbandingan BER terhadap SNR ketinggian : (a) 500 km, (b) 1250 km, dan (c) 2000 km

Pada gambar 4.1 (a), jenis modulasi yang dibandingkan memberikan gambaran bahwa apabila nilai SNR semakin besar, nilai BER semakin rendah. nilai BER paling tinggi terdapat pada modulasi 8-PSK yaitu 0,9719 dan nilai BER paling rendah terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK yaitu $2,972 \times 10^{-8}$. Gambar 4.1 (b) diketahui bahwa dengan nilai maksimum yang sama, nilai BER paling tinggi terdapat pada modulasi 8-PSK yaitu 0,970 dan nilai BER paling rendah terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK yaitu $8,447 \times 10^{-5}$. Gambar 4.1 (c) nilai BER paling tinggi terdapat pada modulasi 8-PSK yaitu 0,954 dan nilai BER paling rendah terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK yaitu $4,201 \times 10^{-5}$.

4.2 Analisis Throughput terhadap SNR

Pada analisis *Throughput* terhadap SNR, perbandingan dilakukan berdasarkan ketinggian satelit LEO dan jenis modulasi dengan sumbu x adalah nilai *Throughput* dan sumbu y adalah nilai

SNR. Modulasi yang dibandingkan antara lain BPSK, QPSK, 8-PSK, DCO-OFDM BPSK, DCO-OFDM QPSK, dan DCO-OFDM 8-PSK.

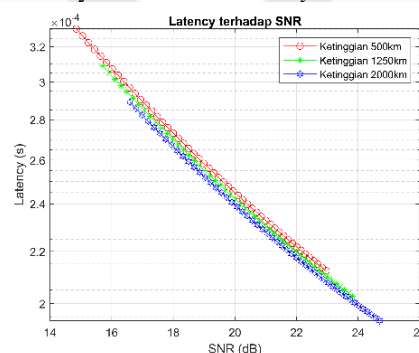


Gambar 4.2 Perbandingan SNR terhadap BER : (a) LEO 1, (b) LEO 2, dan (c) LEO 3

Pada Gambar 4.2 (a) dapat dinyatakan bahwa pada nilai maksimal yang sama, nilai *Throughput* terbesar terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK yaitu 15,45 Gbps dan nilai *Throughput* terkecil terdapat pada modulasi 8-PSK yaitu 0,57 Gbps. Gambar 4.2 (b) dapat diketahui bahwa pada nilai maksimal yang sama, nilai *Throughput* terbesar terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK yaitu 15,96 Gbps dan nilai *Throughput* terkecil terdapat pada modulasi 8-PSK yaitu 0,59 Gbps. Gambar 4.2 (c) menjelaskan bahwa pada saat nilai maksimal yang sama, nilai *Throughput* terbesar terdapat pada modulasi DCO-OFDM BPSK yaitu 11,9 Gbps dan nilai *Throughput* terkecil terdapat pada modulasi 8-PSK yaitu 0,613 Gbps.

4.3 Analisis Latency

Pada analisis *Latency*, perbandingan dilakukan berdasarkan ketinggian nilai SNR dengan sumbu x adalah nilai SNR dan sumbu y adalah nilai *Latency*.



Gambar 4.2 Perbandingan *Latency* terhadap SNR

Berdasarkan analisis pada Gambar 4.2, untuk satelit LEO 1 dengan ketinggian 500 km menghasilkan *Latency* sebesar 0,3307 ms sampai 0,2123 ms. Kemudian untuk satelit LEO 2 dengan ketinggian 1250 km, *Latency* yang dihasilkan adalah 0,309 ms sampai 0,2027 ms. Dan untuk satelit LEO 3 dengan ketinggian 2000 km, *Latency* yang dihasilkan sebesar 0,289 ms sampai 0,1938 ms.

5. Kesimpulan

1. Berdasarkan analisis BER berdasarkan SNR, karena nilai SNR menggambarkan perbandingan antara rasio sinyal dengan *noise* sehingga apabila nilainya semakin tinggi, probabilitas kesalahan/nilai BER semakin rendah. Hal tersebut dibuktikan saat ketinggian dan modulasi yang sama, pada komunikasi satelit LEO 1 dan jenis Modulasi DCO-OFDM BPSK, nilai BER minimum dan maksimum adalah $2,972 \times 10^{-8}$ dan $1,59 \times 10^{-4}$.
2. Kemudian berdasarkan syarat nilai BER, jenis modulasi yang mempunyai nilai BER $\geq 10^{-6}$ dapat mengalami ketidakstabilan pada saat terjadi transmisi data karena nilai BER yang diatas batas maksimal yang ditentukan.
3. Dalam segi analisis perbandingan *Throughput* terhadap SNR, pada ketinggian dan modulasi yang sama, besar nilai *Throughput* berbanding lurus dengan SNR. Apabila nilai SNR semakin tinggi, maka nilai *Throughput* juga semakin tinggi. Sebaliknya, apabila nilai SNR semakin rendah, maka nilai *Throughput* juga semakin rendah. Hal tersebut dapat dibuktikan pada komunikasi satelit LEO 1 dan jenis Modulasi BPSK, besar *Throughput* minimum adalah 0,60 Gbps dan besar *Throughput* maksimum adalah 0,85 Gbps.
4. Dalam segi perbandingan antar modulasi, penggunaan DCO-OFDM berpengaruh pada nilai BER dengan nilai SNR yang sama. Terdapat penurunan nilai probabilitas kesalahan pada modulasi yang disematkan DCO-OFDM dibandingkan dengan penggunaan modulasi non DCO-OFDM. Selain itu, penggunaan DCO-OFDM juga berpengaruh pada nilai *Throughput*. Terdapat peningkatan nilai *Throughput* pada modulasi yang disematkan DCO-OFDM dibandingkan dengan penggunaan modulasi non DCO-OFDM.
5. Berdasarkan analisis *latency*, apabila SNR semakin tinggi, *latency* yang dihasilkan semakin rendah. Hal tersebut dapat dibuktikan pada komunikasi satelit LEO 1, *latency* yang dihasilkan sebesar 0,3307 ms dan komunikasi satelit LEO 2 *latency* yang dihasilkan 0,289 ms.

Daftar Pustaka:

- [1] M. Stetter, U. Hugentobler, and A. Schlicht, "Optical inter-satellite links for global navigation satellite systems," in IGS Workshop, 2017
- [2] Z. Sodnik, B. Furch, and H. Lutz, "Optical intersatellite communication," IE-EE journal of selected topics in quantum electronics, vol. 16, no. 5, pp. 1051–1057, 2010.
- [3] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, Optical wireless communications : system and channel modelling with MatlabR©.CRC press, 2019.
- [4] N. S. Kopeika and J. Bordonna, "Background noise in optical communication systems," Proceedings of the IEEE, vol. 58, no. 10, pp. 1571–1577, 1970.
- [5] S. Arnon, "Performance of a laser satellite network with an optical preamplifier," JOSA A, vol. 22, no. 4, pp. 708–715, 2005.