

BAB II

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Kajian pustaka dilakukan sebagai bahan acuan pada penelitian ini dengan penelitian terkait yang sudah dilakukan sebelumnya. Dalam hal ini penelitian terkait yang mengimplementasikan teknik OFDM pada sistem Is-OWC telah dilakukan.

Pada penelitian yang ditulis oleh Mohamed Mohsen Tawfik, dkk [1] menganalisis dan mengoptimalkan performansi sistem Is-OWC antara orbit LEO dan GEO dengan jarak 45000 km untuk memperoleh Qfaktor yang terbaik. Penelitian tersebut menggunakan metode *external modulated* serta *direct detection*, dan memanfaatkan penggunaan *pulse generator* pada bagian pengirim. Daya yang digunakan sebesar 2,2watt, diameter antena Tx dan Rx sebesar 20 cm, dan *pointing error angle* Tx dan Rx sebesar 0,25 μ rad. Beberapa eksperimen dilakukan pada penelitian tersebut. Eksperimen pertama menganalisis variasi *wavelength* yang digunakan, yaitu 850 nm dan 1550 nm. Hasil yang didapatkan bahwa *wavelength* 850 nm memperoleh nilai Qfaktor sebesar 4, sedangkan 1550 tidak memperoleh hasil, sehingga *wavelength* 850 dapat digunakan untuk komunikasi dengan jarak tersebut dalam sistem ini, sedangkan 1550 nm tidak bisa. Eksperimen kedua membandingkan skema *pulse generator* yang digunakan pada pengirim, yaitu NRZ dengan RZ. NRZ memperoleh Qfaktor sebesar 4,3 sedangkan RZ 3,3. Sehingga NRZ lebih baik daripada RZ. Eksperimen terakhir yaitu membandingkan tipe *photodetector* pada bagian penerima, yaitu APD dengan PIN. Melalui hasil didapatkan bahwa APD mampu menerima sinyal dengan Qfaktor sebesar 4,3 sedangkan tipe PIN tidak dapat menerima sinyal, dengan Qfaktor sebesar 0.

Penelitian yang dilakukan oleh Simran Bhogal, dkk pada tahun 2018 [3] mengatakan bahwa salah satu faktor dominan yang dapat mempengaruhi kinerja pada komunikasi *inter-satellite* adalah efek dari *multipath fading*. Sehingga teknik OFDM dapat diimplementasikan di sistem *Inter-Satellite Optical Wireless Communication* untuk meningkatkan efisiensi sistem dalam hal *bandwidth* dan *data rate*. Penelitian ini menganalisis performansi teknik OFDM jika diimplementasikan

dengan sistem Is-OWC menggunakan modulasi CPFSK pada jarak 1000 sampai 9000 km. Penelitian ini juga menganalisis besar *bit rate* yang dapat dikirim dengan memvariasikannya, sebesar 2-12 Gbps dengan *transmit power* sebesar -2 dBm. Panjang gelombang yang digunakan 1550 nm, *aperture diameter* Tx dan Rx adalah 22cm. Hasil yang didapatkan yaitu, sistem dapat bekerja dengan nilai *Q-factor* yang dapat diterima hingga jarak 8000 km menggunakan *bit rate* 10 Gbps, dimana nilai *Q-factor* yang diperoleh sebesar 6,8. Melalui hasil yang diperoleh disimpulkan bahwa peningkatan jarak dan *bit rate* berbanding terbalik dengan nilai *Q-factor* dan *received power*. Nilai *Q-factor* dan *received power* akan mengurang jika jarak dan *bit rate* ditingkatkan.

Pada jurnal yang ditulis oleh Mehtab Sing dan Jyoteesh Malhotra tahun 2019 [5] meneliti analisa performansi 400 Gbps menggunakan skema CO-OFDM berbasis Is-OWC. Penelitian tersebut menggunakan skema pengkodean *4-level phase shift keying* (PSK) dan *quadrature amplitude modulation* (QAM) untuk membandingkan performansi yang dihasilkan terhadap sistem. Parameter yang digunakan sebagai pengukur kualitas performansi yaitu *signal-to-noise ratio* (SNR), *total received power*, dan diagram konstelasi. Hasil dari penelitian tersebut mendapatkan bahwa skema pengkodean 4-QAM memiliki nilai performansi yang lebih baik dibandingkan menggunakan skema 4-PSK berdasarkan nilai SNR, *total received power*, dan diagram konstelasi, pada jarak yang 60.000 km. Pengaruh variasi parameter panjang gelombang, daya pancar, dan *receiver pointing error angle* juga diamati pada penelitian ini. Melalui hasil yang diperoleh disimpulkan bahwa performansi panjang gelombang 850 nm lebih baik daripada 1550 nm. Pada pengaruh *pointing error* dan daya pancar dilakukan pada jarak 10.000 km. *Pointing error* divariasikan sebesar 1, 3, 5 urad dan daya yang digunakan sebesar 15 dan 30 dBm. Performansi sistem akan menurun jika *pointing error angle* meningkat, namun performansi pada sistem akan meningkat jika daya pancarnya dinaikkan.

Pada penelitian Amit Gupta, dkk [10] melakukan investigasi performansi sistem Is-OWC dengan menggunakan keunggulan dari *coherent detection-quadrature phase shift keying* (CO-QPSK) untuk mitigasi efek non-linear, dengan menggunakan teknik *multiplexing* WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Daya transmit yang digunakan sebesar 30 dB dan 11 dB pada *local oscillator*.

Channel spacing juga dibandingkan pada WDM, sebesar 50 GHz dan 100 GHz. Empat pemancar QPSK digunakan pada frekuensi yang berbeda mulai dari 193.1 hingga 193.4 yang akan diteruskan ke *multiplexing* WDM 4:1, dimana tiap pemancar mengirim sebesar 100 Gbps data dan meningkatkan kapasitas sistem menjadi 400 Gbps. Parameter pengukuran yang digunakan yaitu BER dan *Q-factor*. Dari hasil observasi didapatkan bahwa, dengan mentransmisikan data yang lebih sedikit per detik, maka komunikasi jarak jauh antar orbit dapat dilakukan. Jarak tautan maksimum yang mungkin diukur dan dihitung untuk mewujudkan komunikasi tanpa kesalahan ($BER < 10^{-9}$). Melalui hasil diperoleh bahwa, pada Pada kecepatan data 40 Gbps, jarak komunikasi maksimum yang dihitung adalah 42.500 km. Setiap peningkatan dalam rentang tautan di luar nilai ini menyebabkan tingkat kesalahan meningkat. Untuk kecepatan bit 50 Gbps, 100 Gbps, dan 125 Gbps, jarak link-nya adalah 30.000, 23.000, dan 17.500 km. Kemudian Diamati bahwa kinerja sistem lebih baik dalam hal jarak saluran 100 GHz daripada 50 GHz. Panjang transmisi sistem diperpanjang hingga 40.000 km dalam hal jarak 100 GHz sementara itu membatasi hingga 37.500 km untuk jarak saluran 50 GHz.

Selanjutnya penelitian terkait pengaruh *aperture diameter* dilakukan oleh Mustafa H. Ali, dkk pada tahun 2020 [11]. Besar diameter yang digunakan yaitu 2 sampai 20 cm, menggunakan *data rate* sebesar 40 Gbps pada jarak 200 km antar satelit. Daya yang digunakan sebesar 4 mW. Penelitian ini menggunakan teknik modulasi *differential phase-shift keying* (DPSK) dengan rasio 66%, 33% dan *duobinary*. Kualitas sistem diukur dengan mengamati nilai *Q-factor* dan *bit error rate* (BER). Penelitian ini menyimpulkan teknik modulasi DPSK66 memperoleh kinerja yang lebih baik daripada DPSK33 dan *duobinary* berdasarkan nilai *Q-factor* dan BER yang diperoleh. Dimana nilai *Q-factor* tertinggi didapatkan sebesar 40,42 menggunakan modulasi DPSK66 ketika *aperture diameter* Tx dan Rx sebesar 20 cm. Kemudian kualitas dari sistem akan meningkat jika besar *aperture diameter* meningkat. Oleh karena itu, nilai *Q-factor* tertinggi didapatkan ketika *aperture diameter* sebesar 20 cm. Tabel 2.1 menunjukkan kajian Pustaka penelitian terkait.

Tabel 2.1 Kajian Pustaka Penelitian Terkait

Ref	Judul	Tujuan	Parameter	Metode	Hasil
[1]	<i>Inter-Satellite Optical Wireless Communication (IsOWC) System Analysis for Optimizing Performance between GEO and LEO Satellites.</i> (2021).	Menganalisa performasi sistem IsOWC dengan variasi parameter <i>wavelength</i> , membandingkan NRZ dengan RZ, dan <i>photodetector</i> APD dengan PIN untuk memperoleh nilai <i>Q-factor</i> maksimum pada jarak 45000 km orbit LEO/GEO	<i>Q-factor</i> , BER	<i>External modulated, Direct detection, channel coding NRZ/RZ</i>	Sistem diuji untuk dapat mengirim data sebesar 2 Gbps pada jarak 45000 km. Data dapat dikirim dengan memperoleh <i>Q-factor</i> yang lebih baik jika sistem menggunakan <i>wavelength</i> 850 nm, NRZ, dan APD.
[3]	<i>Performance Investigation of CPFSK Integrated with OFDM in Inter-satellite OWC System.</i> (2018).	Penelitian dilakukan untuk mencapai komunikasi jarak jauh berkecepatan tinggi pada sistem IsOWC dengan mengkombinasikan teknik modulasi CPFSK (<i>Continuous Phase Frequency Shift Keying Modulation</i>) dengan teknik multiplexing OFDM. Investigasi dilakukan pada nilai <i>Q-factor</i> dan total daya diterima pada jarak dan <i>bit rate</i> yang berbeda-beda.	<i>Total received power, Q-factor</i>	<i>External modulated, Direct detection, CPFSK modulation scheme, OFDM multiplexing scheme</i>	Sistem dapat bekerja dengan nilai <i>Q-factor</i> yang dapat diterima hingga jarak 8000 km dengan <i>bit rate</i> 10 Gbps, nilai <i>Q-factor</i> yang diperoleh sebesar 6,8. Peningkatan jarak dan <i>bit rate</i> berbanding terbalik dengan nilai <i>Q-factor</i> dan <i>received power</i> . Nilai <i>Q-factor</i> dan <i>received power</i> akan mengurang jika jarak dan <i>bit rate</i> ditingkatkan
[5]	<i>Modeling and Performance Analysis of 400 Gbps CO-OFDM Based Inter-Satellite Optical Wireless</i>	Mendesain dan simulasi sistem 400 Gbps CO-OFDM berbasis Is-OWC, dan membandingkan modulasi 4-PSK (<i>phase shift keying</i>) dengan 4-QAM, serta untuk melihat pengaruh	<i>Signal-to-noise ratio, total received power,</i>	<i>External modulated, coherent detection, skema modulasi 4-QAM dan 4-PSK.</i>	Skema pengkodean 4-QAM memiliki nilai yang lebih baik dibanding 4-PSK berdasarkan nilai SNR, <i>total received power</i> , dan diagram konstelasi, pada

	<i>Communication (IsOWC) System Incorporating Polarization Division Multiplexing with Enhanced Detection.</i> (2020).	parameter <i>wavelength</i> , daya kirim, dan <i>receiver pointing error angle</i> terhadap sistem.	<i>constellation diagram.</i>		jarak yang dapat ditempuh 60.000 km. Performansi sistem akan menurun jika <i>pointing error angle</i> meningkat, namun akan meningkat jika daya pancarnya dinaikkan. Performansi sistem dapat meningkat menggunakan <i>wavelength</i> 850 nm.
[10]	<i>Digital Signal Processing of 400 Gbps CO-QPSK-WDM System Over Optical Wireless Channel for Carrier Phase Estimation.</i> (2018).	Menginvestigasi keunggulan sistem CO-QPSK (<i>coherent-detection quadrature phase shift keying</i>) untuk mitigasi efek non-linear dengan menggunakan WDM (<i>wavelength division multiplexing</i>) untuk meningkatkan kapasitas data sebesar 400 Gbps, dan memperoleh jangkauan transmisi hingga beberapa ribu kilometer.	<i>Q-factor</i> , BER	<i>External modulated, coherent detection, skema modulasi QPSK, WDM multiplexing.</i>	Pada <i>data rate</i> 40 Gbps, jarak komunikasi maksimum yang dicapai adalah 42.500 km. Peningkatan jarak tersebut mengakibatkan meningkatnya <i>error rate</i> . Kinerja sistem lebih baik dalam hal jarak saluran 100 GHz daripada 50 GHz. Panjang transmisi sistem memanjang hingga 40.000
[11]	<i>Transmitter Aperture diameter Effect In 40 Gb/S Inter-Satellite Optical Wireless Communication System.</i> (2020).	Menganalisis efek <i>aperture diameter</i> pada sistem Is-OWC 40 Gbps dan perbandingan tiga modulasi yang berbeda yaitu, differential phase-shift keying (DPSK) dengan rasio 66%, 33% dan <i>duobinary</i>	<i>Q-factor</i> , BER	<i>External modulated, direct detection, modulasi DPSK 66%, 33%, dan duobinary.</i>	Kinerja terbaik berdasarkan nilai <i>Q-factor</i> dan <i>minimal BER</i> dicapai oleh DPSK 66%. Kemudian kualitas dari sistem akan meningkat jika besar <i>aperture diameter</i> meningkat.

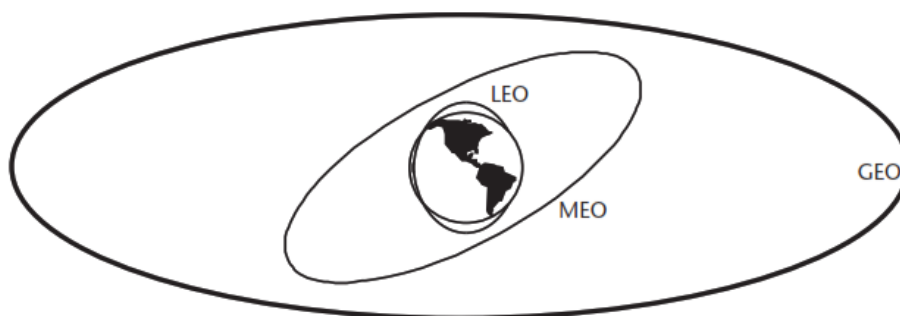
2.2 LANDASAN TEORI

2.2.1 Satelit

Satelit merupakan benda langit yang beredar mengorbit benda langit yang lebih besar dari dirinya. Satelit dibedakan menjadi dua jenis, yaitu satelit buatan dan satelit alami. Satelit alami merupakan satelit yang sudah ada di angkasa, sebagai contohnya yaitu bulan yang mengorbit bumi atau bisa dinamakan satelit alami bumi [12]. Sedangkan satelit buatan adalah benda buatan manusia yang diluncurkan ke luar angkasa yang beredar mengelilingi benda lain dan tujuan tertentu. Satelit buatan memiliki berbagai macam kegunaan, misalnya untuk keperluan telekomunikasi, spionase, penelitian, pengamatan benda-benda bumi dan luar angkasa, dan sebagainya [13]. Satelit yang berada di luar angkasa harus tetap berada pada orbit yang ditentukan agar geraknya tetap stabil. Orbit adalah tempat beredarnya satelit saat mengelilingi bumi [12].

2.2.2.1 Orbit Satelit

Jenis-jenis tempat beredarnya satelit mengelilingi permukaan bumi dinamakan dengan Orbit. Berdasarkan ketinggian dari permukaan bumi, orbit sebuah satelit dapat dibedakan menjadi 3 jenis, *Low Earth Orbit*, *Medium Earth Orbit*, dan *Geostationery Earth Orbit* [14]. Gambar 2.1 menunjukkan jenis-jenis orbit satelit.



Gambar 2.1 Orbit Satelit [15]

a. *Low Earth Orbit (LEO)*

Low Earth Orbit merupakan orbit yang paling dekat dengan bumi. Orbit LEO memiliki jarak ketinggian sejauh 500 sampai 1000 km dari permukaan bumi [16]. Satelit yang bekerja pada orbit ini biasanya diaplikasikan untuk mengamati

cuaca karena jaraknya yang dekat dengan permukaan bumi. Satelit LEO merupakan satelit yang paling banyak diluncurkan untuk berbagai macam aplikasi karena jaraknya yang rendah dan biaya yang murah. Tercatat ada lebih dari 8000 satelit terdaftar yang mengorbit bumi di orbit LEO. Keuntungan potensial utama LEO dibandingkan GEO adalah kebutuhan daya satelit yang lebih rendah, ukuran antena, waktu propagasi minimal, kemampuan *Doppler* di lokasi yang telah ditentukan, kemampuan untuk memperluas sistem, dan konstelasi yang dibangun untuk orbit LEO [17]. Beberapa sistem satelit yang bekerja pada orbit ini yaitu *Orbcom*, *Iridium*, dan *Globalstar*. *Orbcom* dirancang untuk layanan komunikasi dua arah, sedangkan *Iridium* dan *Globalstar* dirancang untuk *mobile telephony* [15].

b. *Medium Earth Orbit* (MEO)

Orbit MEO memiliki pengaplikasian yang sama seperti orbit LEO. Satelit yang paling sering digunakan di daerah ini adalah untuk navigasi, komunikasi, dan ilmu lingkungan ruang angkasa. Jarak cakupan pada orbit ini pada ketinggian sekitar 2.000 - 10.000 km [16]. Karena jarak orbit yang cukup jauh dari bumi, satelit pada orbit ini dapat mencakup area yang lebih luas dari orbit LEO, sehingga jumlah satelit yang bekerja pada orbit ini lebih sedikit dibandingkan orbit LEO. Untuk digunakan sebagai suatu sistem komunikasi global, tipe orbit ini membutuhkan satelit dengan jumlah paling sedikit yaitu 2 sampai 3 ruang orbit [17].

c. *Geostationary Earth Orbit* (GEO)

Geostationary earth orbit dapat disebut juga sebagai orbit sinkron karena satelit yang berada di orbit ini berada sejajar dengan garis khatulistiwa atau mempunyai titik lintang nol derajat.



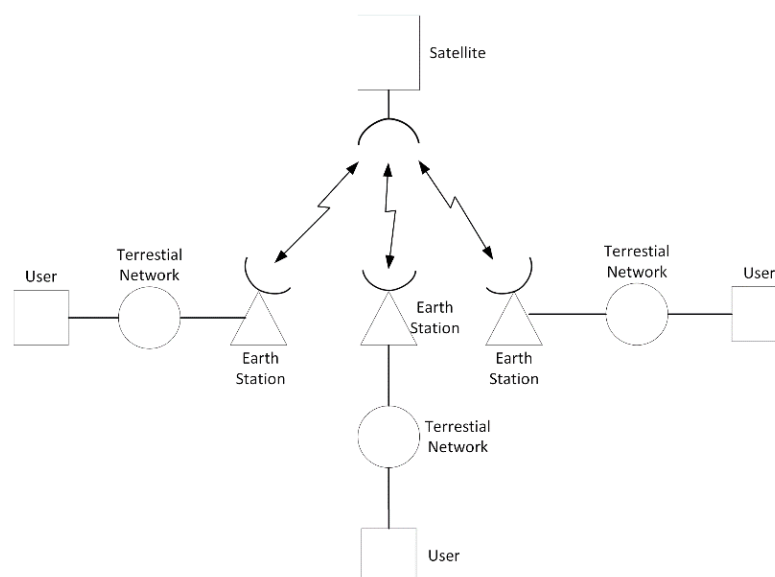
Gambar 2.2 Cakupan Satelit GEO [14]

Gambar 2.2 menunjukkan area cakupan satelit GEO. Satelit yang berada pada orbit ini bergerak menurut arah yang sama seperti rotasi bumi, sehingga

periode orbit ini akan menyelesaikan revolusi (putaran) pada sumbu bumi dalam waktu yang sama [16]. Orbit ini memiliki jarak sebesar 3.5786 km dari permukaan bumi. Keuntungan dari satelit orbit ini adalah dalam hal sistem sinkronisasi antena pengendalian dari stasiun bumi dengan satelit, karena periode orbit ini sama dengan periode rotasi bumi [14]. Oleh karena itu orbit ini sering dimanfaatkan untuk satelit komunikasi dan televisi. Karena jaraknya yang jauh dari permukaan bumi, satelit yang melintas di orbit ini dapat mencakup hingga sepertiga permukaan bumi kecuali kutub utara dan selatan, sehingga jumlah satelit yang diperlukan pada orbit ini jauh lebih sedikit dari orbit LEO dan MEO.

2.2.2.2 Sistem Komunikasi Satelit

Sistem komunikasi satelit (siskomsat) merupakan satelit buatan yang ditempatkan di angkasa dan mengorbit bumi, yang berfungsi sebagai *repeater* untuk mengirimkan sinyal gelombang *microwave* untuk memungkinkan pelanggan atau pengguna jasa telekomunikasi saling bertukar data [16]. Siskomsat meliputi dua segmen utama yakni *ground segment* dan *space segment*. *Ground segment* atau stasiun bumi adalah perangkat di bumi yang berfungsi meneruskan sinyal komunikasi dari dan menuju satelit. *Space segment* atau stasiun luar angkasa adalah perangkat yang ditempatkan di luar angkasa, dalam hal ini adalah satelit itu sendiri yang berfungsi untuk meneruskan sinyal dari dan menuju stasiun bumi atau antar satelit.

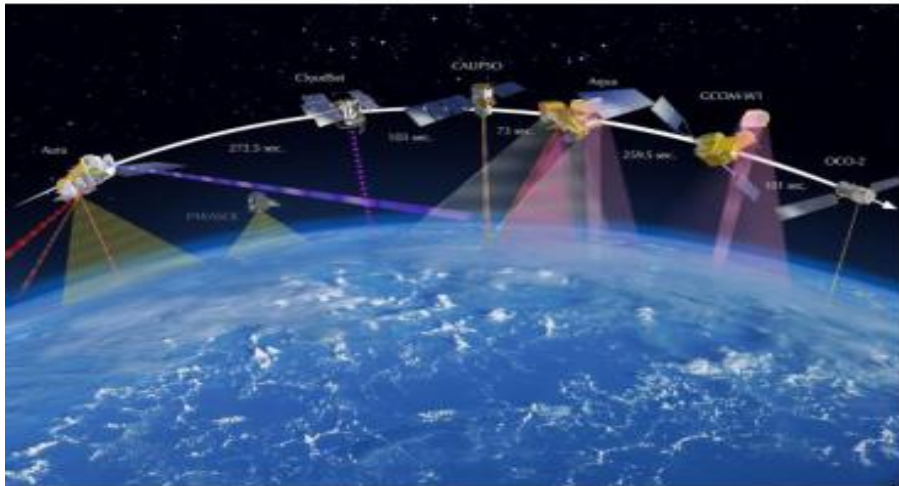


Gambar 2.3 Dasar Sistem Satelit [18]

Prinsip sistem satelit pada dasarnya yaitu, satelit sebagai *space segment* menghubungkan beberapa *ground station* yang berada di bumi. Gambar 2.3 menunjukkan blok diagram dasar sistem satelit. Pertukaran informasi pada siskomsat menggunakan satelit sebagai pengulang (*repeater*) untuk diteruskan ke tujuan. Pengguna (*user*) mentransmisikan sinyal *baseband* melalui jaringan terestrial yang diarahkan ke stasiun bumi. Di stasiun bumi sinyal *baseband* diproses dan ditransmisikan ke satelit menggunakan kanal *radio frequency* (RF) yang sudah termodulasi, di mana satelit komunikasi berfungsi sebagai pengulang untuk segmen luar angkasa. Satelit ini menerima frekuensi *radio carrier* yang dimodulasikan pada arah lintasan spektrum *uplink* (bumi – ruang angkasa) dari seluruh stasiun bumi dalam jaringan. Satelit kemudian menguatkan sinyal dan mengirimkannya kembali ke bumi menggunakan spektrum frekuensi *downlink* (*segmen space-to-ground*) yang berbeda dari spektrum frekuensi *uplink* untuk menghindari interferensi. Stasiun bumi yang menerima sinyal *downlink* kemudian mengubah frekuensi pembawa radio termodulasi menjadi sinyal *baseband* dan mengirimkannya kembali ke pemakai (*user*) melalui jaringan terestrial [18].

2.2.2 Inter-Satellite-Link

Inter-Satellite-Link merupakan komunikasi antara dua atau lebih satelit pada orbit yang sama maupun berbeda. Tautan antarsatelit dapat melakukan fungsi seperti komunikasi antarsatelit, transmisi data, jangkauan antarsatelit, dan pengukuran dan kontrol antar satelit. Penggunaan komunikasi *intersatellite-link* dapat mengurangi jumlah jalur komunikasi *satellite-ground*, sehingga dapat mengurangi *delay* pada komunikasi satelit. Dengan adanya kanal *intersatellite-link*, setiap satelit dapat menyinkronkan data yang dikumpulkan dari berbagai belahan dunia, yang kemudian dikirim ke stasiun bumi untuk diproses lebih lanjut [19]. Dengan demikian tautan *inter-satellite* dapat membentuk sistem konstelasi dari banyak satelit dan memperluas kemampuan satu satelit untuk bekerja, sehingga hubungan antara satelit menciptakan jaringan sistem satelit yang dapat bekerja secara independent dari *ground system*. Dalam hal ini, tautan *inter-satellite* memungkinkan satelit-satelit untuk berkomunikasi, yang pada akhirnya meningkatkan kemampuan dan ketahanan sistem satelit secara keseluruhan.



Gambar 2.4 Hubungan Antar Satelit [20]

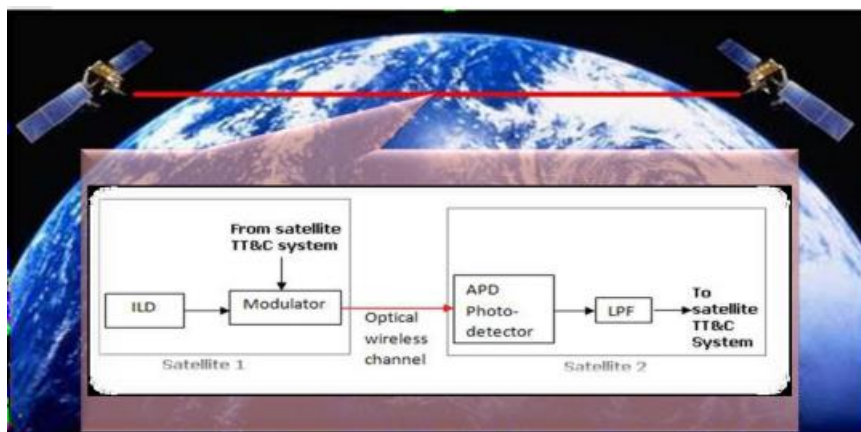
Gambar 2.4 menunjukkan visualisasi koneksi antar satelit. Beberapa satelit telah menerapkan tautan antar satelit, seperti *iridium*, *National American Space Agency (NASA)*, dan *Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS)* dengan menggunakan sinyal RF sebagai tautannya. Namun ke depannya penggunaan tautan satelit akan beralih dengan menggunakan *Optical Wireless Communication* sebagai mediumnya. Tautan OWC digunakan karena terbukti memberikan bitrate yang lebih besar dan efisiensi yang lebih baik dari pada *link* dengan sinyal RF. Tautan Is-OWC eksperimental pertama berhasil didemonstrasikan pada Maret 2003, di mana 50 Mbps informasi ditransmisikan antara satelit *Advanced Relay and Technology Mission (ARTEMIS)* dan *Satellite Pour l'Observation de la Terre4 (SPOT-4)* dengan daya transmisi 120 mW dan Panjang gelombang operasi 850 nm [20].

2.2.3 Intersatellite Optical Wireless Communication (Is-OWC)

Optical Wireless Communication (OWC) merupakan teknologi yang mengirimkan informasi menggunakan media cahaya yang bersumber dari laser secara nirkabel. Komunikasi OWC menawarkan lebih banyak manfaat dibandingkan menggunakan sistem komunikasi RF. Beberapa keunggulan yang dimiliki sistem OWC dibanding RF yaitu, *bandwidth* lebih tinggi karena frekuensi pembawa yang digunakan tinggi, kebutuhan massa dan daya yang rendah, tidak memiliki lisensi frekuensi, tahan terhadap interferensi gelombang elektromagnetik,

dan memiliki transmisi yang aman [21]. Oleh karena itu sistem OWC digunakan sebagai sinyal pembawa informasi menggantikan sistem RF, karena keuntungan yang dimilikinya. Teknologi utama yang dimiliki OWC adalah, komunikasi (i) *free space optical* (FSO), (ii) *visible light communication* (VLC), (iii) *optical camera communications* (OCC), dan (iv) *wireless networking with light* seperti *light-fidelity* [7].

Intersatellite Optical Wireless Communication (Is-OWC) merupakan sistem komunikasi antar satelit pada orbit yang sama maupun berbeda, yang menggunakan cahaya sebagai media transmisinya di ruang bebas. Sistem Is-OWC terdiri dari dua satelit yang berfungsi sebagai pemancar dan penerima yang dikomunikasikan melalui ruang bebas sebagai media propagasi [2]. Pada prinsipnya, IS-OWC menggunakan metode transmisi data dengan kecepatan cahaya 3×10^8 m/s, dan karena berada dalam ruang hampa, maka dapat ditransmisikan dengan sedikit *delay* dan sedikit atenuasi. Tautan Is-OWC bekerja dengan prinsip yang sama dengan sistem komunikasi serat optik, dengan satu-satunya perbedaan adalah penggunaan ruang kosong alih-alih kabel serat optik sebagai media transmisi. Untuk mengirim sinyal informasi secara efektif, pengirim dan penerima harus berada pada keadaan *line-of-sight* secara langsung antara dua satelit yang diimplementasikan menggunakan teknik akuisisi dan pelacakan yang tepat untuk keandalan tautan [5]. Pertukaran informasi memanfaatkan komponen optoelektronik yang melakukan proses konversi *radio-frequency* (RF) ke optik melalui laser dan *modulator* optik di sisi pemancar dan melakukan proses sebaliknya melalui detektor foto di sisi penerima [3].



Gambar 2.5 Blok Diagram Dasar Sistem Is-OWC [22]

Gambar 2.5 menunjukkan blok diagram dasar sistem Is-OWC. Secara matematis, perhitungan Is-OWC link didapatkan dengan [5]:

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R \left(\frac{\lambda}{4\pi Z} \right)^2 G_T G_R L_T L_R \quad (2.1)$$

Dimana P_R sebagai *received optical power*, P_T sebagai *transmitted optical power*, η_T sebagai *transmitter optical efficiency*, η_R sebagai *receiver optical efficiency*, λ sebagai *wavelength*, Z sebagai *link range*, G_T sebagai *transmitter telescopic gain*, G_R sebagai *receiver telescopic gain*, L_T sebagai *transmitter pointing loss*, L_R sebagai *receiver pointing loss*, dan persamaan $(\lambda/4\pi Z)$ merupakan persamaan untuk menentukan *free space path lose*. Dimana, Nilai L_T dan L_R didapatkan melalui persamaan berikut:

$$L_T = \exp(-G_T \theta_T^2) \quad (2.2)$$

$$L_R = \exp(-G_R \theta_R^2) \quad (2.3)$$

Dimana θ_T sebagai *transmitter pointing error angle* dan θ_R sebagai *receiver pointing error angle*

Untuk nilai G_T dan G_R didapatkan menggunakan persamaan berikut:

$$G_T = \left(\frac{\pi D_t}{\lambda} \right)^2 \quad (2.4)$$

$$G_R = \left(\frac{\pi D_r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.5)$$

Dimana D_t dan D_r merupakan besar *aperture diameter* yang digunakan. Kemudian, hubungan antara total jumlah daya yang diterima pada penerima dengan *aperture diameter* dapat dinyatakan sebagai [1]:

$$P_R = P_T \left(\frac{D_t D_r}{\lambda Z} \right)^2 \quad (2.6)$$

2.2.4 *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*

M-ary artinya suatu bentuk turunan dari kata *binary*, dimana M berarti digit yang mewakili banyaknya kondisi yang mungkin untuk menghasilkan beberapa kondisi masukan yang berbeda harus dipakai bit masukan lebih dari satu bit tunggal. Karena jumlah digit yang dihasilkan merupakan kondisi fasa yang mirip seperti jumlah kombinasi kode biner. Sehingga hubungan antara jumlah bit yang disusun dan jumlah kondisi fasa yang dihasilkan adalah $M = 2^m$, dimana $M =$ jumlah

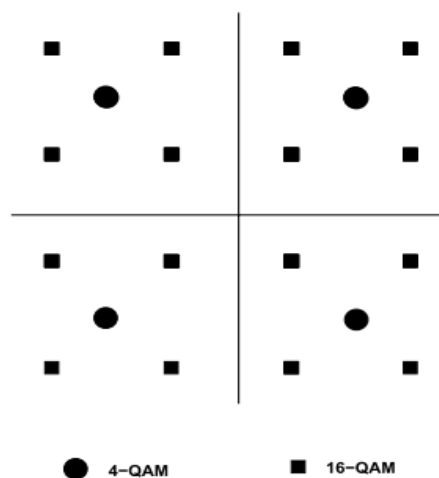
kondisi fasa yang dihasilkan, $m = \text{jumlah bit yang disusun (indeks modulasi)}$ dengan $m = \log_2 M$ [23].

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) adalah skema modulasi yang membawa data dengan merubah amplitudo dan fase dari sinyal pembawa[24]. QAM menyandikan informasi ke dalam gelombang pembawa dengan variasi amplitudo kedua pembawa gelombang dan pembawa “*quadrature*” yang berbeda fasa 90° dengan pembawa utama sesuai dengan dua sinyal masukan. Yang artinya amplitudo dan fase gelombang pembawa akan berubah secara bersamaan sesuai dengan informasi yang dibutuhkan untuk ditransmisikan [23]. Modulasi ini merupakan gabungan dari modulasi ASK (*Amplitude Shift Keying*) dan PSK (*Phase Shift Keying*). Pada modulasi QAM, titik titik konstelasi (*constellation points*) dibuat dalam bentuk kotak dengan jarak vertikal dan horizontal dan mengalami perubahan sesuai dengan amplitudo (jarak antara titik asal ke titik konstelasi) dan berdasarkan fasa (titik konstelasi yang tersebar sepanjang bidang kompleks). Secara matematis *M-ary* QAM dapat ditulis sebagai berikut:

$$s_{kl}(t) = A_k \cos(2\pi f_c t + \theta_l),$$

$$k = 1, 2, \dots, M_1, l = 1, 2, \dots, M_2 \quad (2.7)$$

Dimana A_k adalah amplitudo sinyal, θ_l adalah fasa sinyal, M_1 adalah jumlah kemungkinan amplitudo pembawa, M_2 adalah jumlah kemungkinan fasa pembawa, dan f_c frekuensi sinyal pembawa. Diagram konstelasi dapat dilihat pada gambar berikut.

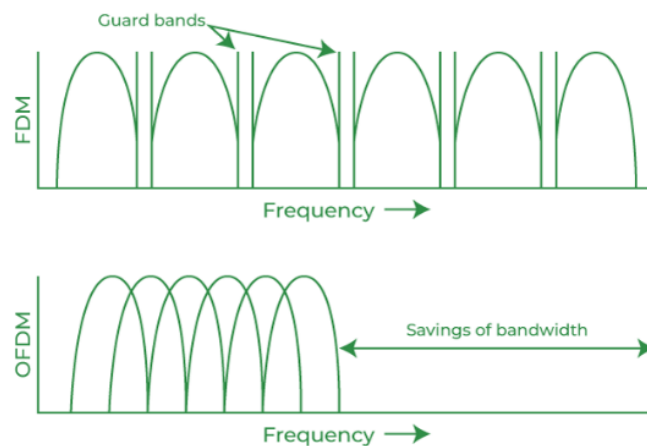


Gambar 2.6 Diagram Konstelasi 4-QAM dan 16-QAM [24]

Terdapat beberapa jenis modulasi QAM berdasarkan jumlah bit yang digunakan, dimana salah satunya adalah modulasi 16-QAM. Gambar 2.6 menampilkan diagram konstelasi modulasi 4-QAM dan 16-QAM. Modulasi 16-QAM adalah modulasi yang dimana dalam satu simbolnya memuat 4bit data yang terdiri dari 16 titik, yang akan ditransmisikan sehingga penggunaan *bandwidth* menjadi lebih efisien. Pada modulasi 16-QAM kecepatan bit informasi empat kali lebih besar dari kecepatan simbol ($bit\ rate = baud\ rate \times m\text{-bit}$) karena setiap simbol memiliki empat bit $m = 4$ ($2m = 16$) [25].

2.2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

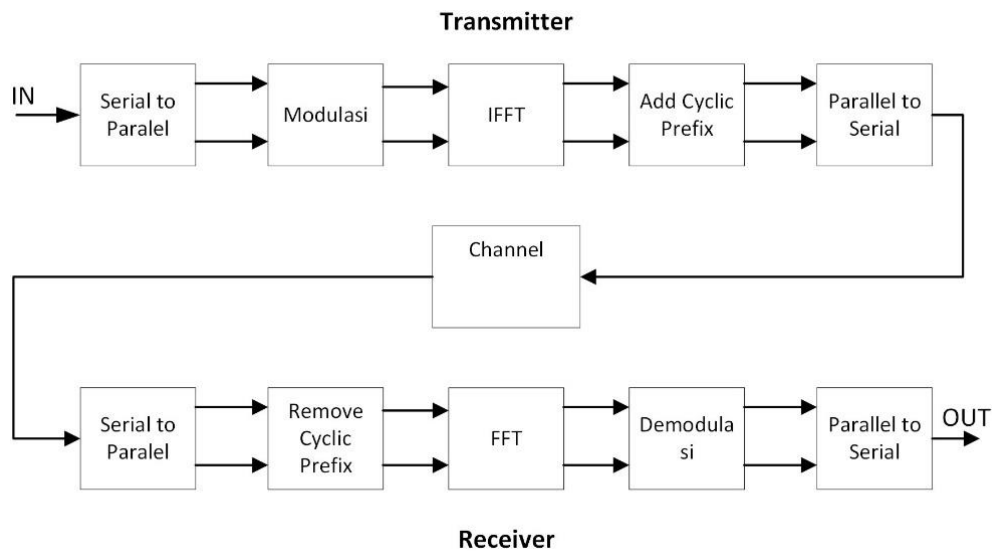
OFDM merupakan teknik *multicarrier modulation*, dimana aliran data dibagi menjadi beberapa *substream* untuk ditransmisikan menjadi sejumlah aliran yang lebih rendah, berpusat pada frekuensi *subcarrier* yang berbeda. Transmisi simbol *input* dipetakan ke sejumlah *subcarrier* yang saling tegak lurus (*orthogonal*) yang tumpang tindih satu sama lain [3]. Hal ini membuat celah antara *sub-carrier* menutup, sehingga mengurangi *bandwidth* yang dibutuhkan. Gambar 2.7 merupakan perbandingan sinyal OFDM dengan FDM.



Gambar 2.7 Perbandingan Sinyal Hasil FDM Dengan OFDM [23]

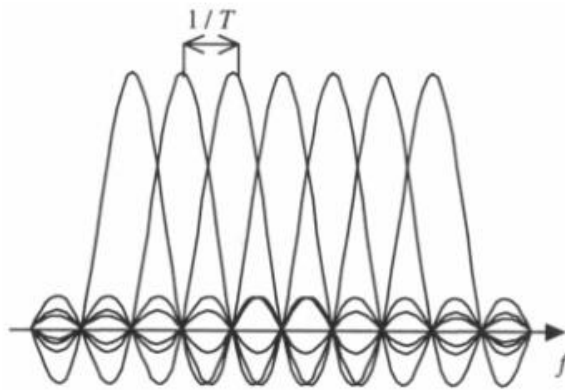
OFDM diterapkan pada sinyal yang sudah termodulasi. Prinsip dari sistem OFDM itu sendiri adalah mengubah bit transmisi data, yang sebelumnya dalam bentuk serial, menjadi beberapa aliran paralel dengan *bit rate* yang lebih rendah. Dalam komunikasi serial, durasi setiap bit hanya satu detik. Ketika data

ditransmisikan menggunakan OFDM, data dipisah dan ditransmisikan secara bersamaan, sehingga waktu yang diperlukan untuk setiap bit adalah empat detik. Pengiriman sinyal secara *multicarrier* mampu mengurangi pengaruh *noise* dan interferensi pada sinyal informasi, sehingga OFDM mampu menanggulangi *delay spread*, *multipath*, *intercarrier interference*, dan *inter simbol interference* [23]. Berikut gambar menunjukkan diagram blok pada sistem OFDM dalam hal mengolah sinyal dan mengirimkannya.



Gambar 2.8 Diagram blok sistem OFDM [23]

Pada Gambar 2.8 merupakan diagram blok sistem OFDM. Sinyal pada sisi pengirim dibentuk dengan menerapkan algoritma *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) [3]. IFFT merupakan algoritma yang mengubah sebuah spektrum (amplitudo dan fasa dari setiap komponen) menjadi sinyal dalam domain waktu. Kemudian pada sisi penerima, *subcarrier* dibentuk kembali dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Teknik FFT melakukan proses berbalikan dari IFFT, yaitu mengubah sinyal dalam domain waktu ke bentuk spektrum frekuensi yang ekuivalen. Hal ini dilakukan dengan menemukan bentuk sinyal yang ekuivalen, yaitu dengan menjumlahkan komponen-komponen sinyal sinus yang saling *orthogonal*. Amplitudo dan fasa dari komponen-komponen sinusoidal merepresentasikan spektrum frekuensi dari sinyal domain waktu. Berikut gambar hasil sinyal spektrum OFDM.



Gambar 2.9 Spektrum OFDM [23]

Gambar 2.9 merupakan hasil sinyal spektrum OFDM. Kendala *Inter-Symbol Interference* (ISI) dan *Inter-Carrier Interference* (ICI) pada saat mentransmisikan sinyal yang saling *orthogonal* dapat dicegah dengan menambahkan prosedur *guard interval* atau yang disebut *cyclic prefix* (CP). Pengenalan *guard time* pada setiap simbol OFDM mengeliminasi ISI. Pada *guard time*, simbol OFDM secara siklus diperpanjang untuk mengurangi ICI. Dengan penambahan CP tersebut maka interferensi simbol hanya terjadi pada sisi *cyclic prefix*-nya saja. Efek tersebut dapat dihilangkan saat dilakukan sinkronisasi waktu pada FFT dengan cara menghilangkan CP yang mengalami interferensi. Situasi ini menyebabkan OFDM mempertahankan ortogonalitas saat mengirimkan informasi. Ketika sampai di *parallel to serial* diubah kembali sinyal-sinyal menjadi serial untuk dikirimkan melalui kanal. Kemudian pada bagian *receiver* melakukan kebalikan dari sistem *transmitter*.

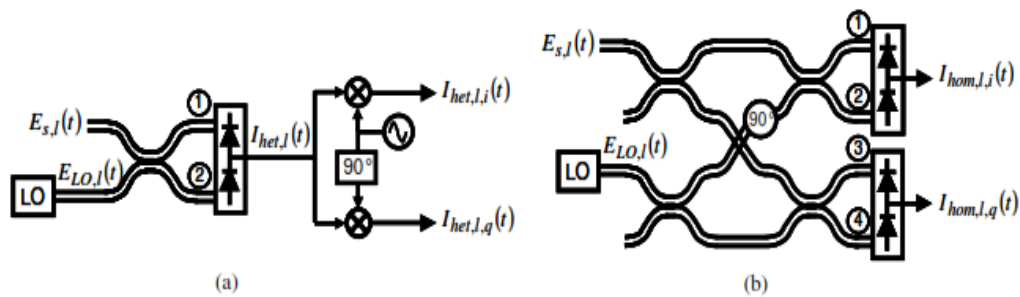
2.2.6 Coherent Detection

Coherent detection merupakan salah satu dari teknik pendeteksian di mana penerima menghitung variabel keputusan berdasarkan pemulihan medan listrik penuh, yang berisi informasi amplitudo dan fase. *Coherent detection* memiliki fleksibilitas yang besar dalam hal format modulasi, karena informasi dapat dikodekan dalam amplitudo dan fase, atau sebagai alternatif dalam komponen fase (I) dan kuadratur (Q) dari pembawa.

Prinsip utama dari teknik deteksi koheren ini adalah untuk menyediakan penguatan pada sinyal yang datang dengan melakukan penggabungan atau

kombinasi dengan *continuous wave* (CW) berupa *local oscillator* (LO). Berdasarkan frekuensi yang digunakan pada LO, *coherent detection* dibagi menjadi dua, yaitu *homodyne* dan *heterodyne* [26]. Dimana pada penelitian ini akan mengimplementasikan jenis deteksi *homodyne*.

Deteksi *heterodyne* ketika frekuensi *local oscillator* tidak sama dengan frekuensi sinyal yang masuk. Ketika sinyal dan osilator lokal digabungkan dalam fotodioda, frekuensi baru dibuat, yang disebabkan oleh perbedaan frekuensi sinyal informasi dan frekuensi osilator lokal. Selain itu, ekspresi *homodyne* yang digunakan dalam tugas akhir ini, mengandung syarat bahwa frekuensi sinyal yang masuk sama dengan frekuensi osilator lokal. Sinyal yang datang digabungkan dengan *output* dari laser *local oscillator*. Sehingga ketika dua gelombang yang mempunyai frekuensi tertentu ω_1 dan ω_2 akan menghasilkan gelombang lain dengan frekuensi yang setara dengan $2\omega_1$, $2\omega_2$, dan $\omega_1 + \omega_2$.



Gambar 2.10 Arsitektur *coherent detection* [26]

(a) *Heterodyne*

(b) *Homodyne*

Pada Gambar 2.10 merupakan arsitektur dari *coherent detection*, dimana (a) merupakan jenis deteksi *heterodyne* dan (b) merupakan deteksi *homodyne*. Sistem pendeteksian koheren mempunyai 3 keunggulan utama:

1. *Shot noise* sangat kecil, walaupun daya sinyal sangat kecil. Hal ini karena kita bisa mengubah daya lokal osilator.
2. Sistem koheren dapat menggunakan 3 jenis modulasi, yaitu intensitas, frekuensi dan fasa. Sedangkan deteksi langsung hanya bisa menggunakan intensitas saja.
3. Pada sistem koheren, selektivitas frekuensi sangat baik, karena adanya filter sebelum memasuki *photodetector*.

2.2.7 Range Panjang Gelombang Optik

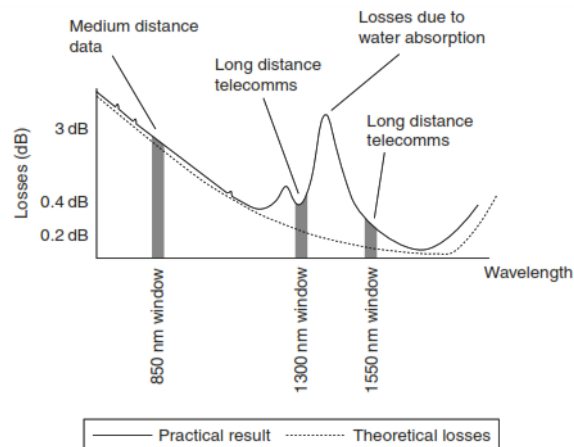
Panjang gelombang merupakan sebuah jarak selang satuan berulang dari sebuah pola gelombang. Panjang gelombang optik tipikal dibedakan menjadi 3 wilayah kerja, Seperti pada Tabel 2.2 [27].

Tabel 2.2 Wilayah Kerja Panjang Gelombang

Wilayah Kerja	Range Panjang Gelombang	Operasi Kerja
Jendela Pertama	800 nm – 900 nm	850 nm
Jendela Kedua	1260 nm – 1360 nm	1310 nm
Jendela Ketiga	1500 nm – 1600 nm	1550 nm

Standarisasi penggunaan panjang gelombang optik berada pada operasi 850, 1310, 1550 nm, yang dibagi menjadi tiga jendela. Ketiga nilai operasi ini dipilih karena sinyal optik dari ketiga panjang gelombang tersebut memiliki kerugian paling kecil saat ditransmisikan dalam serat optik.

Serat *multimode* cocok untuk panjang gelombang 850nm dan 1300nm, sedangkan serat mode tunggal paling baik digunakan untuk panjang gelombang 1310nm dan 1550nm. Namun penggunaan panjang gelombang 1380 nm sangat dihindari penggunaannya, dikarenakan panjang gelombang ini memiliki kerugian yang sangat tinggi karena air di dalam gelas. Air dalam bentuk ion hidroksil diserap dalam struktur molekul dan menyerap energi dengan panjang gelombang 1380 nm [27].



Gambar 2.11 Rugi-rugi Panjang Gelombang [27]

Dari diagram jendela panjang gelombang pada Gambar 2.11, dapat dilihat bahwa panjang gelombang 1300 nm dan 1550 nm memiliki kerugian yang lebih kecil daripada panjang gelombang lainnya. Karena alasan ini, kedua panjang gelombang ini menjadi lebih populer digunakan oleh para insinyur untuk komunikasi jarak jauh.

2.2.8 *Bit Error Rate (BER) dan Q-factor*

Dalam sistem komunikasi digital BER dan *Q-factor* merupakan parameter performansi untuk mengukur kualitas pengiriman yang dilakukan. *Bit Error Rate* (BER) merupakan ukuran kinerja transmisi digital yang mengindikasikan seberapa sering kesalahan terjadi dalam memindahkan bit data antara dua titik. BER digunakan untuk mengukur suatu tingkat kesalahan yang terjadi saat pengiriman data bit dari sistem tersebut yang dibagi dengan jumlah banyak bit yang diterima atau perbandingan kesalahan bit dengan semua jumlah bit yang dikirim. Untuk perhitungan BER dapat menggunakan persamaan berikut[24]:

$$BER = \frac{N_E}{N_T} \quad (2.8)$$

Dimana N_E adalah jumlah bit yang salah dan N_T adalah jumlah bit yang diterima. ada jaringan optik secara umum, nilai BER yang harus dipenuhi adalah BER 10^{-6} sampai 10^{-12} . BER juga disebut dengan *error probability* (P_e) atau probabilitas munculnya *error* dalam transmisi data. Dalam proses transmisi, bit tertentu memiliki amplitudo sinyal yang terlalu terlalu dekat dengan threshold sehingga tidak tidak dapat dibedakan nilainya dengan benar.

Q-factor adalah parameter performansi sebagai ukuran kualitas sinyal optik yang mengacu pada rasio antara sinyal dan *noise*. Semakin tinggi nilai *Q-factor*, semakin baik kualitas sinyal. Sistem yang baik harus memenuhi standar minimal nilai *Q-factor* sebesar 6. *Q-factor* biasanya diukur dalam desibel (dB) dan dapat digunakan untuk memperkirakan BER pada suatu link transmisi. Parameter *Q-factor* dan BER saling terkait dan dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem transmisi digital dimana semakin tinggi nilai *Q-factor*, maka semakin rendah nilai BER. Persamaan berikut menunjukkan keterkaitan BER dan *Q-factor* [28].

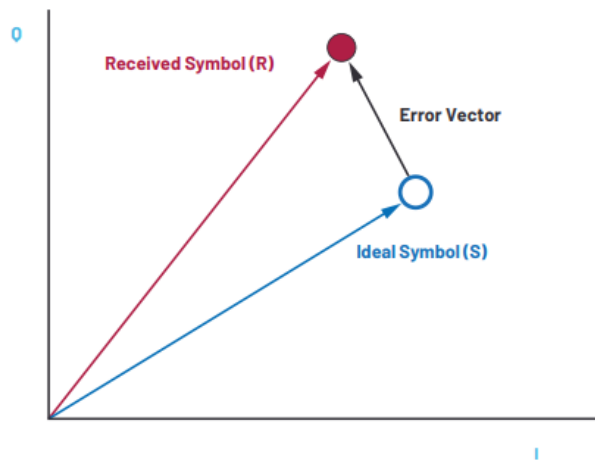
$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} e^{\left(-\frac{Q^2}{2} \right)} \quad (2.9)$$

Dimana Q adalah Q -factor dan erfc adalah *error function*, yang didapatkan melalui persamaan berikut:

$$\operatorname{erfc} (y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^{\infty} e^{-x^2} dx \quad (2.10)$$

2.2.9 Error Vector Magnitude (EVM)

Error vector magnitudo (EVM) adalah metrik sederhana untuk mengukur kombinasi semua *noise* sinyal dalam suatu sistem. EVM umumnya didefinisikan untuk perangkat yang menggunakan modulasi digital, yang dapat diwakili oleh diagram vektor fase (I) dan *quadrature* (Q), juga dikenal sebagai diagram konstelasi. Secara umum, EVM dihitung dengan mencari posisi konstelasi yang ideal untuk setiap simbol yang diterima [29]. Gambar 2.12 menampilkan ilustrasi dari parameter EVM.



Gambar 2.12 Ilustrasi Dari Pengertian EVM [29]

Parameter EVM terkait erat dengan parameter BER dari sistem tertentu. Ketika simbol yang diterima jatuh dari titik konstelasi target, kemungkinan mereka jatuh ke batas keputusan dari titik konstelasi lainnya meningkat. Ini berarti BER yang lebih besar. Perbedaan penting antara BER dan EVM adalah bahwa BER dari sinyal yang ditransmisikan dihitung berdasarkan pola bit yang ditransmisikan, sedangkan EVM dihitung berdasarkan jarak dari titik konstelasi terdekat ke simbol dan posisi simbol sinyal yang ditransmisikan. Dalam beberapa kasus, simbol dapat

melintasi batas keputusan dan diberi pola bit yang salah. Jika sebuah simbol semakin mendekati posisi simbol ideal lainnya, hal ini dapat menghasilkan EVM yang lebih baik untuk simbol tersebut. Berikut persamaan untuk mencari nilai EVM dari standar IEEE 802.11 [29].

$$EVM_{frame} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{L_p} \sum_{i=1}^{N_c} (R_{i,j} - S_{i,j})^2}{N_c L_p P_0}} \quad (2.11)$$

Dimana, L_p merupakan *number of frames*, N_c merupakan *number of carriers*, $R_{i,j}$ merupakan *received symbol*, dan $S_{i,j}$ merupakan *ideal symbol location*.