

**ANALISIS PENGARUH PELETAKAN KOMPENSATOR DISPERSI
DENGAN *FIBER BRAGG GRATING* PADA SISTEM JARINGAN
*RADIO OVER FIBER***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ADRIAN SATRIA PERMANA

NIM. 135060301111086

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH PELETAKAN KOMPENSATOR DISPERSI
DENGAN *FIBER BRAGG GRATING* PADA SISTEM JARINGAN
*RADIO OVER FIBER***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK TELEKOMUNIKASI

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**Adrian Satria Permana
NIM. 135060301111086**

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S.
NIP. 19530714 198203 1 003

Ir. Erfan Achmad Dahlan, M.T
NIP. 19580728 198701 1 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19730520 200801 1 013

JUDUL SKRIPSI :

ANALISIS PENGARUH PELETAKAN KOMPENSATOR DISPERSI DENGAN *FIBER BRAGG GRATING* PADA SISTEM JARINGAN *RADIO OVER FIBER*

Nama Mahasiswa : Adrian Satria Permana

NIM : 135060301111086

Program Studi : Teknik Elektro

Konsentrasi : Teknik Telekomunikasi

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S.

Anggota : Ir. Erfan Achmad Dahlan, M.T.

TIM DOSES PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Gaguk Asmugi, ST., MT.

Dosen Penguji 2 : Ir. Sigit Kusmaryanto, M.Eng.

Dosen Penguji 3 : Ir. Wahyu Adi Prijono, M.S.

Tanggal Ujian : 26 April 2018

SK Penguji : No. 869/UN10.F07/SK/2018

*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada:
Ayahanda dan Ibunda tercinta*

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 26 April 2018

Mahasiswa,

ADRIAN SATRIA PERMANA

NIM. 13506030111108

ABSTRAK

Adrian Satria Permana, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, 26 April 2018, Analisis Pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi *Fiber Bragg Grating* pada Sistem Jaringan *Radio Over Fiber*, Dosen Pembimbing: Dr.Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S., dan Ir. Erfan Achmad Dahlan, M.T.

Teknologi *Radio Over Fibre* (RoF) adalah sistem integrasi antara jaringan serat optik dan komunikasi *wireless broadband*. Teknologi RoF merupakan solusi potensial untuk peningkatan kapasitas dan mobilitas jaringan akses. Pada sistem transmisi RoF menggunakan kabel serat optik sebagai media transmisi data terjadi kosekuensi pelebaran pulsa, bila pelebaran ini dibiarkan akan memungkinkan terjadi *Intersymbol Interference* (ISI) yang menyebabkan pulsa output pada sistem menjadi tumpang tindih dan membuatnya tidak terdeteksi. Berdasarkan permasalahan itu, dirancang sebuah sistem komunikasi RoF dengan menggunakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* pada simulasi *software Optisystem* dan menganalisis sistem terhadap parameter-parameter seperti BER, *Q-Factor*, dan *Loss*. Berdasarkan hasil simulasi pengaruh peletakan FBG pada sistem transmisi RoF menggunakan *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, RF *carrier* 3,5 GHz, dan *bit rate* 10 Gbps, didapatkan nilai BER $5,242 \times 10^{-15}$, *Q-factor* 7,73281 dan nilai *loss* 2,561 dBm.

Kata kunci : *Radio over Fiber, Fiber Bragg Grating, Long Houl Telecommunications Systems*

ABSTRACT

Adrian Satria Permana, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, 26 April 2018, Analysis of the Effect Using Compensator Dispersion Fiber Bragg Grating on Radio over Fiber Network Systems, Academic Supervisor: Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S. and Ir. Erfan Achmad Dahlan, M.T.*

Radio over Fiber (RoF) is an integrated system between fiber-optic network and wireless broadband communications. RoF technology is a potential solution for capacity and mobility improvement in access networks. Using fiber optic cables as data transmission medium have problems pulse width extension it's mean dispersion, if this widening is allowed, will occur Intersymbol Interference (ISI) which causes the output pulses in the system to overlap and undetected signal. Based on that problem, based on that problem, RoF communication system using Fiber Bragg Grating dispersion compensator on Optisystem software simulations and system effects on parameters such as BER, Q-Factor, and Loss. according to the data simulation of the effect of NRZ line coding format on fiber link length of 90 km, 3.5 GHz RF carrier, and 10 Gbps bit rate. The value of BER that had been obtained is $5,242 \times 10^{-15}$, Q-factor 7,73281 and loss 2,561 dBm.

Keywords: Radio over Fiber, Fiber Bragg Grating, Long Houl Telecommunications Systems

PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohim. Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi *Fiber Bragg Grating* Pada Sistem Jaringan *Radio Over Fiber*” dengan baik. Tak lepas shalawat serta salam tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

- Keluarga tercinta, kedua orang tua Agung Wicaksono, Diah Tritunggariani, serta kedua adik tersayang Nisrina Nurlathifah, dan Rofi Hanif Firjatullah.
- Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ibu Ir. Nurussa’adah, M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ibu Rusmi Ambarwati, S.T., M.T. selaku KKDK Telekomunikasi Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S. dan Ir. Erfan Achmad Dahlan, M. T. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan kesempatan, nasehat, pengarahan, motivasi, saran dan masukan yang telah diberikan.
- Teman seperjuangan mengerjakan skripsi Bram, Vema, dan Diqy atas segala rintangan yang dijalani ketika menyelesaikan skripsi.
- Teman-teman kuliah yang selalu memberikan semangat, Ardillah, Anjani, Fatur, Vicky, Galoh, Habib, Rendra, Idam, Azril, Udin, Rozaq, Adit, Musa atas canda dan tawa yang diberikan ketika penulis merasa jenuh.
- Keluarga besar Teknik Elektro angkatan 2013, teman-teman Telekomunikasi 2013 atas do'a, semangat, serta dukungan yang diberikan pada penulis.
- Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala–kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, 26 April 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Radio over Fiber</i>	5
2.2 Serat optik.....	6
2.3 Jenis Serat Optik.....	7
2.3.1. Singlemode.....	7
2.3.2. <i>Multimode</i>	8
2.4 <i>Line Coding</i>	9
2.4.1 <i>Unipolar</i>	9
2.4.2 Polar.....	10
2.4.3 <i>Nonreturn-to-Zero</i>	10
2.4.4 <i>Return-to-Zero</i>	11
2.5 Dispersi.....	11
2.5.1 Dispersi kromatik.....	12
2.5.2 Dispersi material.....	13
2.5.3 Dispersi pandu gelombang.....	13
2.6 <i>Fiber Bragg Grating</i>	14
2.7 <i>Continuous wave (CW) laser</i>	18
2.8 <i>Mach-Zehnder Modulator</i>	19
2.9 <i>Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)</i>	20
2.10 Detektor Optik.....	20

2.11 Kinerja Serat Optik	21
2.12 <i>Q-factor</i>	21
2.13 <i>Bit Error Rate</i>	22
2.14 <i>Eye Pattern</i>	23
2.15 <i>Power Link Budget</i>	24
2.16 <i>Bit Rate</i>	25
2.17 Frekuensi Radio	25
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Jenis dan cara perolehan data	27
3.2 Variabel dan cara analisis data	29
3.3 Kerangka solusi masalah.....	29
3.3.1 Pengujian variasi <i>bit rate</i>	30
3.3.2 Pengujian variasi jarak peletakan FBG	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Konfigurasi Perangkat Penelitian	33
4.1.1 <i>Pseudorandom Bit Sequence Generator</i>	33
4.1.2 <i>Line Coding</i>	33
4.1.3 <i>Sine Generator</i>	34
4.1.4 <i>Electrical Adder</i>	34
4.1.5 <i>Continuous Wave (CW) laser</i>	34
4.1.6 <i>Mach-Zehnder Modulator</i>	35
4.1.7 Serat Optik.....	35
4.1.8 <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	37
4.1.9 <i>Fiber Bragg Grating</i>	37
4.1.10 <i>Photodetector APD</i>	38
4.1.11 <i>Low Pass Bessel Filter</i>	38
4.1.12 <i>Optical Power Meter</i>	39
4.1.14 <i>Eye Diagram Analyzer</i>	39
4.1.15 <i>Bit Error Rate Analyzer</i>	40
4.2 Prosedur Pengambilan Data	40
4.2.1 Simulasi Analisis Pengaruh Jarak Transmisi Terhadap <i>Bit Rate</i>	41
4.2.2 Simulasi Analisis Pengaruh Peletakan kompensator Dispersi FBG	43
4.3 Hasil penelitian dan pembahasan.....	45
4.3.1 Analisis pengaruh jarak transmisi terhadap <i>Bit Rate</i> 5 Gbps	45
4.3.2 Analisis pengaruh jarak transmisi terhadap <i>Bit Rate</i> 10 Gbps	48

4.3.3 Analisis pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG pada <i>bit rate</i> 5 Gbps	51
4.3.4 Analisis pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG pada <i>bit rate</i> 10 Gbps	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	59
Lampiran 1 <i>Eye Pattern</i>	59
Lampiran 2 <i>DataSheet</i>	99

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Spektrum panjang gelombang terhadap Atenuasi.....	5
Gambar 2.2 Konsep Dasar Sistem RoF.....	6
Gambar 2.3 Struktur dasar serat optik.....	7
Gambar 2.4 Perambatan Cahaya Serat Optik <i>Singlemode</i>	7
Gambar 2.5 Perambatan Cahaya Step <i>Index Multimode</i>	8
Gambar 2.6 Perambatan Cahaya <i>Graded Index Multimode</i>	9
Gambar 2.7 <i>Line Coding</i>	9
Gambar 2.8 Skema <i>Line Coding</i>	9
Gambar 2.9 Skema <i>Unipolar NRZ</i>	10
Gambar 2.10 Pengkodean Digital dengan NRZ-L dan NRZ-I	10
Gambar 2.11 Pengkodean Digital RZ dan Karakteristik Bandwidth RZ	11
Gambar 2.12 Ilustrasi pelebaran pulsa cahaya saat menjalar di sepanjang serat optik: (a) sinyal masukan; (b) pelebaran pulsa; (c) <i>Intersymbol Interference</i>	12
Gambar 2.13 Penerapan Fiber Bragg Grating pada serat optik	15
Gambar 2.14 Prinsip kerja <i>fiber bragg grating</i>	15
Gambar 2.15 Prinsip kerja <i>chirped</i> FBG sebagai kompensator dispersi	16
Gambar 2.16 Perubahan indeks bias untuk berbagai tipe kisi	18
Gambar 2.17 <i>CW</i> laser.....	18
Gambar 2.18 Struktur Mach-Zehnder Modulation	19
Gambar 2.19 <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	20
Gambar 2.20 Grafik Hubungan BER dan <i>Q-factor</i>	22
Gambar 2.21 Kurva Bit Error Rate terhadap Daya yang Diterima	22
Gambar 2.22 <i>Eye Diagram</i>	23
Gambar 2.23 Karakteristik <i>Bit Rate</i> terhadap Besar <i>Bit Interval</i>	25
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian	27
Gambar 3.2 Blok diagram sistem transmisi RoF menggunakan FBG	28
Gambar 3.3 Diagram alir pengujian variasi <i>bit rate</i> dan jarak.....	30
Gambar 3.4 Diagram alir pengujian variasi jarak peletakan FBG	31
Gambar 4.1 <i>Pseudo Random Bit Sequence Generator</i>	33
Gambar 4.2 <i>Line Coding</i>	34
Gambar 4.3 <i>Sine Generator</i>	34

Gambar 4.4 <i>Electrical Adder</i>	34
Gambar 4.5 <i>Continous Wave (CW) laser</i>	35
Gambar 4.6 <i>Mach-Zehnder Modulator (MZM)</i>	35
Gambar 4.7 Serat Optik.....	36
Gambar 4. 8 <i>Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)</i>	37
Gambar 4.9 <i>Fiber Bragg Grating (FBG)</i>	38
Gambar 4.10 <i>Photodetector APD</i>	38
Gambar 4.11 <i>Low Pass Bessel Filter (LPF)</i>	39
Gambar 4.12 <i>Optical Power Meter Visualizer</i>	39
Gambar 4.13 <i>Eye Diagram Analyzer</i>	39
Gambar 4.14 <i>Bit Error Rate (BER) Analyzer</i>	40
Gambar 4.15 Konfigurasi Simulasi Pengaruh <i>Bit Rate</i> Terhadap Jarak Transmisi.....	41
Gambar 4.16 Konfigurasi Simulasi Pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG	43
Gambar 4.17 Grafik pengaruh jarak terhadap <i>Q-factor</i>	46
Gambar 4.18 Grafik pengaruh jarak terhadap BER.....	46
Gambar 4.19 Grafik pengaruh jarak terhadap <i>Loss</i>	47
Gambar 4.20 Grafik pengaruh jarak terhadap <i>Q-factor</i>	49
Gambar 4.21 Grafik pengaruh jarak terhadap BER.....	49
Gambar 4.22 Grafik pengaruh jarak terhadap <i>loss</i>	50
Gambar 4.23 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap <i>Q-factor</i>	51
Gambar 4.24 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap BER.....	52
Gambar 4.25 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap <i>loss</i>	53
Gambar 4.26 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap <i>Q-factor</i>	54
Gambar 4.27 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap BER.....	55
Gambar 4.28 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap <i>loss</i>	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Perbandingan Karakteristik LED dan LD	19
Tabel 2.2 Perbandingan Parameter dan Karakteristik PIN dan APD.....	20
Tabel 4.1 Kombinasi <i>Bit Rate</i> , <i>Line Coding</i> , dan <i>Fiber Optic Link</i>	42
Tabel 4.2 Kombinasi <i>Bit Rate</i> , <i>Line Coding</i> , <i>FO Link</i> , dan Jarak Peletakan FBG	44
Tabel 4.3 Hasil simulasi jarak terhadap <i>bit rate</i> 5 Gbps <i>line coding</i> NRZ.....	45
Tabel 4.4 Hasil Simulasi jarak terhadap <i>bit rate</i> 5 Gbps <i>line coding</i> RZ.....	45
Tabel 4.5 Hasil simulasi jarak terhadap <i>bit rate</i> 10 Gbps <i>line coding</i> NRZ.....	48
Tabel 4.6 Hasil simulasi jarak terhadap <i>bit rate</i> 10 Gbps <i>line coding</i> RZ.....	48
Tabel 4.7 Hasil Simulasi Pengaruh Peletakan FBG <i>Bit Rate</i> 5 Gbps NRZ.....	51
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Pengaruh Peletakan FBG <i>Bit Rate</i> 5 Gbps RZ.....	51
Tabel 4.9 Hasil Simulasi Pada Pengaruh Peletakan FBG <i>Bit Rate</i> 10 Gbps NRZ.....	54
Tabel 4.10 Hasil Simulasi Pada Pengaruh Peletakan FBG <i>Bit Rate</i> 10 Gbps RZ	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi telekomunikasi terus berkembang, tuntutan kebutuhan telekomunikasi dengan kecepatan tinggi merupakan kenyataan yang tidak dapat dihindari, peningkatan permintaan untuk layanan *broadband* dan munculnya teknologi baru untuk mendukung kebutuhan data di era gigabit. Pada tahun 2010 pelanggan semakin fokus pada layanan data, sekitar 10% kenaikan lalu lintas layanan data yang terjadi (EY, 2015). Jaringan akses pada generasi selanjutnya membutuhkan kovergensi dari kabel serat optik dan layanan nirkabel. Teknologi *Radio over Fiber* (RoF) adalah solusi potensial untuk peningkatan kapasitas dan mobilitas serta penurunan biaya dalam jaringan akses.

Radio over Fiber (RoF) merupakan suatu proses pengiriman sinyal radio frekuensi melalui medium transmisi serat optik. Dengan menggunakan serat optik sebagai medium perantara, dapat mentransmisikan data dan sinyal dengan baik, serta kecepatan transmisi dari serat optik lebih tinggi dari kabel tembaga dan kabel serat optik memiliki ketahanan yang tinggi terhadap noise yang dihasilkan oleh gelombang radio (Al raweshidy, 2002).

Dalam sistem transmisi *Radio over Fiber* (RoF) menggunakan kabel serat optik, terjadi konsekuensi pelebaran pulsa yang dikenal dengan dispersi, elemen seperti *numerical aperture*, diameter inti, nilai indeks bias, dan lebar spektral laser menyebabkan pelebaran pulsa. Jika pelebaran format sinyal ini dibiarkan memungkinkan terjadi *Intersymbol Interference* (ISI) yang menyebabkan pulsa *output* pada sistem menjadi tumpang tindih dan membuatnya tidak terdeteksi (Halina Abramczyk, 2007).

Untuk mengurangi masalah dispersi yang terjadi pada sepanjang serat optik, maka diperlukan komponen tambahan yaitu *Fiber Bragg Grating* (FBG). FBG merupakan suatu jenis reflektor (Bragg) yang terdistribusi dalam bentuk segmen-segmen dalam serat optik. FBG memantulkan beberapa panjang gelombang cahaya tertentu dan meneruskan sisanya, dimana hal ini dapat terjadi karena adanya penambahan suatu variasi periodik terhadap indeks bias inti serat optik. Dengan karakteristik yang dimilikinya tersebut, FBG dapat difungsikan sebagai filter pada serat optik yakni untuk menghalangi panjang gelombang cahaya tertentu yang diinginkan atau sebagai reflektor panjang gelombang cahaya spesifik (Andreas Othonos, 1999).

Selain terjadinya dispersi di sepanjang medium transmisi serat optik, terjadi juga penurunan level daya sinyal, semakin jauh di transmisikan akan semakin turun level daya sinyalnya. Sinyal yang ditransmisikan harus mempertahankan level daya sinyal tersebut, sehingga arus elektronik *receiver* dapat mendeteksi sinyal dengan baik. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) untuk menaikkan level daya sinyal. Prinsip kerja EDFA sumber optik (CW laser) sebagai cahaya sinyal masukan dan laser *pumping* sebagai sinyal *pumping* digabungkan menggunakan *pump coupler* (Dutton, 1998:160).

Peletakan FBG, EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), dan panjang dari FBG pada sistem optik memiliki peran yang sangat penting. Saat FBG bersama dengan EDFA digunakan pada ujung dari *transmitter* pada sistem transmisi serat optik, kinerja yang dihasilkan lebih baik dibandingkan saat FBG dan EDFA diletakkan pada ujung *receiver* (Sharma, Singh, & Sharma, 2013).

Penelitian dalam skripsi ini akan membahas pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* sistem RoF dan analisis pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG untuk mengurangi dispersi yang terjadi dilakukan dengan menggunakan simulasi *OptiSystem*. Parameter yang dilihat berdasarkan nilai BER, *Q-factor* dan *loss*.

1.2 Rumusan Masalah

Transmisi informasi melalui serat optik terjadi konsekuensi pelebaran pulsa yang dikenal dengan dispersi, elemen seperti *numerical aperture*, diameter inti, nilai indeks bias, dan lebar spektral laser menyebabkan pelebaran pulsa. Jika pelebaran format sinyal ini dibiarkan memungkinkan terjadi *Intersymbol Interference* (ISI) yang menyebabkan pulsa *output* pada sistem menjadi tumpang tindih dan membuatnya tidak terdeteksi (Halina Abramczyk, 2007).

Untuk mengurangi permasalahan tersebut, diperlukan kompensator dispersi salah satunya dapat menggunakan FBG dimana indeks bias intinya berubah secara periodik dapat memperlambat panjang gelombang berbeda, sehingga FBG dapat difungsikan sebagai filter optik yakni untuk menghalangi panjang gelombang tertentu atau sebagai reflektor panjang gelombang cahaya spesifik (Agrawal, 2002).

Sistem transmisi *Radio over Fiber* (RoF) yang akan disimulasikan meliputi bagian transmitter, fiber *link*, dan *receiver*. Parameter yang dipengaruhi oleh peletakan FBG adalah BER, *Q-factor* dan *loss*. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate*?
2. Bagaimana pengaruh peletakan *Fiber Bragg Grating* terhadap kinerja transmisi *Radio over Fiber* dilihat dari parameter BER, *Q-factor* dan loss?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini batasan masalah terdiri dari tempat penelitian dan aspek penelitian. Tempat penelitian dilakukan di Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Aspek kajian terhadap permasalahan yang telah dirumuskan antara lain:

1. Simulasi dilakukan menggunakan *software* OptiSystem.
2. Teknik modulasi yang dipakai adalah modulasi eksternal.
3. *Line coding* yang digunakan adalah RZ, dan NRZ.
4. Sumber cahaya yang digunakan adalah *Continuous Wave* laser dengan panjang gelombang 1552.52 nm.
5. Frekuensi RF yang digunakan adalah 3.5 GHz.
6. Panjang serat optik yang digunakan adalah 10 sampai 100 km dengan penambahan 10 km.
7. *Photodetector* yang digunakan adalah APD.
8. Kompensator dispersi yang digunakan adalah *Chirped Fiber Bragg Grating*.
9. *Bit rate* yang digunakan pada rentang 5 dan 10 Gbps.
10. Parameter yang diamati adalah BER, *Q-factor* dan loss.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian pada skripsi ini adalah menganalisis pengaruh peletakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* untuk mengurangi dispersi yang terjadi pada transmisi *Radio over Fiber* yang bertujuan adanya peningkatan kualitas sinyal dilihat dari parameter BER, *Q-factor*, dan loss, menggunakan *software* OptiSystem.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan pada penelitian ini terdiri atas lima bab yang secara umum adalah sebagai berikut:

Bab I berisi tentang pendahuluan yang memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

Bab II mengkaji teori-teori yang menunjang skripsi yang meliputi konsep dasar *Radio over Fiber*, Serat Optik, *line coding*, *dispersi*, kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating*, komponen komunikasi optik, parameter kinerja, serta software *OptiSystem*.

Bab III berisi metode penelitian yang digunakan untuk menjawab rumusan masalah. Tahapan yang dilakukan dalam bab ini menjelaskan tentang cara menguji pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate*, serta pengaruh peletakan peletakan FBG terhadap kinerja sistem RoF dilihat dari parameter BER, *Q-factor* dan *loss*.

Bab IV berisi tujuan penelitian pada skripsi ini yaitu menganalisis pengaruh peletakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* untuk mengurangi dispersi yang terjadi pada sistem RoF dengan melakukan simulasi menggunakan software *OptiSystem*.

Bab V berisi kesimpulan dan saran yang diperoleh dari analisis yang telah dilakukan serta pemberian saran.

BAB II

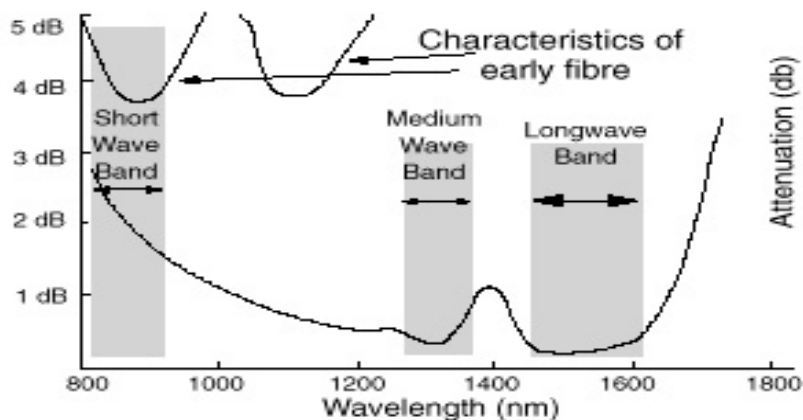
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Radio over Fiber*

Sistem *Radio over Fiber* merupakan suatu proses pengiriman sinyal radio melalui kabel serat optik. Prinsip dasar dari transmisi RoF adalah mentransmisikan sinyal radio analog melalui sambungan serat optik. Dengan menggunakan kabel serat optik sebagai medium perantaranya, mempunyai kelebihan yaitu Atenuasi rendah, *bandwidth* yang besar, kecepatan transmisi yang tinggi dan ketahanan yang tinggi terhadap noise yang dihasilkan oleh gelombang radio. (Al raweshidy, 2002).

- *Bandwidth* yang lebar dan Atenuasi yang rendah

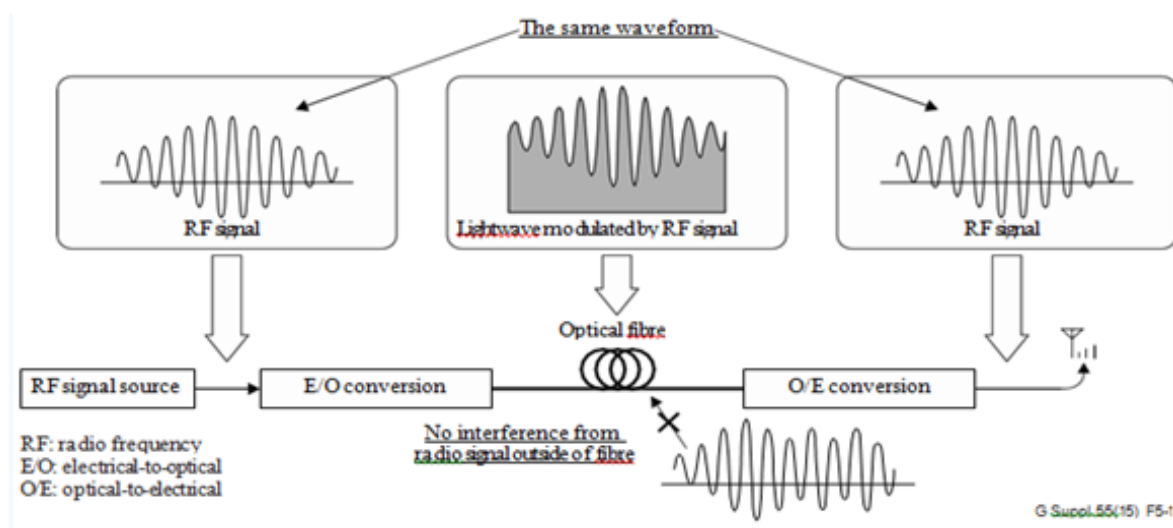
Serat optik memberikan *bandwidth* yang sangat lebar Secara komersial tipe fiber yang tersedia adalah Single Mode Fiber (SMF) yang terbuat dari kaca (silika) memiliki rugi-rugi atenuasi yang rendah dibawah 0,2 dB/km dan 0,5 dB/km pada panjang gelombang 1550 nm dan 1300 nm, POF memiliki atenuasi yang lebih tinggi bernilai 10 - 40 dB/km pada rentang panjang gelombang 500 – 1300 nm. Rugi-rugi ini lebih rendah dari pada yang biasa ditemui, seperti kabel koaksial, dimana kabel ini memiliki rugi-rugi 3 kali lipat lebih tinggi pada frekuensi yang tinggi. Sebagai contoh, atenuasi pada kabel koaksial sepanjang 0,5 inci (RG-214) bernilai >500 dB/km pada frekuensi diatas 5 GHz. Maka dari itu, mentransmisikan microwave pada fiber optik, jarak transmisi dapat meningkat berlipat-lipat dan daya transmisi yang dibutuhkan dapat diminimalisir secara signifikan. Pada serat optik ada tiga windows transmisi utama yang memberikan atenuasi rendah yaitu panjang gelombang 850 nm, 1310 nm dan 1550 nm, dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2.1 Spektrum panjang gelombang terhadap Atenuasi
(Sumber: imedeia.uib-csic.es)

- *Ketahanan terhadap Radio Frequency Interference*

Electromagnetic Interference (EMI) merupakan sifat yang penting pada sistem komunikasi. pada sistem komunikasi yang berbasis serat optik, hal ini tidak terlalu berpengaruh secara signifikan pada performa sistem, karena serat optik dan gelombang elektromagnetik terwujud dalam bentuk fisik yang berbeda. Kabel serat optik bersifat dielektrik, sehingga tidak mengalami gangguan ketika diganggu dengan sinyal elektromagnetik.

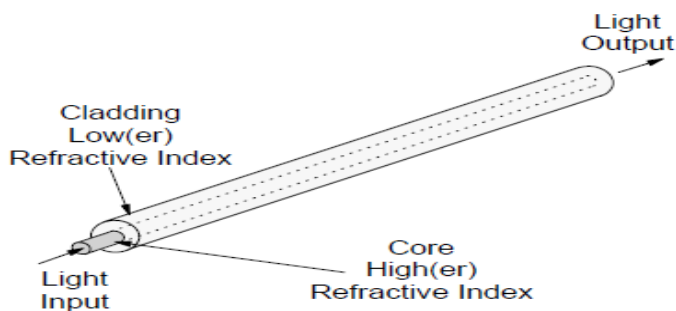


Gambar 2.2 Konsep Dasar Sistem RoF
(Sumber: ITU-T Series G, 2015)

Gambar 2.2 menunjukkan konsep dasar sistem RoF. RoF didefinisikan sebagai transmisi dari *base station* (BS) menuju *base transceiver station* (BTS) menggunakan medium transmisi serat optik. Gelombang yang dikirim mencakup informasi untuk layanan komunikasi radio seperti format gelombang radio. Sistem RoF terdiri dari komponen untuk *electrical to optical* (E/O), *optical to electrical* (O/E), dan medium transmisi serat optik.

2.2 Serat optik

Serat optik adalah salah satu media transmisi yang dapat menyalurkan informasi dengan kapasitas besar dengan keandalan yang tinggi. Serat optik terbuat dari kaca atau plastik yang sangat halus dan sangat tipis. Bentuk paling sederhana yang menyusun serat optik yaitu inti (core) silinder dari kaca silica yang dikelilingi selubung dengan indeks bias yang lebih rendah dibandingkan inti (Agrawal, 2002). Berikut struktur dasar serat optik dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur dasar serat optik
(Sumber: Dutton, 1998)

Inti (*core*) merupakan bagian inti dari serat optik, tempat cahaya dilewatkan. Pada bagian ini mengalir informasi yang akan disampaikan dari pengirim ke penerima, bisa berupa data maupun suara dengan berbagai aplikasi dan konten di dalamnya. Terbuat dari bahan *silica* (SiO_2) atau plastik dan merupakan tempat merambatnya cahaya. Diameternya berkisar antara 8 sampai 62.5 *micron*.

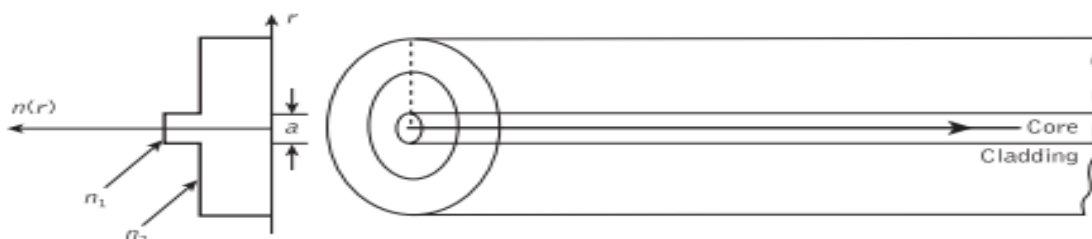
Selubung (*cladding*) mengelilingi inti yang berfungsi memantulkan cahaya kembali ke dalam inti (*core*). Terbuat dari bahan yang sama dengan inti tapi memiliki indeks bias yang lebih kecil agar cahaya tetap berada pada inti serat optik.

Kebanyakan sistem gelombang cahaya menggunakan serat optik sebagai saluran komunikasinya karena *silica* dapat mentransmisikan cahaya dengan losses hanya 0.2 dB/km. bahkan daya optik berkurang hanya 1% setelah 100 km (Agrawal, 2002).

2.3 Jenis Serat Optik

2.3.1. Singlemode

Serat optik jenis *singlemode* mempunyai diameter *core* (inti) yang kecil antara 8-10 mikron. Gambar 2.4 menunjukkan perambatan cahaya pada serat optik *singlemode*. Karena diameter *core* kecil, *singlemode* hanya mempunyai satu mode cahaya yang lewat di dalamnya. Biasanya digunakan untuk transmisi jarak jauh dengan kecepatan tinggi dan memiliki *loss* yang lebih kecil dari serat optik *multimode*.



Gambar 2.4 Perambatan Cahaya Serat Optik *Singlemode*
(Sumber: John M. Senior, 2009)

2.3.2. Multimode

Serat optik jenis *multimode* mempunyai inti yang lebih besar dari *singlemode* dengan diameter 50-80 mikron. Pada jenis ini banyak mode cahaya yang lewat di dalamnya. Pada saat sebuah pulsa cahaya masuk ke serat optik *multimode*, daya pulsa didistribusikan hampir ke seluruh mode dimana setiap mode memiliki kecepatan yang berbeda, sehingga mode dengan kecepatan yang lebih tinggi akan sampai terlebih dahulu yang disebut dengan *modal dispersion*. Serat optik jenis ini biasanya digunakan untuk transmisi jarak pendek dengan kecepatan rendah karena memiliki loss yang besar. Berdasarkan mode perambatannya, serat optik *multimode* dibagi dua yaitu:

a. Step index multimode

Serat optik *step index multimode* memiliki nilai indeks bias inti yang seragam di seluruh bagian inti. Hal ini mengakibatkan adanya selisih antara indeks bias inti dengan indeks bias selubung. Perambatan cahaya *step index multimode* ditunjukkan pada Gambar 2.5. Perbedaan indeks bias antara *core* dan *cladding* (Δ) secara sistematis dihitung menggunakan Persamaan (2.1) (Keiser, 1991):

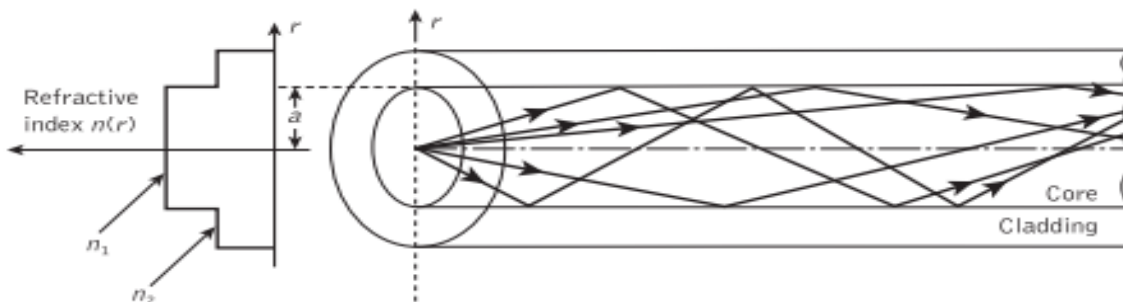
$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-1)$$

dimana:

n_1 = indeks bias *core*

n_2 = indeks bias *cladding*

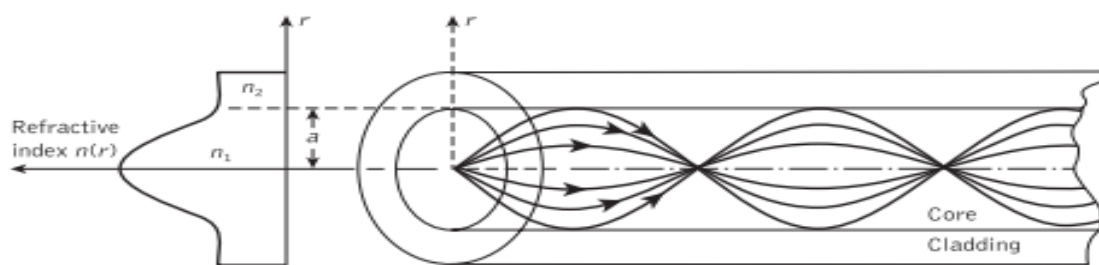
Δ = perbedaan relatif indeks bias



Gambar 2.5 Perambatan Cahaya Step Index Multimode
(Sumber: John M. Senior, 2009)

b. Graded index multimode

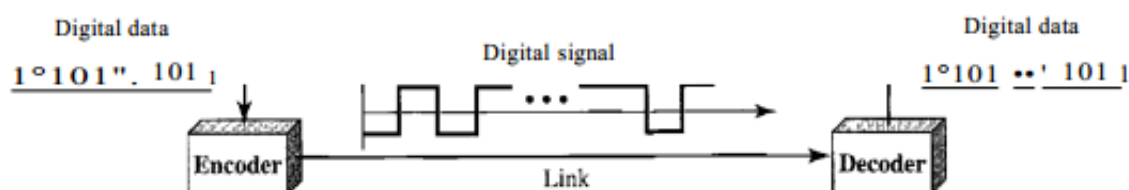
Serat optik jenis *Graded index multimode* memiliki inti dengan penurunan bertahap pada indeks bias ketika jaraknya semakin jauh dengan sumbu inti dan akan membentuk mode parabola seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



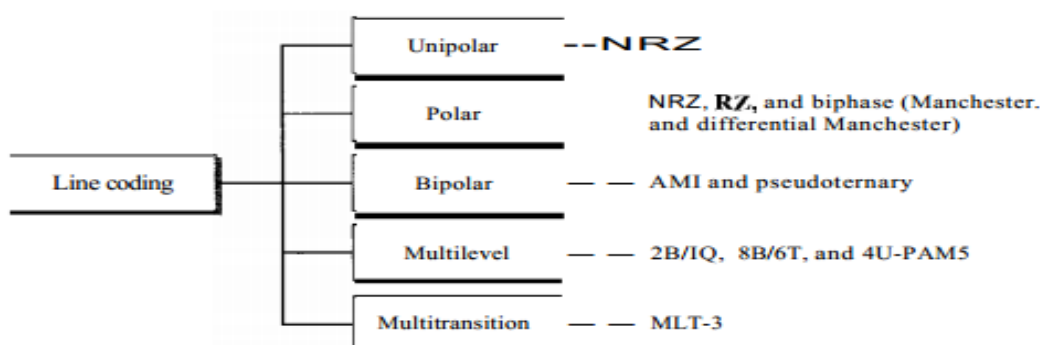
Gambar 2.6 Perambatan Cahaya *Graded Index Multimode*
(Sumber: John M. Senior, 2009)

2.4 Line Coding

Line coding adalah proses konversi data digital ke sinyal digital. Data dalam bentuk teks, angka, gambar grafis, audio, atau video disimpan sebagai urutan bit. *Line coding* mengkonversi urutan bit ke sinyal digital. Pada pengirim, data digital dikodekan menjadi sinyal digital, sedangkan pada penerima, data digital dikonversi kembali menjadi sinyal digital oleh *decoding*. Gambar 2.7 menunjukkan proses *line coding* dan Gambar 2.8 menunjukkan skema pembagian *line coding* dalam lima kategori besar.



Gambar 2.7 *Line Coding*
(Sumber: Forouzan, 2007)

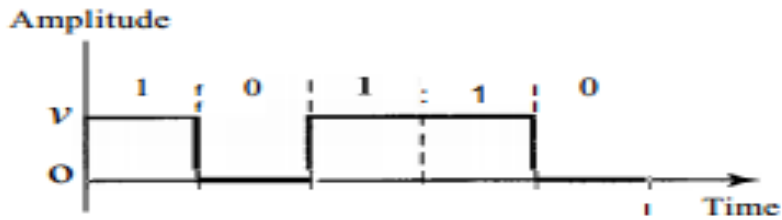


Gambar 2.8 Skema *Line Coding*
(Sumber: Forouzan, 2007)

2.4.1 Unipolar

Dalam skema *unipolar*, semua level sinyal pada satu sisi sumbu waktu, baik di atas atau di bawah. Pada umumnya skema *unipolar* dirancang sebagai skema *Non-Return-to-*

Zero (NRZ) di mana tegangan positif mendefinisikan bit 1 dan tegangan nol mendefinisikan bit 0. Oleh karena itu disebut NRZ karena sinyal tidak kembali ke nol pada bit tengah. Gambar 2.9 menunjukkan skema *unipolar* NRZ.



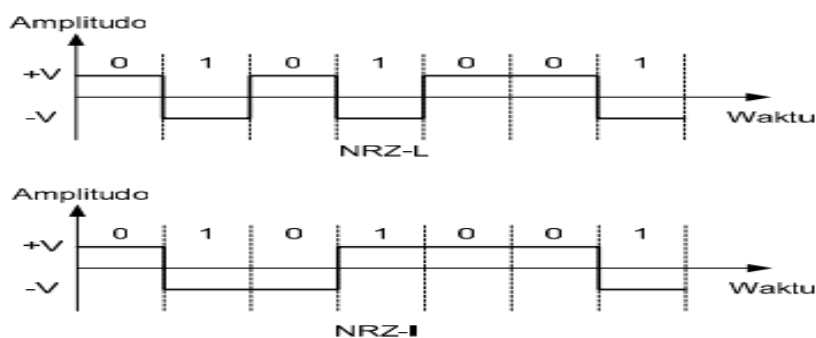
Gambar 2.9 Skema *Unipolar* NRZ
(Sumber: Forouzan, 2007)

2.4.2 Polar

Dalam skema *polar*, tegangan berada di kedua sisi dari sumbu waktu. Dalam sinyal *polar*, satu logika diwakili oleh level tegangan positif, dan yang lainnya dengan level tegangan negatif.

2.4.3 Nonreturn-to-Zero

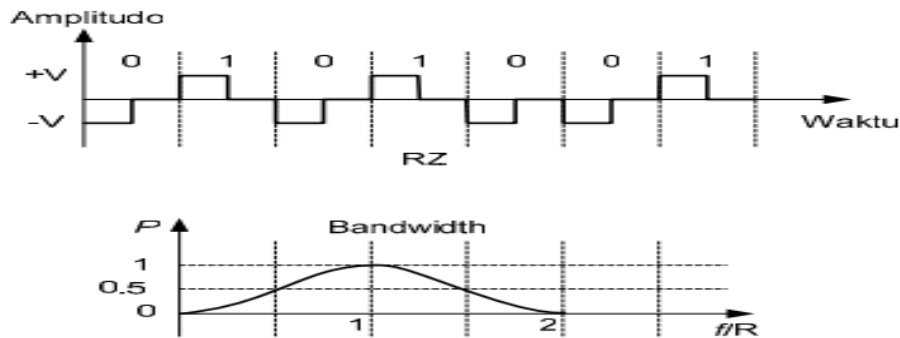
Pengkodean digital *nonreturn-to-zero* (NRZ) dibagi menjadi dua yaitu NRZ-Level (NRZ-L) dan NRZ-Invert (NRZ-I). Pada NRZ-L level tegangan menentukan nilai bit, bit 1 dan bit 0 direpresentasikan dengan level tegangan dari sinyal, sedangkan pada NRZ-I bit 1 dan bit 0 dibedakan oleh ada atau tidaknya perubahan level tegangan dari sinyal, jika tidak ada perubahan bit adalah 0, tapi jika ada perubahan adalah 1. Konversi data digital menjadi sinyal digital dengan menggunakan NRZ-L dan NRZ-I ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Dengan mengamati bentuk sinyal NRZ-L dan NRZ-I kita dapat melihat bahwa kedua modulasi polar ini masih akan mengalami apa yang disebut dengan *baseline wandering*. Pada NRZ-L *baseline wandering* akan terjadi apabila terdapat deretan panjang bit 1 atau bit 0, sedangkan pada NRZ-I *baseline wandering* hanya terjadi pada deretan panjang bit 0 saja. Dalam hal ini NRZ-I lebih baik daripada NRZ-L.



Gambar 2.10 Pengkodean Digital dengan NRZ-L dan NRZ-I
(Sumber: Forouzan, 2007)

2.4.4 Return-to-Zero

Kekurangan dari NRZ-L dan NRZ-I diperbaiki oleh pengkodean digital *return-to-zero* (RZ). RZ menggunakan tiga level tegangan (tegangan positif, nol dan negatif) seperti pada Gambar 2.11. Dengan demikian persoalan munculnya komponen DC pada NRZ dapat dieliminasi oleh RZ.

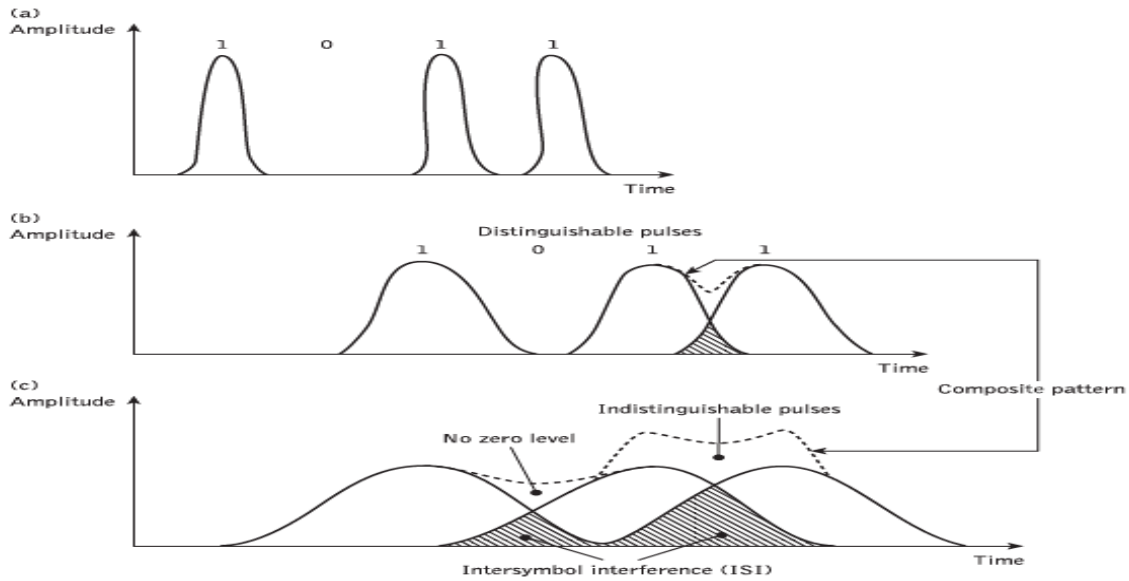


Gambar 2.11 Pengkodean Digital RZ dan Karakteristik Bandwidth RZ
(Sumber: Forouzan, 2007)

Pengkodean RZ selalu mengembalikan sinyal ke tegangan nol pada saat sinyal telah mencapai setengah durasi sinyal. Tapi karena RZ menggunakan 2 sinyal elemen untuk merepresentasikan sebuah elemen data, hal ini berakibat pada kenaikan bandwidth sebanyak dua kali lipat dibandingkan dengan NRZ. Selain itu, karena RZ membutuhkan tiga level tegangan maka perangkat dengan kompleksitas tinggi dibutuhkan untuk membangkitkan sinyal RZ, oleh karena itu skema ini tidak digunakan.

2.5 Dispersi

Dispersi pada sinyal optik yang ditransmisikan menyebabkan distorsi untuk transmisi digital maupun transmisi analog di sepanjang serat optik. Saat mempertimbangkan implementasi utama dari serat optik yang melibatkan beberapa bentuk modulasi digital, maka mekanisme dispersi dalam serat optik yang menyebabkan pelebaran pulsa cahaya yang ditransmisikan di sepanjang saluran (Senior, John, 2009). Ilustrasi mengenai dispersi dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Ilustrasi pelebaran pulsa cahaya saat menjalar di sepanjang serat optik: (a) sinyal masukan; (b) pelebaran pulsa; (c) *Intersymbol Interference* (Sumber: Senior, John, 2009)

Karena dispersi modal tidak dapat terjadi pada serat optik *single mode*, sumber utama dari dispersi pada *single mode* adalah dispersi kromatik, dispersi material, dan dispersi pandu gelombang.

Dispersi serat total merupakan akar dari penjumlahan semua dispersi dalam serat optik. Secara matematik dinyatakan dengan (Ming-Kang Liu, 2002):

$$\tau_{fiber} = \sqrt{\tau_{material}^2 + \tau_{waveguide}^2 + \tau_{intermodal}^2} \quad (2-2)$$

dengan:

$$\begin{aligned} \tau_{fiber} &= \text{dispersi total serat (ps)} \\ \tau_{material}^2 &= \text{dispersi pandu gelombang (ps)} \\ \tau_{intermodal}^2 &= \text{dispersi intermodal (ps)} \\ \tau_{waveguide}^2 &= \text{dispersi pandu gelombang (ps)} \end{aligned}$$

2.5.1 Dispersi kromatik

Dispersi kromatik atau dispersi intramodal dapat terjadi pada semua tipe serat optik dan dihasilkan dari *linewidth* spektral tampak dari sumber optik. Karena sumber optik tidak hanya memancarkan frekuensi tunggal, maka kemungkinan akan terjadi perbedaan *delay* propagasi antar komponen *spectral* yang berbeda dari sinyal yang ditransmisikan. Hal ini menyebabkan pelebaran pada setiap mode yang ditransmisikan, perbedaan *delay*

disebabkan oleh sifat dispersi dari material pandu gelombang (material dispersion) dan juga efek panduan di dalam struktur serat (waveguide dispersion) (senior, John, 2009).

Dispersi intramodal merupakan jumlah dari dispersi material dan dispersi pandu gelombang (Muflihatin, 2002):

$$\tau_{intramodal} = \tau_{material} + \tau_{waveguide} \quad (2-3)$$

dengan:

$$\tau_{intramodal} = \text{dispersi intramodal (ps)}$$

$$\tau_{material} = \text{dispersi bahan (ps)}$$

$$\tau_{waveguide} = \text{dispersi pandu gelombang (ps)}$$

2.5.2 Dispersi material

Pelebaran pulsa disebabkan oleh hasil dispersi material dari kelompok kecepatan yang berbeda pada berbagai komponen spektral yang diluncurkan ke serat optik dari sumber optik (Senior, John, 2009). Persamaan untuk dispersi material ditunjukkan pada (DeCusatis, 2002):

$$\tau_{material} = \tau_{dm} \times \Delta\lambda \times D \quad (2-4)$$

dimana:

$$\tau_{material} = \text{dispersi bahan (ps)}$$

$$\tau_{dm} = \text{koefisien dispersi material (ps/(nm.km))}$$

$$\Delta\lambda = \text{lebar spektral sumber cahaya (nm)}$$

$$D = \text{panjang serat optik (km)}$$

2.5.3 Dispersi pandu gelombang

Pandu gelombang dari serat optik juga bisa mengakibatkan dispersi kromatik. Hal ini disebabkan dari variasi kecepatan dengan panjang gelombang pada mode tertentu (Senior, John, 2009).

Persamaan untuk dispersi pandu gelombang yaitu (DeCusatis,2002):

$$\tau_{waveguide} = \frac{D}{c\lambda} (n_1 - n_2) t_{wg} \Delta\lambda \quad (2-5)$$

dimana:

$$\tau_{waveguide} = \text{dispersi pandu gelombang (s)}$$

$$D = \text{panjang serat optik (km)}$$

$$n_1 = \text{indeks bias inti}$$

n_2 = indeks bias selubung

t_{wg} = koefisien dispersi tanpa dimensi yang didapat dari persamaan:

$$t_{wg} = \frac{4(1-\ln v)}{v^2} \quad (2-6)$$

v = frekuensi ternormalisasi, menyatakan batas mode-mode sinyal optik yang dapat berpropagasi di dalam inti serat optik, dengan persamaan:

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-7)$$

dimana:

a = jari – jari inti serat optik (μm)

λ = panjang gelombang pusat pancaran (μm)

$\Delta\lambda$ = lebar spectrum sumber cahaya (nm)

C = kecepatan cahaya di ruang hampa (m/s)

2.6 Fiber Bragg Grating

kaca pada serat optik dapat diubah menggunakan cahaya laser secara intens. Kenyataan ini mengarah pada suatu manufaktur yang disebut *Fiber Bragg Grating* (FBG). Gambar 2.17 menunjukkan aplikasi FBG. Kisi-kisi yang terdapat di dalam inti serat ini telah merevolusi sistem komunikasi serat optik. FBG dapat digunakan sebagai kompensator dispersi, aplikasi filter, koversi *mode*, pemerataan *gain*, dan multipleksing panjang gelombang. FBG pertama kali ditemukan pada tahun 1978 oleh Hill et al. Awalnya kisi-kisi dibuat oleh interferensi antara gelombang yang menjalar ke depan dan ke belakang. Gelombang yang menjalar ke belakang dihasilkan dari pemantulan Fresnel pada sisi keluaran. Pada puncak dari pola interferensi ini, dimana cahaya adalah yang paling kuat, interaksi antara cahaya dan Ge rusak di dalam kaca sehingga mengubah indeks bias $\Delta n \approx 10^{-3} - 10^{-5}$. Periode kisi kisi ini diberikan pada persamaan (2.8) (DeCusatis, 2002):

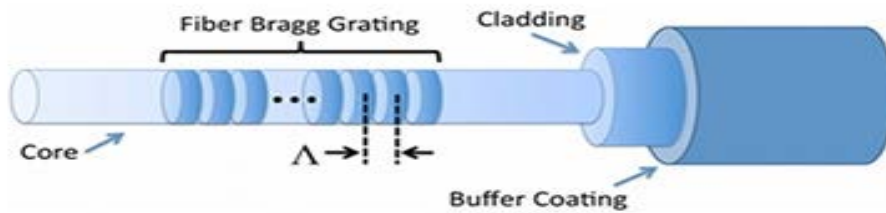
$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n_{eff}} \quad (2-8)$$

dimana:

Λ = periode kisi

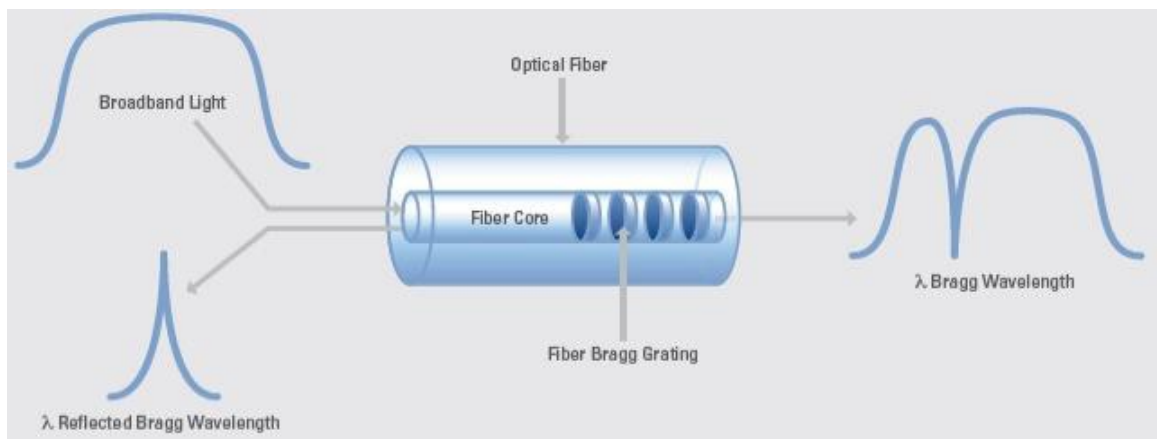
λ = panjang gelombang yang dipantulkan (nm)

n_{eff} = indeks bias efektif dari kisi pada inti serat



Gambar 2.13 Penerapan Fiber Bragg Grating pada serat optik
(Sumber: National Instrumen, 2011)

Gambar 2.14 merupakan prinsip kerja FBG. Suatu kisi serat optik memantulkan panjang gelombang mendekati panjang gelombang Bragg ($\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda$). Pemantulan terjadi karena cahaya sebagian dipantulkan pada tiap puncak indeks bias dan pemantulan maksimum terjadi saat sebagian pemantulan berada satu fasa dengan yang berada di sebelahnya (DeCusatis, 2002).

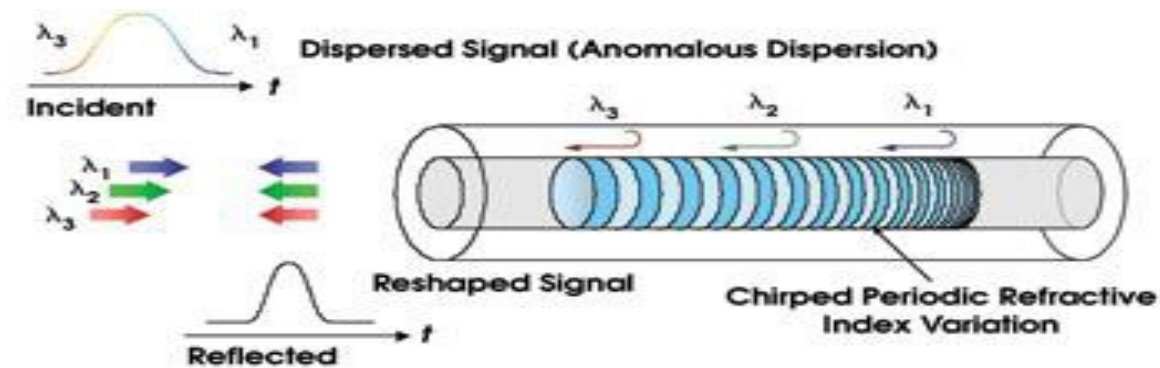


Gambar 2.14 Prinsip kerja *fiber bragg grating*
(Sumber: National Instrumen, 2011)

Salah satu aplikasi dari FBG ini adalah sebagai kompensator dispersi. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, indeks bias merupakan fungsi dari panjang gelombang pada kaca. Pulsa cahaya akan selalu mengalami pelebaran dalam fungsi waktu selama melakukan penjalaran di sepanjang serat. Pelebaran ini menjadi suatu masalah besar pada sistem dengan *bandwidth* yang tinggi karena menyebabkan pulsa saling bergabung sehingga tidak dapat dideteksi. Dengan menggunakan FBG dimana periode kisi berubah secara linear di sepanjang serat (disebut juga *chirped* FBG) dapat memperlambat panjang gelombang berbeda sehingga mempertajam pulsa pada waktunya. Kompensator dispersi FBG di atas 1500 ps/nm pada daerah panjang gelombang sekitar 1550 nm telah tersedia secara komersial.

Chirp pada kisi-kisi memiliki banyak bentuk. Periode nya dapat bervariasi secara simetris, mengalami peningkatan atau penurunan periode di tengah kisi. *Chirp* dapat bersifat linear, kuadratik, atau bahkan memiliki periode yang melompat. Suatu kisi juga dapat

memiliki periode yang berubah secara acak seiring dengan panjangnya. *Chirp* yang paling sering digunakan adalah *uniform* dan *linear chirp* (Kashap, 1999).



Gambar 2.15 Prinsip kerja *chirped* FBG sebagai kompensator dispersi
(Sumber: www.photonics.com)

Gambar 2.15 menjelaskan prinsip kerja *chirped* FBG sebagai kompensator dispersi. Pada *chirped* FBG, periode dari indeks modulasi yang diinduksi bervariasi di sepanjang kisi. Dengan perubahan periode kisi di sepanjang sumbu, panjang gelombang yang berbeda dipantulkan dengan porsi berbeda dari kisi dan oleh karena itu tertunda oleh perbedaan waktu. Efeknya adalah kompresi dari pulsa input yang disesuaikan untuk mengkompensasi dispersi kromatik yang terjadi di sepanjang serat. Meskipun masuk ke dalam kisi pada waktu yang berbeda, komponen panjang gelombang dari pulsa yang mengalami pelebaran semua akan kembali ke jalur masukan pada waktu yang sama (www.photonics.com).

Untuk mendapatkan panjang kisi, L disesuaikan dengan *delay* refleksi dan *bandwidth* output kisi yang diinginkan (Muflihatin, 2002).

$$L = \frac{c \cdot \Delta\lambda_g \cdot t_g}{2n_{eff}} \quad (2-9)$$

dimana:

L = panjang kisi (m)

c = kecepatan cahaya di ruang hampa (m/s)

$\Delta\lambda_g$ = *bandwidth* kisi (nm)

t_g = *delay* refleksi FBG (ps/nm)

n_{eff} = indeks bias efektif dari kisi pada inti serat

Bandwidth kisi adalah lebar rentang panjang gelombang yang dapat direfleksikan agar diperoleh lebar spektrum pulsa keluaran FBG dengan karakteristik yang sama.

$$\Delta\lambda_g = \Delta\lambda \quad (2-10)$$

dimana:

$\Delta\lambda_{-g}$ = bandwidth kisi (nm)

$\Delta\lambda$ = lebar spektrum sumber optik (nm)

Bila *bandwidth* kisi tidak sama dengan lebar spektrum sumber optik, maka akan mempengaruhi besarnya dispersi yang muncul di sepanjang serat setelah peletakan FBG juga terhadap kisinya. *Delay* refleksi FBG yang dihasilkan harus sama dengan besar dispersi yang muncul untuk mendapatkan keseluruhan panjang gelombang dalam lebar spektral pulsa optik tiba pada waktu yang sama setelah melewati FBG.

$$t_g = \frac{\tau_{material} \cdot D_{(FBG)}}{\Delta\lambda_{-g}} \quad (2-11)$$

dimana:

t_g = *delay* refleksi FBG (ps/nm)

$\tau_{material}$ = dispersi bahan (ps)

$D_{(FBG)}$ = jarak peletakan FBG (km)

$\Delta\lambda_{-g}$ = bandwidth kisi (nm)

Dispersi total serat optik setelah peletakan *chirped* FBG dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\tau_{fiber} = \sqrt{(t_g \cdot \Delta\lambda_{-g})^2 + D^2(\tau_{waveguide}^2 - \tau_{intermodal}^2)} \quad (2-12)$$

dimana:

τ_{fiber} = dispersi total serat (ps)

t_g = *delay* refleksi FBG (ps/nm)

$\Delta\lambda_{-g}$ = bandwidth kisi (nm)

D = panjang serat optik (km)

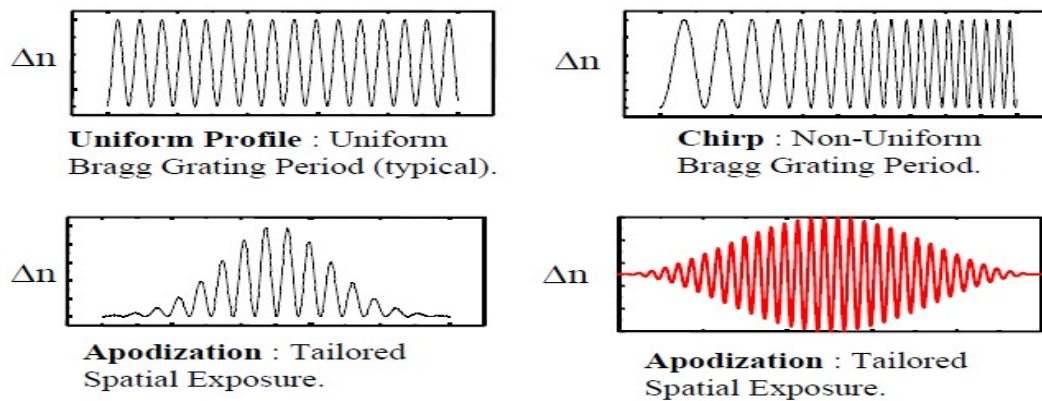
$\tau_{waveguide}$ = dispersi pandu gelombang (ps)

$\tau_{intermodal}$ = dispersi intermodal (ps)

Keuntungan utama dari penggunaan FBG sebagai teknik kompensasi dispersi adalah biaya yang dikeluarkan efektif dan memiliki *insertion loss* rendah dan terdapat komponen pasif yang cocok dengan *single mode fiber*. Pengaplikasian FBG dapat ditemukan pada medan yang berbeda seperti *filter add and drop* WDM, pompa laser, dan penstabil panjang gelombang (Singh, 2015).

Pembentukan kisi dalam serat optik dapat dilakukan dengan penyinaran serat

menggunakan sumber optik untuk mendapatkan indeks bias inti yang berubah-ubah dengan periode tertentu yang sejajar (Edita Rosana, 2013). Jenis-jenis FBG berdasarkan perubahan indeks biasanya dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Perubahan indeks bias untuk berbagai tipe kisi
(Sumber: Chiareli, 1999)

Tipe kisi *uniform* mempunyai periode tetap dalam arah membujur dengan refleksi panjang gelombang yang curam dan puncak yang tajam. Dimungkinkan bandwidth 0,1 bahkan lebih kecil tergantung pada kisi.

Tipe kisi *chirped* mempunyai periode berubah-ubah dalam arah membujurnya. Perubahan periode yang kontinyu akan menjadikan perubahan secara kontinyu pula terhadap panjang gelombang yang dipantulkan dan akan didapatkan bentuk gelombang yang lebar.

Teknik kisi “*apodization*”, yaitu amplitudo perubahan indeks bias kisi (Δn) berubah sepanjang kisinya agar dapat menekan panjang gelombang pada *sidelobe* yang tidak diinginkan, selain itu dipergunakan untuk mengatur bentuk spektrum *envelope* refleksinya (Edita Rosana, 2013).

2.7 Continuous wave (CW) laser

CW laser memancarkan gelombang elektromagnetik yang terus menerus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17. LASER merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Dalam percobaan ini CW laser ditetapkan sebagai sumber cahaya. CW laser merupakan laser dengan keluaran kontinyu lebih dari atau sama dengan 0.25 watt yang bersifat konstan dalam pengiriman daya laser.



Gambar 2.17 CW laser
(Sumber: www.springer.com)

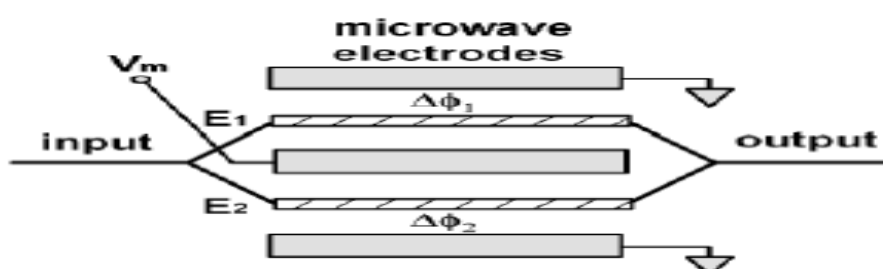
Tabel 2.1 Perbandingan Karakteristik LED dan LD
(Sumber: Syauki, 2008)

No.	Karakteristik	LED	LD
1.	Waktu jangkit (detik)	2 – 10	0,3 – 1,0
2.	Daya keluaran (mW)	0,5 – 4,0	1,5 – 8,0
3.	Lebar spektrum (nm)	30 – 150	1 – 10
4.	Rugi-rugi kopling	Lebih besar	Lebih kecil
5.	Kepekaan suhu	Lebih tahan	Peka perubahan

2.8 Mach-Zehnder Modulator

Untuk pemancar dengan kecepatan yang tinggi, laser dibiaskan pada arus yang konstan untuk memberikan output CW, dan modulator optik ditempatkan setelah laser yang berfungsi mengubah cahaya CW menjadi deretan data pulsa yang dikodekan dengan format modulasi yang tepat. Modulator optik *Mach Zehnder* memanfaatkan bahan LiNbO₃ (*lithium niobate*) dan Mach-Zehnder (MZ) interferometer untuk modulasi intensitas. Dua titanium didifusikan ke pandu gelombang LiNbO₃ dari dua lengan interferometer MZ. Indeks bias bahan elektro- optik seperti LiNbO₃ dapat diubah dengan menerapkan tegangan eksternal. Dengan tidak adanya tegangan eksternal, bidang optik di dua lengan MZ akan berinterferensi secara konstruktif. Pergeseran fasa tambahan terjadi di salah satu lengan melalui perubahan indeks tegangan induksi yang menghilangkan sifat konstruktif dan mengurangi intensitas yang ditransmisikan. Secara spesifik, tidak ada cahaya ditransmisikan ketika perbedaan fasa antara kedua lengan sama dengan π , karena interferensi destruktif terjadi (Agrawal, 2002).

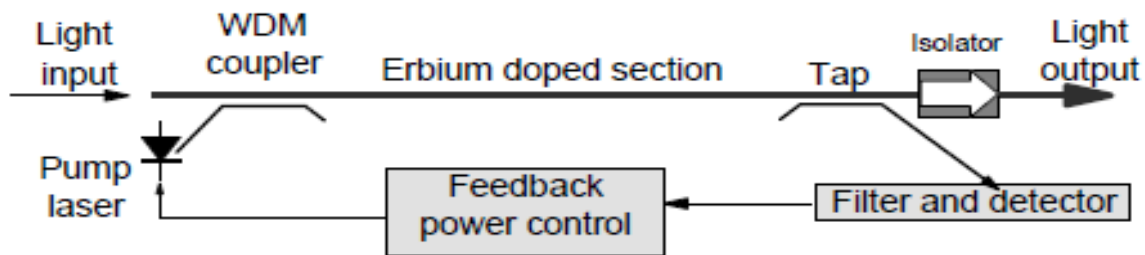
Dalam sebuah modulator EO berkas cahaya terbelah dua dan kemudian dikirim melalui dua jalur yang terpisah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Struktur Mach-Zehnder Modulation
(Sumber: Hodžić, 2004)

2.9 Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

EDFA terdiri dari serat serat pendek (biasanya 10 meter atau lebih) yang memiliki sejumlah kecil elemen erbium (unsur bumi yang cukup langka) yang ditambahkan pada kaca dalam bentuk sebuah ion (Er^{3+}). **Gambar 2.19** merupakan ilustrasi dari EDFA.



Gambar 2.19 *Erbium Doped Fiber Amplifier*

(Sumber: Dutton, 1998:159)

Prinsip yang terlibat di sini adalah prinsip laser dan sangat sederhana. Ion erbium dapat ditemukan dalam beberapa kondisi energy. Saat ion erbium dalam kondisi energy tinggi, cahaya foton akan menstimulasi ion untuk mengalirkan sebagian energinya (dalam bentuk cahaya) dan kembali pada keadaan yang energinya lebih rendah (lebih stabil).

Agar prinsip ini dapat bekerja, dibutuhkan cara untuk membuat atom erbium berada pada kondisi paling tinggi energinya. Laser diode pada diagram menghasilkan cahaya sorot dengan daya yang tinggi (antara 10 dan 100 mW) pada panjang gelombang sehingga ion erbium akan menyerapnya dan melompat ke kondisi paling tinggi (cahaya pada panjang gelombang 980 nm atau 1480 nm akan melakukan hal ini cukup baik). (Dutton, 1998:160).

2.10 Detektor Optik

Detektor optik merupakan alat yang dapat mengubah energi cahaya menjadi energi listrik kembali. Detektor optik bekerja berdasarkan prinsip emisi fotolistrik yaitu terjadinya pembebasan elektron dari permukaan laser sebagai hasil penyerapan energy foton. Tabel 2.2 menunjukkan perbandingan karakteristik antara PIN dan APD.

Tabel 2.2 Perbandingan Parameter dan Karakteristik PIN dan APD

(Sumber: Syauki, 2008)

No.	Karakteristik	PIN	APD
1.	Daya optik minimum	Lebih besar	Lebih kecil
2.	Responsivitas	0,35 – 0,8	2,5 – 120
3.	Penguatan	1	10 – 250
4.	Derau detektor	Lebih kecil	Lebih besar
5.	Waktu jangkit	0,06	0,1 – 0,3

2.11 Kinerja Serat Optik

Kinerja serat optik dipengaruhi oleh besar rugi-rugi (*losses*). Nilai *losses* dalam serat optik dituliskan dalam satuan *decibel* (dB) atau dalam dBm. Untuk menghitung *losses* nilai daya atau tegangan masukan dan keluaran harus diketahui. Cara perhitungan *losses* ditunjukkan pada persamaan (2.13) (Bhargava, 1984).

$$L = 10 \log \frac{P_i}{P_o} = 10 \log \left(\frac{V_i^2}{V_o^2} \right) = 20 \log \frac{V_i}{V_o} \quad (2-13)$$

dimana:

L = losses (dB)

P_i = daya masukan (Watt)

P_o = daya keluaran (Watt)

V_i = tegangan masukan (Volt)

V_o = tegangan keluaran (Volt)

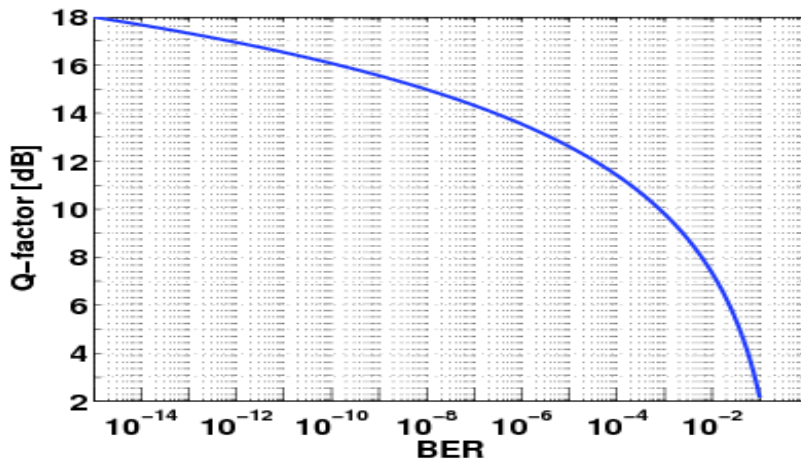
Tegangan merupakan parameter yang penting dalam pengukuran kinerja suatu sistem untuk mengetahui *losses*. Parameter lain yang digunakan untuk mengukur kualitas sistem termasuk kinerja serat optik yaitu BER dan *eye pattern*.

2.12 Q-factor

Q-Factor adalah faktor kualitas yang akan menentukan bagus atau tidaknya suatu link pada suatu jaringan. Kriteria Q-Factor untuk mengevaluasi performa sistem transmisi seringkali dikombinasikan dengan pengukuran BER. Q-Factor didefinisikan sebagai metode yang digunakan untuk memperhitungkan berdasarkan ketidaktepatan distribusi Gaussian (Vorgelegt, 2004:78). Hubungan antara BER dan Q-Factor ditunjukkan pada persamaan (Wan Rizal, 2011):

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (2-14)$$

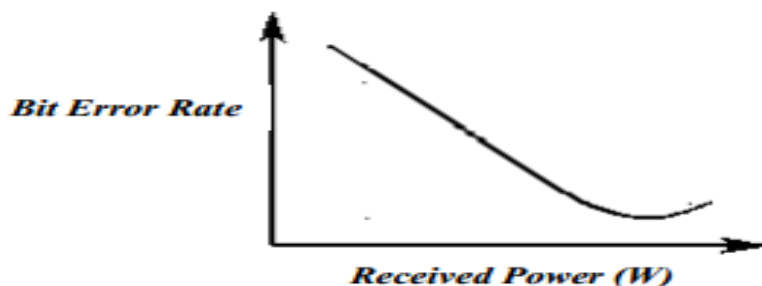
Metode perhitungan Q-Factor memungkinkan estimasi BER yang bagus. Dari Gambar 2.20 menunjukkan hubungan Q-Factor terhadap BER, seperti yang kita lihat, semakin tinggi nilai Q-Factor, BER yang terjadi semakin baik.



Gambar 2.20 Grafik Hubungan BER dan Q -factor
(Sumber: www.photonics.com)

2.13 Bit Error Rate

Rugi-rugi pada serat optik mengurangi besar daya yang diterima pada penerima. Hal ini akan mempengaruhi kinerja sistem yang diindikasikan dalam parameter Bit Error Rate seperti yang ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 2.18. Ketika daya yang diterima semakin kecil, nilai Bit Error Rate akan tinggi. Hal ini menunjukkan banyak kesalahan data pada data yang ditransmisikan dalam sistem.



Gambar 2.21 Kurva Bit Error Rate terhadap Daya yang Diterima
(Sumber: The Fiber Optic Association, 2009)

BER disebut juga probabilitas bit error (P_e) merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER menyatakan berapa jumlah bit salah yang terjadi dalam dalam satuan detik. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit salah terhadap total bit yang ditransmisika. Aplikasi pada ITU-T G.691, ITU-T G.692, dan ITU-T G.959.1 menyatakan bahwa sistem optik harus didesain dengan nilai BER tidak kurang dari 10^{-12} .

Kesalahan *bit* pada pentransmisian data dapat terjadi karena adanya distorsi gelombang acak. Dengan kata lain, saat noise mengganggu sinyal transmisi yang stabil terhadap waktu dalam t detik maka perhitungan menjadi lebih mudah dilakukan, tapi jika *bust error* terjadi

maka perhitungan *bit error* akan menjadi lebih lama. BER dinyatakan sebagai fungsi waktu yang secara matematis ditunjukkan pada persamaan (2.15) (Hui, Rongqing, 2009).

$$BER = \frac{1}{\Delta t \times BR} \quad (2-15)$$

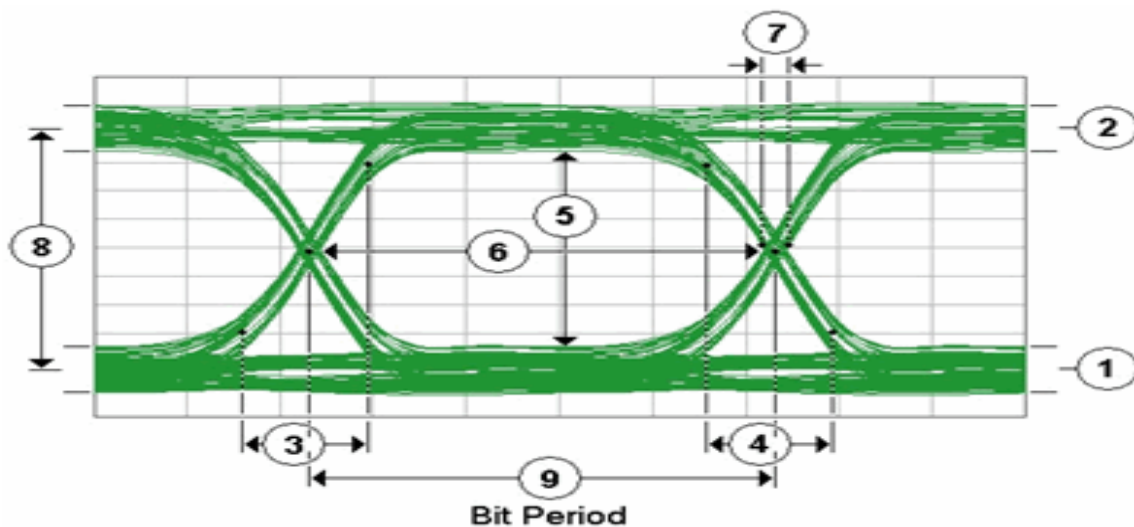
dimana:

Δt = interval waktu perhitungan, *gettering time* (detik)

BR = *bit rate* (bit/sec)

2.14 Eye Pattern

Eye pattern disebut juga dengan *eye diagram* yang merupakan tampilan osiloskop data digital dari *receiver* yang mengalami beberapa kali proses *sampling* untuk mengetahui karakteristik dari sinyal tersebut. *Eye pattern* menunjukkan kualitas sinyal pada transmisi data kecepatan tinggi. *Eye pattern* akan berbentuk persegi pada kondisi ideal, tapi karena dalam sistem transmisi data terdapat redaman, transisi tidak berupa garis vertikal yang lurus dan menghasilkan pola seperti mata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.22 *Eye Diagram*
(Sumber: <http://na.support.keysight.com>)

1. Level 0

Level 0 adalah ukuran dari nilai rata-rata dari logika 0

2. Level 1

Level 1 adalah ukuran dari nilai rata-rata dari logika 1

3. Rise Time

Rise time adalah ukuran waktu transisi data dari level 10% ke level 90% di lereng atas dari diagram mata.

4. *Fall Time*

Fall Time adalah ukuran dari waktu transisi data dari tingkat 90% ke level 10% pada kemiringan ke bawah dari diagram mata.

5. *Eye Height*

Eye Height adalah ukuran vertikal diagram *eye opening*. *Eye opening* yang ideal akan diukur dari level 1 ke level 0. Namun, *noise* pada *eye pattern* akan menyebabkan pola yang menutup.

6. *Eye Width*

Eye Width adalah ukuran horizontal diagram *eye opening*. Idealnya, *eye width* akan diukur antara titik persimpangan pada *eye pattern*. Namun, *jitter* dapat muncul pada gelombang dan mempengaruhi *eye opening*.

7. *Deterministic Jitter*

Deterministic Jitter adalah penyimpangan transisi dari waktu ideal yang disebabkan oleh refleksi relatif terhadap transisi lainnya.

8. *Eye Amplitude*

Eye Amplitude adalah perbedaan antara level logika 1 dan logika 0 tingkat histogram nilai rata-rata dari diagram mata.

9. *Bit Rate*

Bit rate mengukur sejauh mana *eye pattern* terbuka secara horizontal yang diukur dari *crossing point*. Dari *bit rate*, bias diketahui data rate (1/bit period). *Bit rate* juga disebut dengan *Unit Interval* (UI) pada *eye diagram*.

2.15 *Power Link Budget*

Power link budget adalah perhitungan daya yang dilakukan pada suatu sistem transmisi yang didasarkan pada karakteristik saluran (redaman), sumber optik, dan sensitivitas *photodetector*. Perhitungan daya sinyal memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\alpha_{total} = (L_1 \times \alpha_{serat}) + (L_2 \times \alpha_{serat}) \quad (2-16)$$

Keterangan:

L_1	= Panjang serat optik Pertama (Km)
L_2	= Panjang serat optik Kedua (Km)
α_{total}	= Redaman total sistem (dB)
α_{serat}	= Redaman serat (dB/Km)

Sedangkan untuk nilai daya yang diterima di *photodetector* atau blok penerima dapat dihitung dengan persamaan:

$$PR_x = PT_x - \alpha_{tot} \quad (2-17)$$

Keterangan:

α_{tot} = Redaman total sistem (dB)

PRx = Daya terima, sensitivitas penerima (dBm)

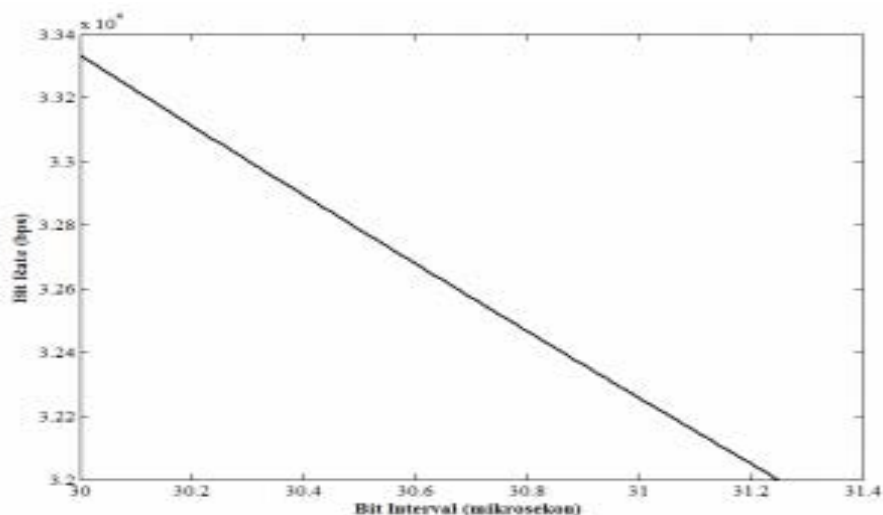
PTx = Daya kirim (dBm)

2.16 Bit Rate

Periode bit adalah ukuran dari pembukaan horizontal *eye diagram* atau *eye opening* pada titik-titik persimpangan mata dan biasanya diukur dalam *picoseconds* untuk sinyal digital berkecepatan tinggi. *Bit rate* dapat dihitung dari *bit interval* dengan menggunakan. Untuk menghitung bit rate ditunjukkan pada persamaan (2.18) (Agilent, 2012).

$$\text{Bit Rate} = \frac{1}{T_b} \quad (2-18)$$

Bit interval dihitung dari titik *zero crossing point* yang berpengaruh pada besar *eye width*. Semakin lebar *eye width*, waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan satu bit data semakin lama. Waktu untuk mentransmisikan satu bit data disebut dengan bit interval. Besar waktu ini akan berpengaruh pada kecepatan bit data yang ditransmisikan atau *bit rate*. Semakin kecil *bit interval* maka nilai *bit rate* akan semakin besar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Karakteristik *Bit Rate* terhadap Besar *Bit Interval*

2.17 Frekuensi Radio

Ditinjau dari segi pemakaian frekuensi dan besar frekuensi untuk masing-masing jenis frekuensi radio disebut spektrum frekuensi radio. Karna besarnya frekuensi berbeda, tentu masing-masing frekuensi itu memiliki ciri-ciri spesifik dalam pemakaiannya. Maka media transmisi radio yang banyak digunakan dapat dibedakan menjadi:

- *Middle Frequency* – MF (300 – 3000 KHz)
- *High Frequency* – HF (3 – 30 MHz)
- *Very High Frequency* – VHF (30 – 300 MHz)
- *Ultra High Frequency* – UHF (300 – 3000 MHz)
- *Super High Frequency* – SHF (3 – 30 GHz)
- *Ekstra High Frequency* – EHF (30 – 300 GHz)

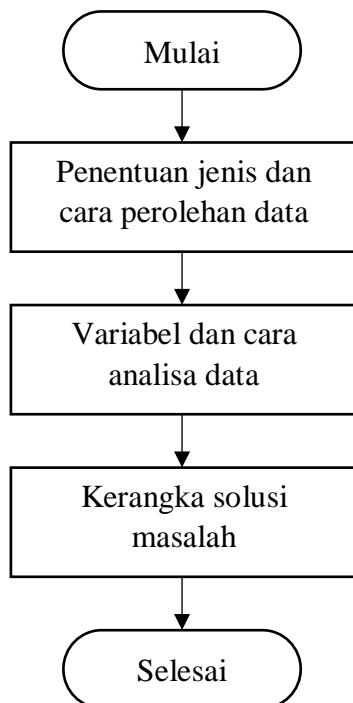
Ciri-ciri spesifik penggunaan masing-masing frekuensi radio tersebut adalah:

- a. MF (*Middle Frequency*) disebut sistem radio dengan panjang gelombang sedang. Banyak digunakan dalam radio siaran swasta niaga, amatir radio, orari, dan sebagainya.
- b. HF (*High Frequency*) disebut sistem radio dengan panjang gelombang yang pendek. Banyak dipakai untuk hubungan ke tempat-tempat yang jauh atau terpencil. Sebelum digunakan satelit dan peralatan untuk frekuensi lainnya, jenis frekuensi ini banyak dipakai oleh instansi pemerintahan, badan-badan swasta termasuk PTT (kini Telkom) untuk kepentingan hubungan telekomunikasinya. Pengguna frekuensi HF sering disebut dengan SSB (*single side band*), atau radio SSB.
- c. VHF (*Very High Frequency*) atau UHF (*Ultra High Frequency*) disebut sistem radio dengan panjang gelombang yang pendek, banyak digunakan untuk keperluan hubungan jarak dekat, misalnya untuk radio kendaraan bermotor (STKB), STJJ, dan sebagainya.
- d. Sedangkan SHF (*Super High Frequency*) dan EHF (*Ekstra High Frequency*) disebut dengan sistem radio yang memiliki panjang gelombang mikro. Banyak digunakan untuk sistem gelombang mikro (Telkom) dan sistem satelit termasuk untuk penyiaran televisi.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan bersifat simulasi menggunakan software *OptiSystem*, yang berupa pengujian pengaruh jarak transmisi sistem RoF terhadap *bit rate* dan analisis pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG terhadap kinerja sistem RoF mengacu pada studi literatur. Pada penelitian ini menggunakan variasi *line coding*, *bit rate*, sinyal RF, peletakan FBG dan panjang serat optik. Parameter yang diamati yaitu BER, *Q-factor*, dan *loss*. Tahapan yang dilakukan yaitu penentuan jenis dan cara perolehan data, variabel dan cara analisa data, serta kerangka solusi masalah. Diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.

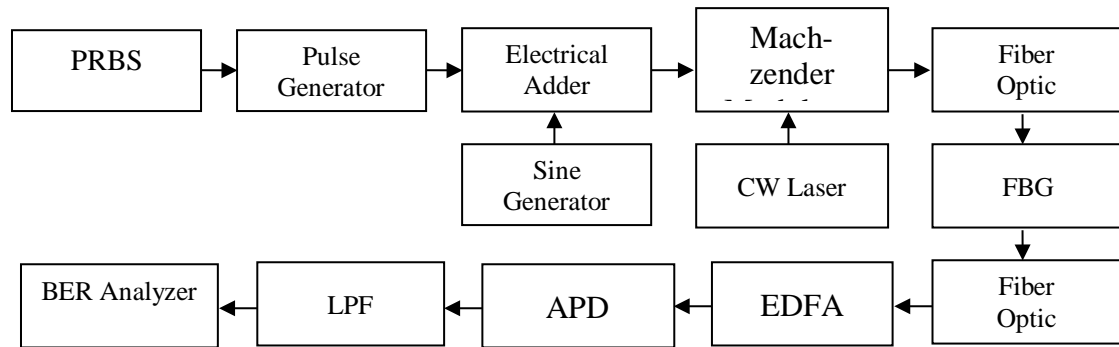


Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian

3.1 Jenis dan cara perolehan data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data hasil pengukuran pengaruh jarak transmisi sistem RoF terhadap *bit rate* dan pengaruh peletakan FBG pada sistem RoF dilihat dari parameter BER, *Q-factor*, dan *loss*.

Data sekunder bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, dan *website* terkait dengan RoF, sistem komunikasi serat optik, *line coding*, dispersi, dan FBG yang digunakan untuk mengenal karakteristik, parameter, serta konsep-konsep yang terkait dengan penelitian ini.



Gambar 3.2 Blok diagram sistem transmisi RoF menggunakan FBG

Pada gambar 3.2 menunjukkan rangkaian sistem RoF secara umum, berikut penjelasan dari masing blok diagram.

Pada bagian transmitter terdapat *Pseudo Random Bit Sequence Generator* (PRBS) untuk membangkitkan urutan biner *pseudorandom*, urutan bit ini dirancang untuk pendekatan karakteristik dari data acak, pada PRBS akan divariasikan nilai *bit rate* yaitu 5 Gbps dan 10 Gbps. Pada *line coding* data digital dalam bentuk teks, video, audio, angka, gambar dan grafik di simpan dalam urutan bit, urutan bit ini akan di konversi menjadi sinyal digital dan *line coding* yang digunakan adalah RZ dan NRZ. Lalu untuk input sinyal RF menggunakan *sine generator* dengan frekuensi yang divariasikan yaitu sebesar 3.5 GHz yang merupakan rentang frekuensi komunikasi 5G dibawah 6 Ghz, kemudian *output* dari *line coding* di gabungkan dengan *output* dari *sine generator* pada *electrical adder* yang bertujuan untuk menggabungkan sinyal informasi dari *pulse generator* dan sinyal carrier dari *sine generator*. Pada penelitian ini menggunakan sumber optik yaitu *Continous Wave* (CW) laser membangkitkan sinyal optik dengan panjang gelombang 1552.52 nm dan daya input sebesar 0.8 mW, kemudian keluaran dari *electrical adder* dimodulasikan dengan sinyal optik yang dibangkitkan CW laser menggunakan modulasi eksternal *Mach-Zehnder* karena prosesnya lebih cepat dan terjadi perubahan sinyal *electrical to optical* (E/O) untuk dapat di transmisikan pada medium transmisi serat optik.

Kemudian pada bagian *fiber link* sinyal optik dilewatkan melalui media transmisi serat optik jenis *Single Mode Fibre* (SMF) sepanjang 10 - 100 km dan panjang gelombang 1550 nm.

Lalu pada bagian *receiver* terdapat *Photodetector* yang berfungsi untuk konversi sinyal *optical to electrical*. Pada penelitian ini *Photodetector* yang digunakan adalah *Avalanche Photodiode* (APD) karena memiliki responsivitas yang jauh lebih besar dibandingkan PIN dan membutuhkan daya optik yang lebih kecil dibandingkan *Positive Intrinsic Negative* (PIN). Sinyal *electrical* keluaran dari *photodetector* difilter menggunakan *Low Pass Filter*

(LPF) untuk menghilangkan *noise* dengan frekuensi tinggi. Pada penelitian ini menggunakan *Bessel* LPF karena bentuk gelombang keluaran tidak akan mengalami *overshoot* dan akan sangat mirip dengan sinyal masukannya.

Kemudian *output* dari *Bessel* LPF ini akan dianalisa terhadap parameter-parameter yang telah ditetapkan menggunakan 2 komponen *visualizer*, yaitu *BER Analyzer* dan *Eye Diagram Analyzer*. Kedua komponen ini memerlukan 3 input yaitu, pertama adalah *output* dari PRBS Generator, kemudian yang kedua adalah *output* dari NRZ *pulse generator* atau *RZ Pulse Generator* dan yang ketiga adalah *output* dari *Bessel* LPF tersebut.

3.2 Variabel dan cara analisis data

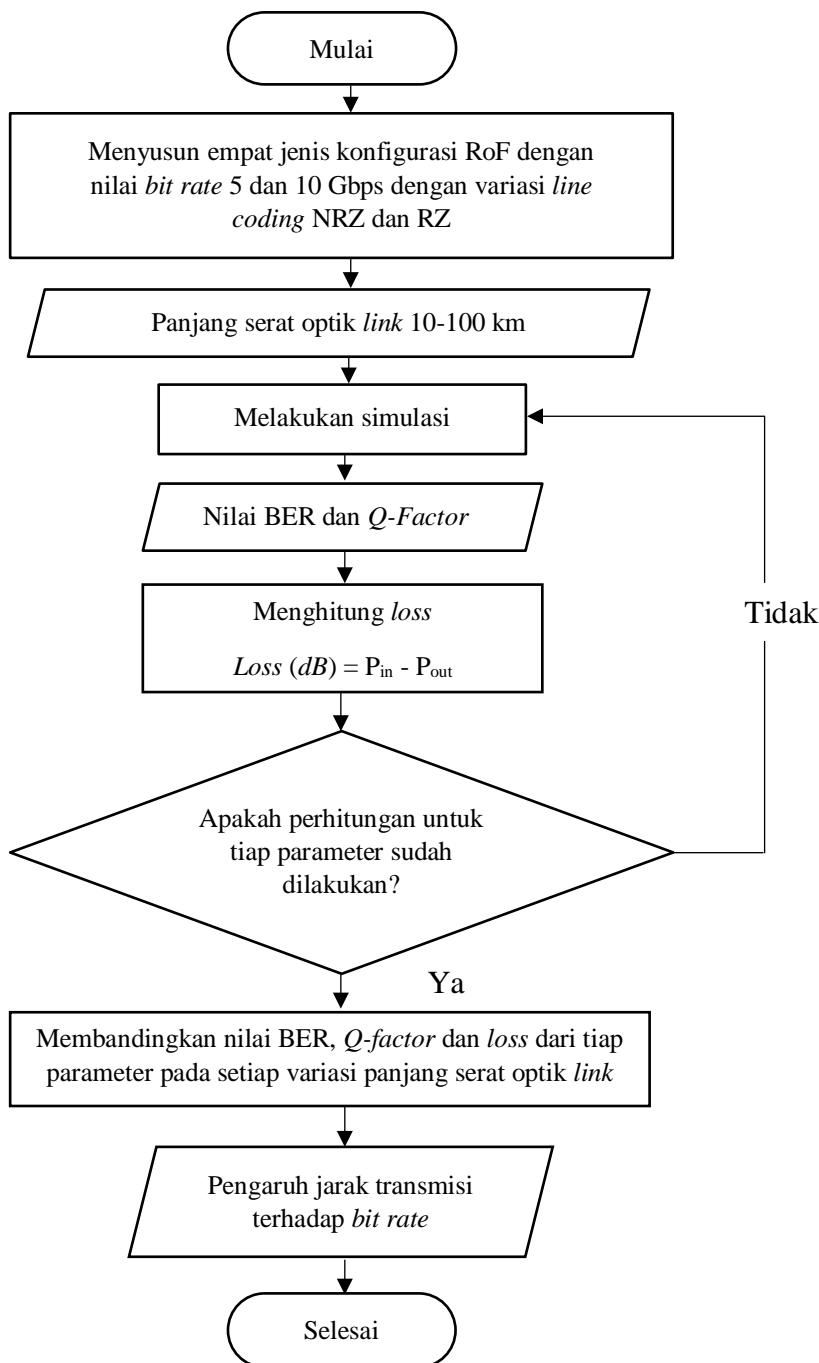
Pada penelitian ini, parameter yang digunakan dalam analisis data yaitu BER, *Q-factor*, dan *loss*. Analisis data dilakukan dengan menggunakan hasil data primer dan melakukan pendekatan secara matematis yang disesuaikan dengan konsep dasar dari data sekunder.

3.3 Kerangka solusi masalah

Kerangka solusi masalah pada penelitian ini merupakan tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan masalah dalam bentuk diagram alir. Berikut adalah langkah – langkah pengujian dan perhitungan untuk tiap parameter kinerja yang akan dijelaskan pada sub bab berikut.

Pada gambar 3.3 menunjukkan diagram alir langkah pengujian jarak transmisi terhadap *bit rate*. pengujian variasi jarak dilakukan untuk mendapatkan jarak maksimum yang dapat ditransmisikan oleh masing-masing *bit rate* dengan kualitas sinyal yang baik. *bit rate* yang digunakan *bit rate* 5 Gbps dan 10 Gbps. Analisis dilakukan dengan menyusun empat buah konfigurasi sistem jaringan RoF yaitu 5 Gbps dengan *line coding* RZ, NRZ dan 10 Gbps dengan *line coding* RZ, NRZ pada panjang serat optik yang sama yaitu 100 km. Jarak yang digunakan adalah 10 km, 20km, 30 km,40 km,50 km, 60 km, 70 km, 80 km, 90 km dan 100 km untuk *bit rate* 5 Gbps dan 10 Gbps. Analisis dilakukan dengan menghitung nilai BER, *Q-factor*, dan *loss* untuk tiap *bit rate* dan jarak yang digunakan.

3.3.1 Pengujian variasi *bit rate*

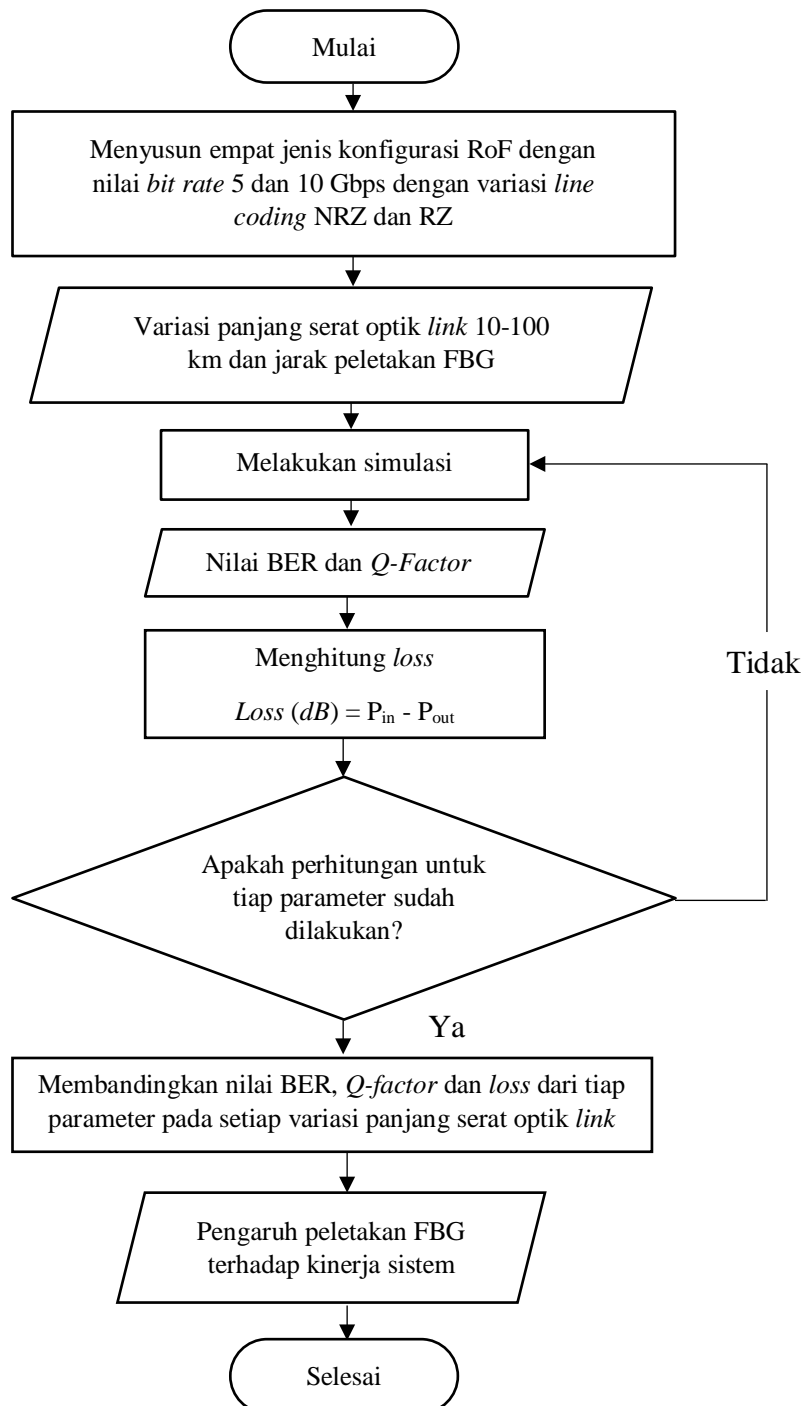


Gambar 3.3 Diagram alir pengujian variasi *bit rate* dan jarak

Pada gambar 3.4 menunjukkan diagram alir pengujian variasi jarak peletakan FBG. Pengujian variasi jarak peletakan FBG dilakukan untuk mendapatkan hasil performansi kinerja terbaik yang dihasilkan oleh kombinasi parameter. Analisis dilakukan dengan menyusun empat buah konfigurasi sistem jaringan RoF yaitu 5 Gbps dengan *line coding* RZ, NRZ dan 10 Gbps dengan *line coding* RZ, NRZ. Variasi jarak yang digunakan adalah 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km, 70 km, 80 km, 90 km, 100km dan peletakan FBG

diletakan di tengah-tengah total jarak serat optik *link* untuk *bit rate* 5 Gbps dan 10 Gbps. Analisis dilakukan dengan menghitung nilai BER, *Q-factor*, dan loss untuk tiap parameter yang digunakan.

3.3.2 Pengujian variasi jarak peletakan FBG



Gambar 3.4 Diagram alir pengujian variasi jarak peletakan FBG

[Halaman ini Sengaja Dikosongkan]

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

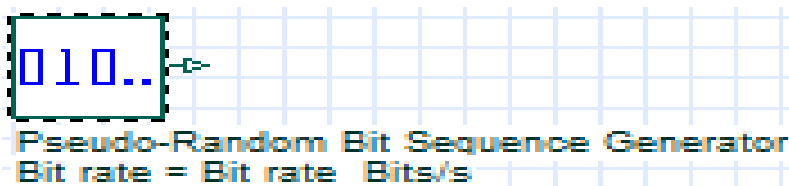
Pada Bab IV ini akan menjelaskan hasil dan pembahasan dari penelitian. Data yang akan dibahas merupakan hasil dari pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* sistem *Radio over Fiber* (RoF) dan pengaruh peletakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* (FBG) terhadap kinerja sistem RoF dilihat dari BER, *Q-factor* dan *loss*. Penulisan Bab IV meliputi konfigurasi perangkat penelitian, prosedur pengambilan data, data hasil penelitian dan pembahasan.

4.1 Konfigurasi Perangkat Penelitian

Pada sub bab 4.1 ini akan membahas komponen-komponen yang digunakan dalam penelitian. Adapun komponen-komponen yang digunakan dalam penelitian *Pseudorandom Bit Sequence Generator*, *Line Coding*, *Sine Generator*, *Electrical Adder*, *Continous Wave laser*, *Mach-Zehnder Modulator*, Serat Optik, *Erbium Doped Fiber Amplifier*, *Fiber Bragg Grating*, *Photodetector APD*, *low pass besse filter*, *Power Meter Visualizer*, *BER analyzer*, dan *Eye Diagram Analyzer*. Spesifikasi dan penjelasan dari masing-masing komponen penelitian adalah sebagai berikut:

4.1.1 Pseudorandom Bit Sequence Generator

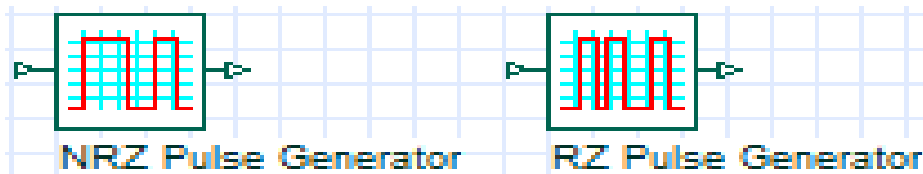
Pseudo Random Bit Sequence Generator digunakan untuk membangkitkan urutan biner *pseudorandom* sebagai salah satu sinyal uji dalam suatu proses identifikasi dinamis, urutan bit ini dirancang untuk pendakatan karakteristik dari data acak, Sebuah PRBS mirip dengan urutan bilangan acak secara nyata, tetapi dapat juga disebut semu (*pseudo*) karena deterministik. *Bit rate* yang dibangkitkan yaitu 5 Gbps dan 10 Gbps.



Gambar 4.1 *Pseudo Random Bit Sequence Generator*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.2 Line Coding

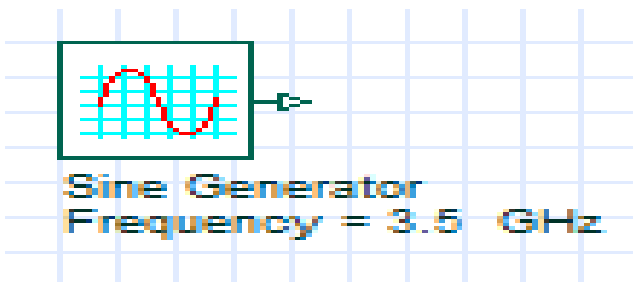
Line Coding adalah proses konversi data digital ke sinyal digital. data digital dalam bentuk teks, video, audio, angka, gambar dan grafik di simpan dalam urutan bit, urutan bit ini akan di konversi menjadi sinyal digital dan *line coding* yang digunakan adalah RZ dan NRZ.



Gambar 4.2 *Line Coding*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.3 *Sine Generator*

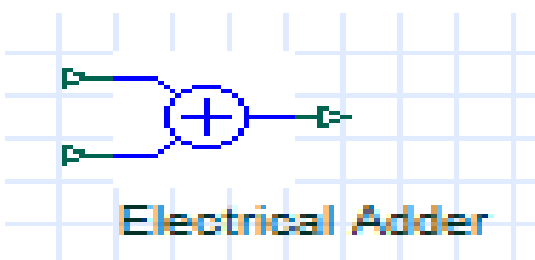
Sine Generator berfungsi untuk membangkitkan sinyal radio frekuensi *mm-wave*. Sinyal radio frekuensi yang dibangkitkan ada 3.5 GHz.



Gambar 4.3 *Sine Generator*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.4 *Electrical Adder*

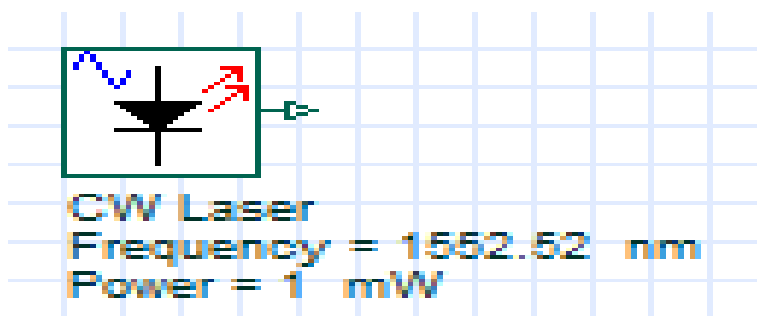
Electrical Adder berfungsi untuk memodulasi secara elektrik antara radio frekuensi *Carrier* yang dihasilkan dari *Sine Generator* dan sinyal elektrik yang dihasilkan dari *NRZ Pulse Generator* atau *RZ Pulse Generator*, kemudian *output* dari komponen ini digunakan dimodulasikan di *Mach-Zehnder Modulator*



Gambar 4.4 *Electrical Adder*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.5 *Continous Wave (CW) laser*

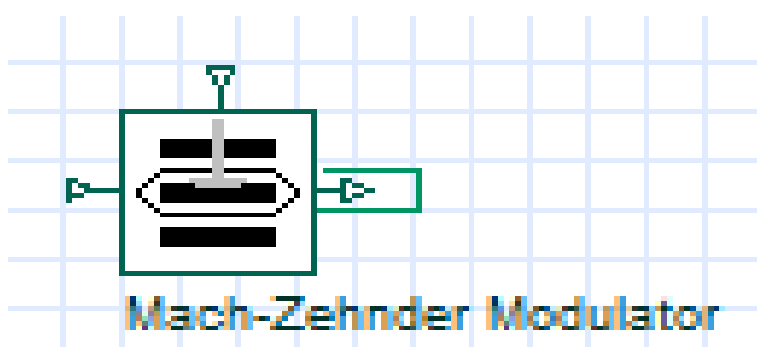
Sumber optik yang digunakan adalah *Continous Wave (CW) laser*. Pemilihan CW laser dikarenakan berkas sinar yang lebih sempit dibandingkan LED dan dalam pengoperasiannya, output dari laser relative konsisten terhadap waktu. CW laser yang digunakan dengan menggunakan panjang gelombang 1552.52 nm dengan daya 1 mW.



Gambar 4.5 *Continuous Wave (CW) laser*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.6 Mach-Zehnder Modulator

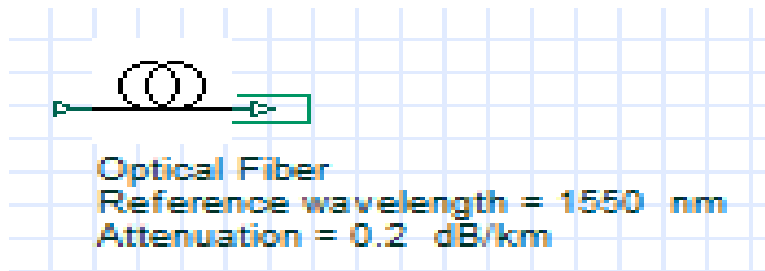
Mach-Zehnder Modulator merupakan sebuah interferometer yang bekerja menurut prinsip elektro-optik, dimana medan listrik yang diberikan dapat mempengaruhi karakteristik cahaya yang melewatinya. Modulator optik interferometer *Mach-Zehnder* adalah modulator yang dapat digunakan pada sistem komunikasi optik yang bekerja berdasarkan prinsip interferometer. *Mach-Zehnder* membagi dua sinyal yang masuk ke dalam dua lengan yang identik panjang dan bentuknya. Indeks bias efektif *waveguide* akan berubah, berbanding lurus dengan perubahan medan listrik yang dikenakan pada lengan *Mach - Zehnder*. Perubahan medan listrik juga berpengaruh secara linear terhadap perubahan fasa cahaya yang melewati interferometer *Mach-Zehnder* tersebut. Dengan demikian, fasa cahaya dapat diubah-ubah oleh medan listrik eksternal. Kedua sinar tersebut kemudian digabungkan kembali secara koheren pada bagian akhir *waveguide*.



Gambar 4.6 *Mach-Zehnder Modulator (MZM)*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.7 Serat Optik

Serat optik berfungsi sebagai medium untuk mentransmisikan sinyal optik. Jenis serat optik yang digunakan pada sistem ini adalah serat optik *Single Mode Fiber (SMF)* dengan atenuasi bernilai 0,2 dB/km dan *reference wavelength* bernilai 1550 nm.



Gambar 4.7 Serat Optik
(Sumber: Optiwave, 2008)

Perhitungan dispersi diperlukan untuk mendapatkan kinerja sistem komunikasi serat optik dalam jarak jangkauan transmisi maksimumnya. Perhitungan dispersi meliputi perhitungan dispersi material, dispersi pandu gelombang, dan dispersi intermodal.

Tabel 4.1 Spesifikasi komponen yang digunakan

Parameter	Definisi	Nilai
t_{dm}	Koefisien dispersi bahan	0,8 ps/(nm.km)
$\Delta\lambda$	Lebar spektrum sumber optik	1 nm
n_1	Nilai indeks bias inti	1,48
n_2	Nilai indeks bias selubung	1,46
c	Kecepatan cahaya di ruang hampa	3×10^8 m/s
λ	Panjang gelombang	1550 nm
a	Jari-jari inti serat optik	7 μ m

Nilai dispersi material per satuan panjang serat optik sesuai persamaan (1):

$$t_{\text{material}} = t_{dm} \times \Delta\lambda$$

$$t_{\text{material}} = 0.8 \times 1 = 0.8 \text{ ps/km}$$

Dispersi pandu gelombang sesuai dengan persamaan (2):

$$t_{\text{waveguide}} = \frac{(n_1 - n_2)t_{wg} \Delta\lambda}{c \lambda}$$

t_{wg} = koefisien disperse tanpa dimensi

Berdasarkan persamaan (3):

$$t_{wg} = \frac{4(1 - \ln v)}{v^2}$$

V = frekuensi ternormalisasi, sesuai dengan persamaan (4):

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$v = \frac{2\pi}{1550 \times 10^{-9}} 7 \times 10^{-6} \sqrt{1.48^2 - 1.46^2} = 6.88073$$

Maka koefisien dispersi tanpa dimensi:

$$t_{wg} = \frac{4(1 - \ln 6.88073)}{6.88073^2} = 0.07846$$

Sehingga nilai dispersi pandu gelombang per satuan panjang:

$$t_{waveguide} = \frac{(1.48 - 1.46) 0.07846 \cdot 1 \times 10^{-9}}{3 \times 10^8 \cdot 1550 \times 10^{-9}} = 0.00337 \text{ ps/km}$$

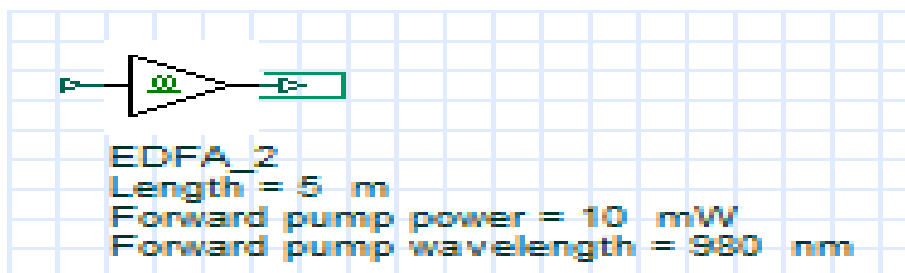
Karena pada penelitian ini digunakan serat optic jenis single mode, maka tidak terjadi disperse intermodal, $t_{intermodal} = 0 \text{ ps/km}$. Nilai disperse total per satuan panjang serat optik sesuai dengan persamaan (4):

$$t_{fiber} = \sqrt{t_{material}^2 + t_{waveguide}^2 + t_{intermodal}^2}$$

$$t_{fiber} = \sqrt{(0.8^2 \times 10^{-12})^2 + (0.00337 \times 10^{-12})^2 + 0} = 0.8 \text{ ps/km}$$

4.1.8 Erbium Doped Fiber Amplifier

Pada penelitian ini *repeater* yang digunakan adalah *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) yang berfungsi untuk menjaga tingkat daya infrmasi yang dikirim agar dapat terdeteksi dengan baik. EDFA merupakan serat optik yang terdoping oleh unsur *Erbium* (Er^{3+}). EDFA dapat digunakan sebagai *booster amplifier* jika diletakkan setelah *laser*, sebagai *in-line amplifier* jika berada di antara terminal pengirim dan penerima, dan sebagai *pre-amplifier* jika ditempatkan sebelum *photodetector*. EDFA yang digunakan menggunakan laser *pump* daya 10 mW dan panjang gelombang 980 nm.



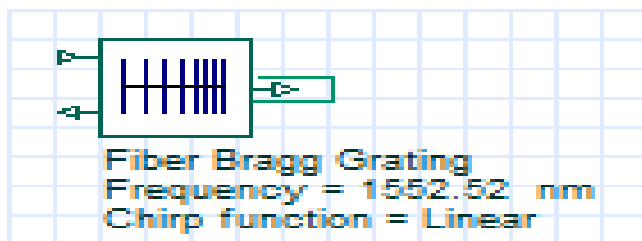
Gambar 4. 8 *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA)
 (Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.9 Fiber Bragg Grating

Kompensator dispersi yang digunakan pada penelitian ini ialah *chirped Fiber Bragg Grating*. Pada *chirped* FBG, beberapa perubahan dibuat pada periode kisi yang mengakibatkan perubahan pada respon terhadap panjang gelombang berbeda. Sebagaimana

periode kisi berubah di sepanjang sumbunya, panjang gelombang berbeda dipantulkan oleh bagian yang berbeda dari kisi sehingga mengalami *delay* dengan waktu yang berbeda. Konsekuensinya adalah kompresi pada pulsa yang mengalami pelebaran dan sesuai untuk mengkompensasi dispersi kromatik pada jaringan komunikasi.

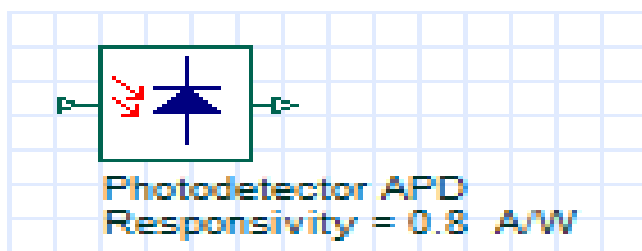
untuk mengurangi terjadinya pelebaran pulsa akibat dispersi yang terjadi di sepanjang serat optik, pada penelitian ini menggunakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* (FBG), pada penelitian ini digunakan *Chirped* FBG dimana kisi-kisi dengan jumlah periode indeks bias tidak seragam sepanjang serat optik dengan panjang gelombang 1552,52 nm dan peletakan *Chirped* FBG ini akan divariasikan terhadap jarak transmisi.



Gambar 4.9 *Fiber Bragg Grating* (FBG)
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.10 Photodetector APD

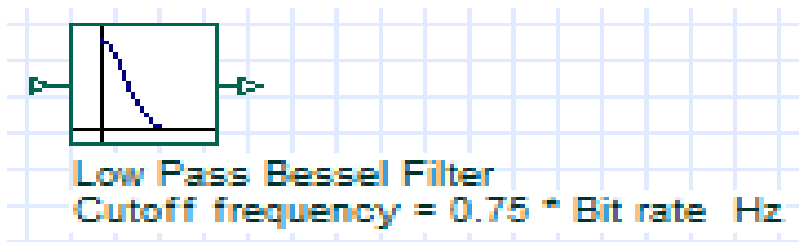
Photodetector yang berfungsi untuk konversi sinyal optik menjadi sinyal elektrik. *Photodetector* yang digunakan adalah *Avalanche Photodiode* (APD) karena memiliki responsivitas yang jauh lebih besar dibandingkan *Positive Intrinsic Negative* (PIN) dan membutuhkan daya optik yang lebih kecil dibandingkan *Positive Intrinsic Negative* (PIN). APD yang digunakan adalah *Indium Gallium Arsenide* (InGaAs) karena rendah *error* dan bagus digunakan pada panjang gelombang 1550 nm.



Gambar 4.10 *Photodetector* APD
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.11 Low Pass Bessel Filter

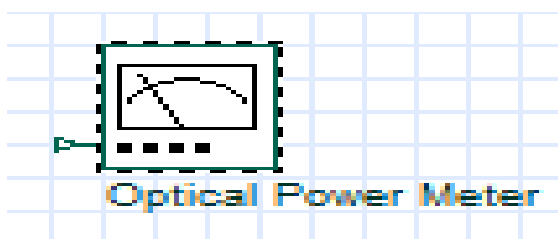
Salah satu jenis LPF adalah *Bessel* LPF. Filter ini berfungsi untuk menghilangkan *noise* dengan frekuensi tinggi, dan alasan menggunakan *Bessel* LPF karena bentuk gelombang keluaran tidak akan mengalami *overshoot* dan akan sangat mirip dengan sinyal masukannya.



Gambar 4.11 *Low Pass Bessel Filter (LPF)*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.12 Optical Power Meter

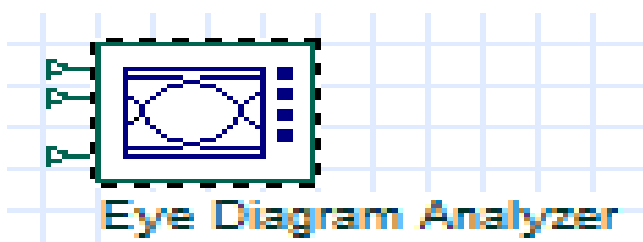
Power meter digunakan untuk menampilkan nilai daya pada sistem. *Power meter* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *optical power meter (OPM)*, karena daya yang ingin diukur adalah daya ketika sinyal ditransmisikan pada medium serat optik. OPM diletakkan pada keluaran modulator untuk menampilkan daya *input* dan diletakkan pada keluaran serat optik (pada rumusan masalah pertama) / pada keluaran EDFA (untuk rumusan masalah kedua) yang bertujuan untuk menampilkan nilai *output*.



Gambar 4.12 *Optical Power Meter Visualizer*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.14 Eye Diagram Analyzer

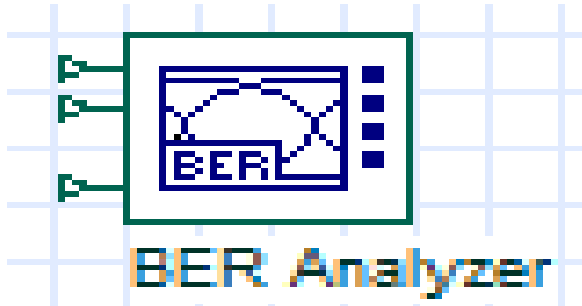
Komponen ini berfungsi untuk menampilkan *eye diagram*. *Eye diagram* adalah parameter untuk mengetahui kualitas dari sinyal pada *domain* digital. Nama *eye diagram* diambil karena tampilannya yang mirip dengan mata manusia. Tampilan ini dihasilkan dari melapiskan *waveform* yang berturut – turut untuk membentuk gambar yang tergabung. *Eye diagram* ini digunakan untuk melihat sinyal digital yang bertujuan untuk mengenali efek distorsi dan menemukan sumbernya.



Gambar 4.13 *Eye Diagram Analyzer*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.1.15 Bit Error Rate Analyzer

BER *analyzer* adalah alat untuk mengukur nilai BER yang berbasis pada algoritma *gaussian* pada transmisi dari rentetan pendek dari *bit – bit*. Alat ini juga dapat mengukur nilai *Q-factor*.

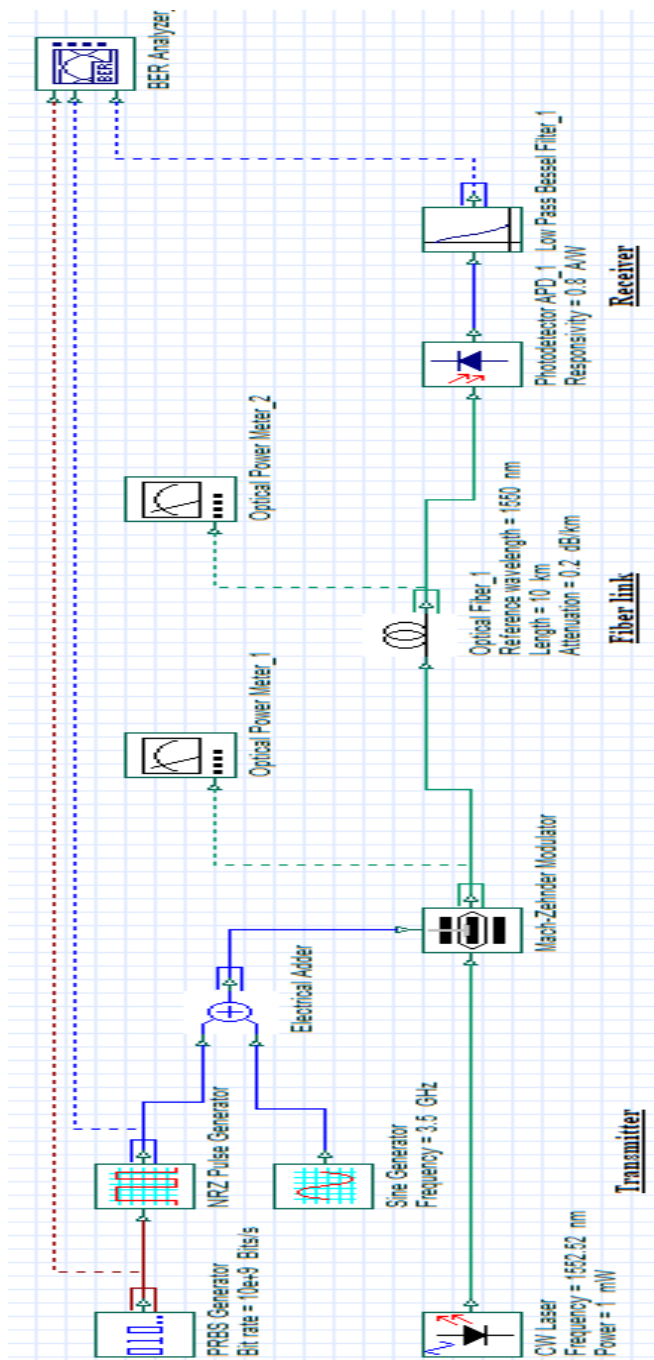


Gambar 4.14 *Bit Error Rate (BER) Analyzer*
(Sumber: Optiwave, 2008)

4.2 Prosedur Pengambilan Data

Pada prosedur pengambilan data, tahapan pertama yang dilakukan adalah mempersiapkan *software OptiSystem*, tahapan kedua adalah menyusun konfigurasi perangkat pada *software OptiSystem*, tahapan ketiga memasukkan nilai variabel spek sesuai *datasheet* dan nilai variasi, tahapan keempat melakukan simulasi dan tahapan yang terakhir didapatkan hasil BER, *Q – factor*, dan Loss.

4.2.1 Simulasi Analisis Pengaruh Jarak Transmisi Terhadap *Bit Rate*



Gambar 4.15 Konfigurasi Simulasi Pengaruh *Bit Rate* Terhadap Jarak Transmisi

Percobaan pertama adalah penelitian tentang analisis pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate*. Pada bagian *Transmitter* menggunakan pembangkit sinyal biner berupa PRBS Generator. Pada PRBS Generator ini di bangkitkan bit-bit yang berurutan secara acak. *Bit rate* yang digunakan adalah 5 Gbps dan 10 Gbps, selanjutnya *bit rate* yang telah dibangkitkan akan melalui proses konversi dari data digital ke sinyal digital. Data digital dalam bentuk teks, video, audio, angka, gambar dan grafik di simpan dalam urutan bit, urutan bit ini akan di konversi menjadi sinyal digital. Untuk membangkitkan sinyal RF digunakan

sine generator, dan sinyal RF yang dibangkitkan sebesar 3,5 GHz. Kemudian output dari *sine* generator dan NRZ, RZ *Pulse* Generator ini dimodulasikan secara elektrik pada *electrical adder*. Selanjutnya sumber optik yang digunakan menggunakan *Continuous Wave* Laser (CW Laser) dengan daya input 1 mW dan panjang gelombang 1552,52 nm. Kemudian output dari CW laser dan *electrical adder* dimodulasikan dengan modulator eksternal *Mach-Zehnder Modulator* (MZM), MZM merupakan sebuah interferometer yang bekerja menurut prinsip elektro-optik, dimana medan listrik yang diberikan dapat mempengaruhi karakteristik cahaya yang melewatinya dan *output* yang dihasil MZM adalah sinyal optik yang termodulasi. Kemudian pada bagian medium transmisi sinyal optik ini ditransmisikan melalui serat optik, serat optik yang digunakan adalah Single Mode Fiber (SMF) dengan panjang gelombang 1550 nm, variasi jarak serat optik dari 10 sampai dengan 100 km.

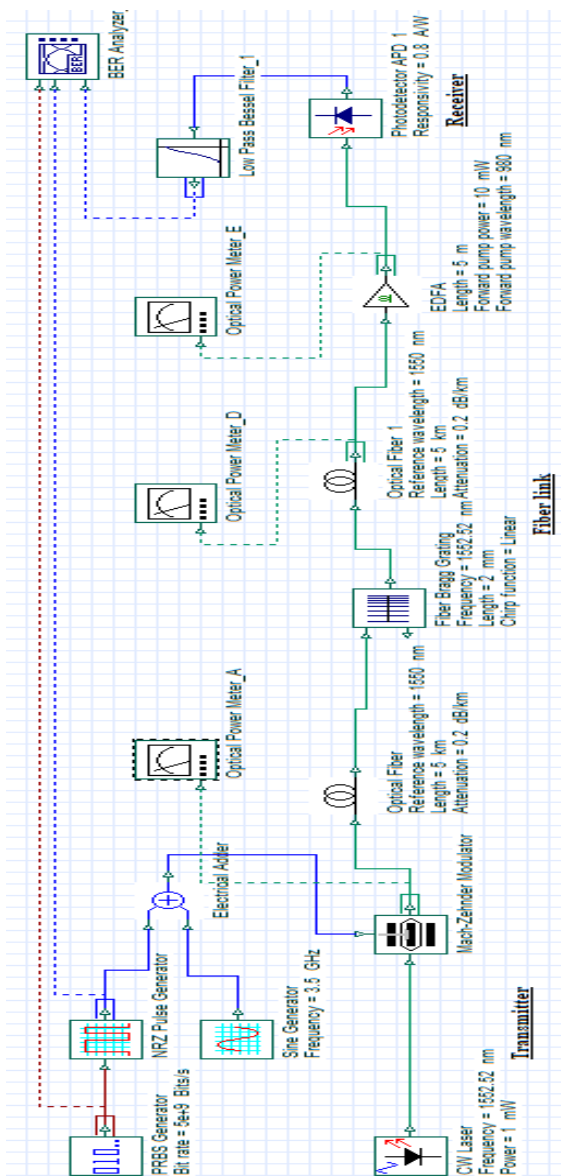
Selanjutnya pada bagian *receiver* digunakan komponen *photodetector* APD. *Photodetector* APD yang digunakan bertipe InGaAs dengan nilai responsivitas 0,8 A/W. Pada komponen ini terjadi koversi dari sinyal optik menjadi sinyal elektrik. Kemudian sinyal elektrik di-*filter* dengan menggunakan komponen *Low Pass Bessel Filter*. Kegunaan dari komponen ini adalah untuk menghilangkan *noise* pada frekuensi tinggi dan pemilihan *Bessel* LPF karena bentuk gelombang keluaran tidak akan mengalami *overshoot* dan akan sangat mirip dengan sinyal masukannya.

Setelah semua konfigurasi sistem telah tersusun, dilakukan proses kalkulasi untuk menganalisa kinerja dari sistem ini. Untuk mengetahui nilai BER dan *Q-factor* digunakan komponen BER *Analyzer* yang terhubung dengan output PRBS Generator, NRZ dan RZ *Pulse* Generator, dan *Bessel* LPF. Sedangkan untuk mengetahui nilai Loss digunakan komponen *Optical Power Meter* (OPM) yang terhubung dengan *output* MZM dan *output* serat optik.

Tabel 4.1 Kombinasi *Bit Rate*, *Line Coding*, dan *Fiber Optic Link*

No	<i>Bit Rate</i>	<i>Line Coding</i>	RF Carrier (GHz)	<i>Fiber Optic Link</i> (Km)
1	5 dan 10 Gbps	NRZ dan RZ	3,5	10
2				20
3				30
4				40
5				50
6				60
7				70
8				80
9				90
10				100

4.2.2 Simulasi Analisis Pengaruh Peletakan kompensator Dispersi FBG



Gambar 4.16 Konfigurasi Simulasi Pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG

Percobaan kedua adalah penelitian tentang analisis pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG pada sistem transmisi RoF. Pada bagian transmitter PRBS yang dibangkitkan sebesar 5 dan 10 Gbps, lalu *line coding* yang digunakan NRZ dan RZ Pulse Generator, kemudian nilai RF yang dibangkitkan 3,5 GHz menggunakan *sine* Generator, lalu menggunakan *electrical adder* untuk modulasi elektrik yang dihubungkan dengan output NRZ, RZ pulse Generator dan output dari *sine* Generator, kemudian sumber optik yang digunakan adalah CW laser dengan daya sebesar 1 mW dan panjang gelombang 1552,52 nm, lalu output dari CW laser dan *electrical adder* dimodulasikan dengan modulator eksternal *Mach-Zehnder Modulator* (MZM) yang keluaranya berupa sinyal optik yang termodulasi.

Pada bagian medium transmisi sinyal optik ini ditransmisikan melalui serat optik tipe SMF dengan panjang gelombang 1550 nm dan variasi jarak yang digunakan 10 sampai 100 km dengan jarak pertambahan 10 km., lalu menggunakan kompensator dispersi FBG bertipe *Chirped* FBG. Pada *chirped* FBG, beberapa perubahan dibuat pada periode kisi yang mengakibatkan perubahan pada respon terhadap panjang gelombang berbeda. Sebagaimana periode kisi berubah di sepanjang sumbunya, panjang gelombang berbeda dipantulkan oleh bagian yang berbeda dari kisi sehingga mengalami *delay* dengan waktu yang berbeda. Konsekuensinya adalah kompresi pada pulsa yang mengalami pelebaran dan sesuai untuk mengkompensasi dispersi kromatik pada jaringan komunikasi. Lalu *Chirped* FBG di letakkan persis di tengah – tengah dari panjang total serat optik alasannya dikarenakan walaupun FBG itu lebih baik diletakkan lebih dekat ke arah transmitter, tetapi perlu di perhatikan panjang serat optik setelahnya, berhubungan dengan panjang serat optik yang digunakan cukup jauh maka diletakkan persis di tengah – tengah panjang total serat optik yang digunakan. Kemudian sinyal optik dikuatkan menggunakan *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) dengan panjang gelombang sinyal *pump* 980 nm dan *pump* power 10 mW yang berfungsi sebagai *Amplifier* sinyal optik yang memperbaiki level daya sinyal, lalu EDFA diletakkan setelah serat optik yang kedua (serat optik setelah peletakan FBG).

Kemudian pada bagaian *Receiver* digunakan komponen *photodetector* APD, *Photodetector* APD yang digunakan bertipe InGaAs dengan nilai responsivitas 0,8 A/W, lalu sinyal elektrik di-*filter* dengan menggunakan komponen *Low Pass Bessel Filter*. Untuk mengetahui nilai BER dan *Q-factor* digunakan komponen *BER Analyzer* yang terhubung dengan output PRBS Generator, NRZ dan RZ *Pulse* Generator, dan *Bessel* LPF. Sedangkan untuk mengetahui nilai Loss digunakan komponen *Optical Power Meter* (OPM) yang terhubung dengan *output* MZM dan *output* serat optik.

Tabel 4.2 Kombinasi *Bit Rate*, *Line Coding*, *FO Link*, dan Jarak Peletakan FBG

No	<i>Bit Rate</i>	<i>Line Coding</i>	RF Carrier (GHz)	<i>Fiber Optic Link</i> (Km)
1	5 dan 10 Gbps	NRZ dan RZ	3,5	10
2				20
3				30
4				40
5				50
6				60
7				70
8				80
9				90
10				100

4.3 Hasil penelitian dan pembahasan

Hasil simulasi pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* dan pengaruh peletakan kompensator dispersi FBG pada sistem komunikasi RoF beserta pembahasannya akan dijelaskan pada sub bab ini. Data yang didapatkan adalah hasil dari simulasi dan hasil analisis sesuai dengan persamaan yang telah dijelaskan pada Bab II. Kinerja dari sistem ini dianalisis dengan parameter-parameter yang telah dijelaskan yaitu BER, *Q-Factor*, dan *Loss*. Hasil dari simulasi ditunjukkan dalam bentuk grafik untuk tiap parameter yang dianalisis.

4.3.1 Analisis pengaruh jarak transmisi terhadap *Bit Rate* 5 Gbps

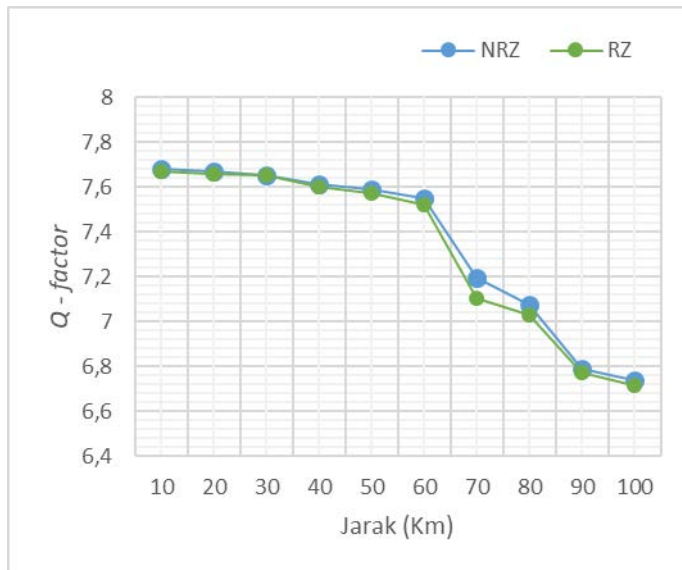
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* 5 Gbps dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan *Loss*:

Tabel 4.3 Hasil simulasi jarak transmisi terhadap *bit rate* 5 Gbps *line coding* NRZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,67775	$8,09056 \times 10^{-15}$	-3,231	-5,231	2
2			20 km	7,67081	$8,5447 \times 10^{-15}$		-7,118	4
3			30 km	7,65362	$9,7147 \times 10^{-15}$		-9,579	6
4			40 km	7,61087	$1,3533 \times 10^{-15}$		-11,234	8
5			50 km	7,59038	$1,5307 \times 10^{-14}$		-13,586	10
6			60 km	7,54711	$2,1786 \times 10^{-14}$		-15,717	12
7			70 km	7,19209	$3,1215 \times 10^{-13}$		-17,35	14
8			80 km	7,07457	$7,3997 \times 10^{-13}$		-19,236	16
9			90 km	6,78678	$5,577 \times 10^{-12}$		-21,48	18
10			100 km	6,73654	$7,6185 \times 10^{-12}$		-23,626	20

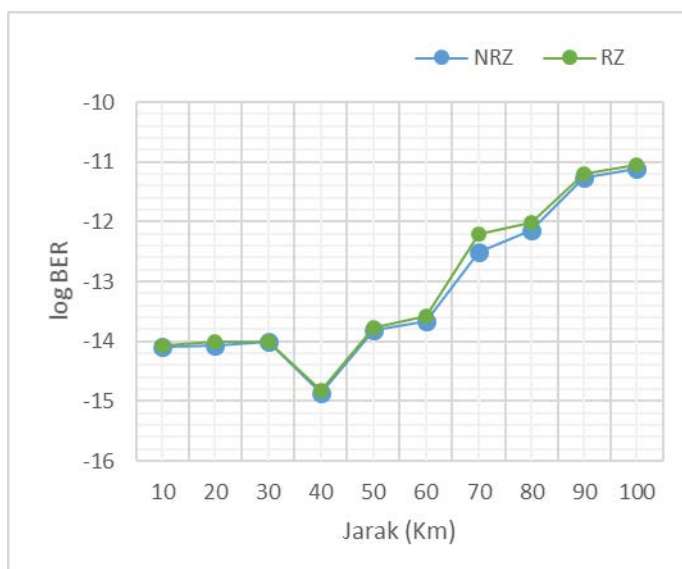
Tabel 4.4 Hasil Simulasi jarak terhadap transmisi *bit rate* 5 Gbps *line coding* RZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,66844	$8,6717 \times 10^{-15}$	-5,297	-7,297	2
2			20 km	7,65563	$9,6127 \times 10^{-15}$		-9,269	4
3			30 km	7,65157	$9,9218 \times 10^{-15}$		-11,272	6
4			40 km	7,59864	$1,4962 \times 10^{-15}$		-12,947	8
5			50 km	7,57345	$1,7010 \times 10^{-14}$		-15,851	10
6			60 km	7,5186	$2,6916 \times 10^{-14}$		-17,292	12
7			70 km	7,10056	$6,1077 \times 10^{-13}$		-19,212	14
8			80 km	7,03091	$9,5458 \times 10^{-13}$		-21,997	16
9			90 km	6,77063	$6,3044 \times 10^{-12}$		-23,996	18
10			100 km	6,71584	$8,8772 \times 10^{-12}$		-24,907	20



Gambar 4.17 Grafik pengaruh jarak terhadap Q -factor

Nilai Q -factor (*quality factor*) merupakan gambaran kuantitatif dari kualitas sinyal optik dan berhubungan dengan BER. Q -factor dapat digunakan untuk mengevaluasi pelemahan propagasi yang disebabkan oleh dispersi. Berdasarkan gambar 4.17 pada *bit rate* 5 Gbps dengan *line coding* NRZ dan RZ terlihat bahwa semakin jauh jarak transmisi, nilai Q -factor semakin kecil. Nilai Q -factor tertinggi yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ yaitu pada jarak 10 km sebesar 7,67775 dan 7,66844.



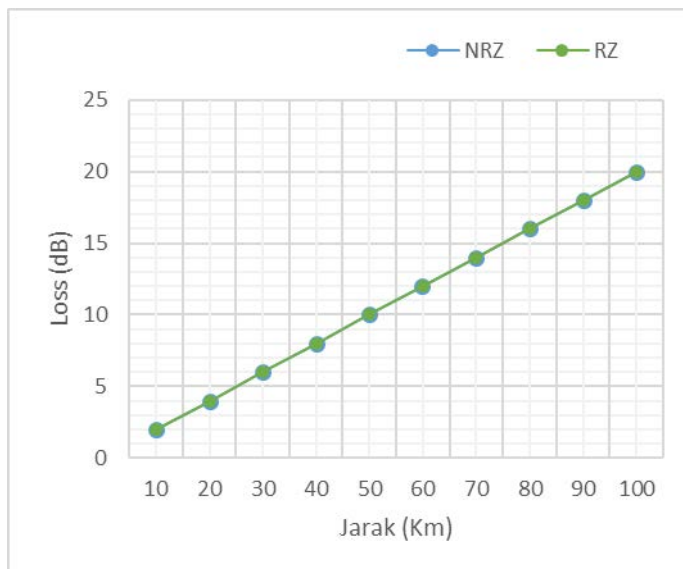
Gambar 4.18 Grafik pengaruh jarak terhadap BER

Nilai BER adalah nilai perbandingan dari nilai bit yang salah saat proses transmisi berlangsung. Dihitung dari sisi penerima, agar diperoleh kualitas sinyal yang baik maka nilai BER harus kecil. Kosekuensi dari nilai BER yang tinggi adalah data yang diterima menjadi tidak sama dengan data yang dikirimkan. Berdasarkan gambar 4.18 semakin jauh jarak maka

nilai BER semakin besar. Nilai BER yang tinggi disebabkan dari penambahan jarak yang mengakibatkan pelebaran pulsa sehingga terjadi *Intersymbol Interference* (ISI) yang mengakibatkan bertambahnya *error bit*. Nilai BER yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ pada jarak 10 km yaitu $8,0906 \times 10^{-15}$, dan $8,6717 \times 10^{-15}$.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $8,0906 \times 10^{-15}$ dengan nilai *Q-factor* sebesar 7,67775. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan *Q-factor* dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi Q}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,67775)}} e^{-\frac{(7,67775)^2}{2}} \\ &= 2,28 \times 10^{-14} \end{aligned}$$



Gambar 4.19 Grafik pengaruh jarak terhadap *Loss*

Nilai *Loss* (dBm) adalah perbedaan daya yang *input* dengan daya *ouput*. *Loss* terjadi dikarenakan adanya penyerapan sistem dan dispersi pada serat optik. Besarnya loss tergantung dari jarak yang ditempuh dan karakteristik bahan serat optik. Penambahan panjang serat optik yang digunakan berbanding lurus dengan kenaikan *loss*. Semakin jauh jarak, maka nilai *loss* semakin besar. Nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2 dBm.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai loss sebesar 2 dBm. Secara sistematis, nilai loss yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\ &= -3,231 - (-5,231) \\ &= 2 \text{ dBm} \end{aligned}$$

4.3.2 Analisis pengaruh jarak transmisi terhadap *Bit Rate* 10 Gbps

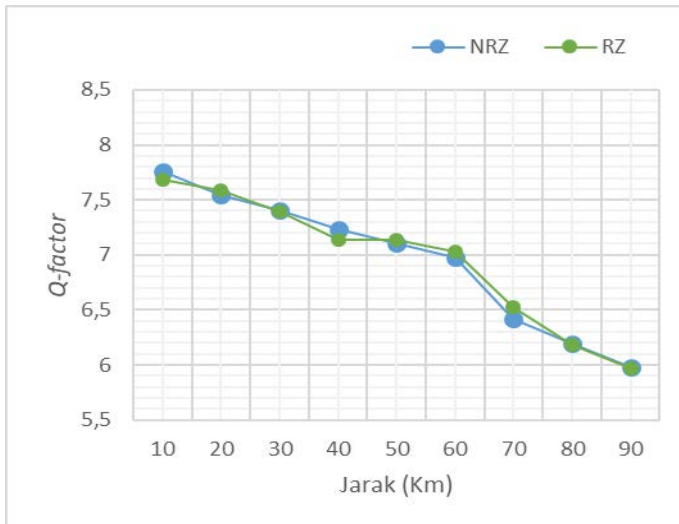
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* 10 Gbps dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

Tabel 4.5 Hasil simulasi jarak transmisi terhadap *bit rate* 10 Gbps *line coding* NRZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,76022	$4,2345 \times 10^{-15}$	-3,12	-5,12	2
2			20 km	7,54062	$2,3007 \times 10^{-14}$		-7,178	4
3			30 km	7,40695	$6,4404 \times 10^{-14}$		-9,117	6
4			40 km	7,23167	$2,3487 \times 10^{-13}$		-11,175	8
5			50 km	7,1011	$6,1871 \times 10^{-13}$		-13,119	10
6			60 km	6,97559	$1,5224 \times 10^{-12}$		-15,184	12
7			70 km	6,42124	$6,7568 \times 10^{-11}$		-17,128	14
8			80 km	6,19544	$2,9057 \times 10^{-10}$		-19,132	16
9			90 km	5,97609	$1,1428 \times 10^{-9}$		-12,683	18

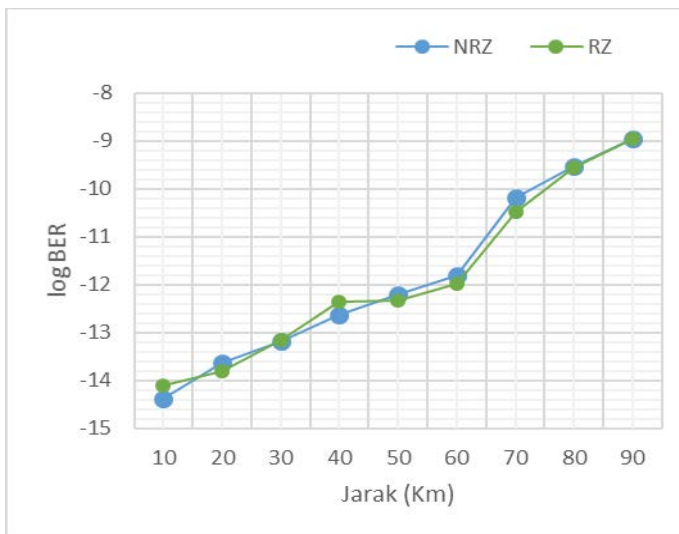
Tabel 4.6 Hasil simulasi jarak transmisi terhadap *bit rate* 10 Gbps *line coding* RZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,68567	$7,6079 \times 10^{-15}$	-5,454	-7,453	2
2			20 km	7,59077	$1,5819 \times 10^{-14}$		-9,58	4
3			30 km	7,39801	$6,8109 \times 10^{-14}$		-11,634	6
4			40 km	7,14111	$4,4913 \times 10^{-13}$		-13,603	8
5			50 km	7,13757	$4,5846 \times 10^{-13}$		-15,714	10
6			60 km	7,02624	$1,0407 \times 10^{-12}$		-7,786	12
7			70 km	6,52168	$3,2811 \times 10^{-11}$		-4,267	14
8			80 km	6,18106	$2,7407 \times 10^{-10}$		-4,934	16
9			90 km	5,96629	$1,0958 \times 10^{-9}$		-5,116	18



Gambar 4.20 Grafik pengaruh jarak terhadap Q -factor

Berdasarkan gambar 4.20 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai Q -factor tertinggi dengan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu 7,76022, sedangkan nilai Q -factor tertinggi dengan *line coding* RZ pada jarak 10 km yaitu 7,68567.

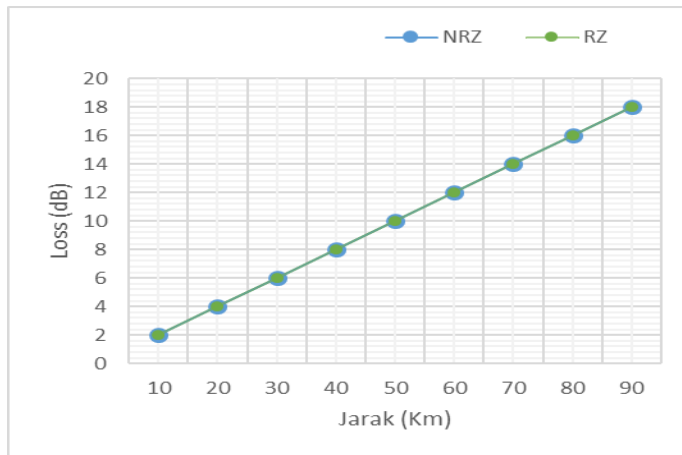


Gambar 4.21 Grafik pengaruh jarak terhadap BER

Berdasarkan gambar 4.21 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $4,2345 \times 10^{-15}$, BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $7,6079 \times 10^{-15}$.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $4,2345 \times 10^{-15}$ dengan nilai Q -factor sebesar 7,76022. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan Q -factor dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,76022)}} e^{-\frac{(7,76022)^2}{2}} \\
 &= 1,199 \times 10^{-14}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.22 Grafik pengaruh jarak terhadap *loss*

Berdasarkan gambar 4.22 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2 dBm. Dan semakin jauh jarak yang ditransmisikan maka *loss* yang dihasilkan semakin besar.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* NRZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai *loss* sebesar 2 dBm. Secara sistematis, nilai *loss* yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\
 &= -3,12 - (-5,12) \\
 &= 2 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

4.3.3 Analisis pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG pada *bit rate* 5 Gbps

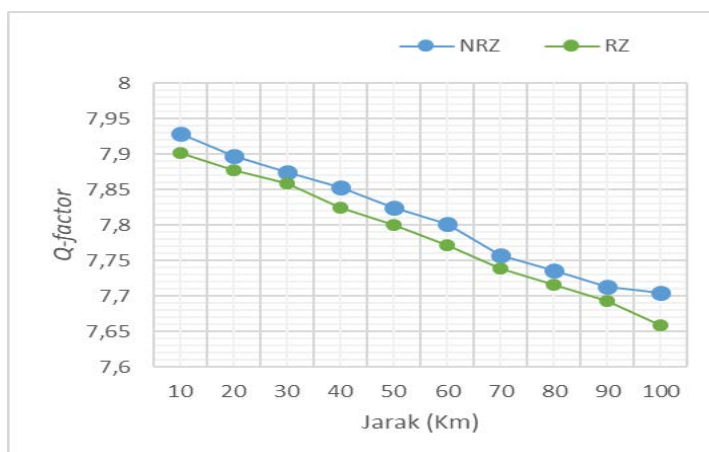
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh FBG pada *bit rate* 5 Gbps dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

Tabel 4.7 Hasil Simulasi Pengaruh Peletakan FBG *Bit Rate* 5 Gbps NRZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,92864	$1,0981 \times 10^{-15}$	-3,59	-6,261	2,671	2,142
2			20 km	7,8975	$1,4208 \times 10^{-15}$		-7,267	4,672	1,778
3			30 km	7,87445	$1,687 \times 10^{-15}$		-10,021	6,674	0,743
4			40 km	7,85249	$2,0389 \times 10^{-15}$		-11,905	8,673	-0,036
5			50 km	7,82379	$2,5388 \times 10^{-15}$		-14,382	10,672	-1,198
6			60 km	7,80174	$3,0358 \times 10^{-15}$		-16,254	12,673	-2,213
7			70 km	7,75689	$4,3454 \times 10^{-15}$		-17,367	14,672	-2,882
8			80 km	7,73599	$5,1242 \times 10^{-15}$		-19,794	16,672	-4,516
9			90 km	7,71355	$5,9916 \times 10^{-15}$		-21,367	18,672	-5,701
10			100 km	7,70439	$6,2915 \times 10^{-15}$		-24,382	20,672	-8,208

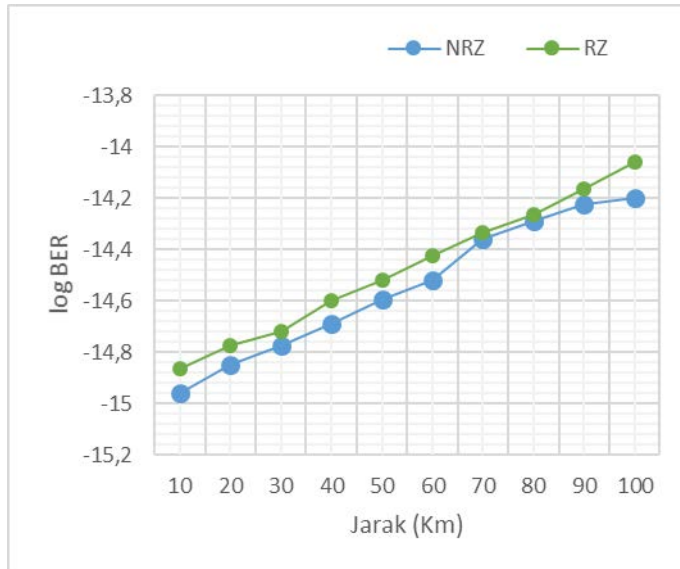
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Pengaruh Peletakan FBG *Bit Rate* 5 Gbps RZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,90213	$1,3664 \times 10^{-15}$	-5,214	-7,881	2,667	1,556
2			20 km	7,87677	$1,6730 \times 10^{-15}$		-10,315	4,668	0,626
3			30 km	7,85937	$1,9039 \times 10^{-15}$		-11,523	6,666	0,128
4			40 km	7,82446	$2,5165 \times 10^{-15}$		-14,063	8,666	-1,038
5			50 km	7,79966	$3,0156 \times 10^{-15}$		-16,384	10,668	-2,288
6			60 km	7,77085	$3,7567 \times 10^{-15}$		-18,457	12,666	-3,585
7			70 km	7,73931	$4,6292 \times 10^{-15}$		-20,509	14,668	-5,043
8			80 km	7,71598	$5,4407 \times 10^{-15}$		-22,575	16,666	-6,67
9			90 km	7,69267	$6,8165 \times 10^{-15}$		-24,082	18,664	-7,947
10			100 km	7,65786	$8,7446 \times 10^{-15}$		-26,349	20,664	-9,974



Gambar 4.23 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap *Q-factor*

Berdasarkan gambar 4.23 pada *bit rate* 5 Gbps, nilai *Q-factor* tertinggi dengan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu 7,92864, sedangkan nilai *Q-factor* tertinggi dengan *line coding* RZ pada jarak 10 km yaitu 7,90213. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai *Q-factor* dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 5 Gbps.

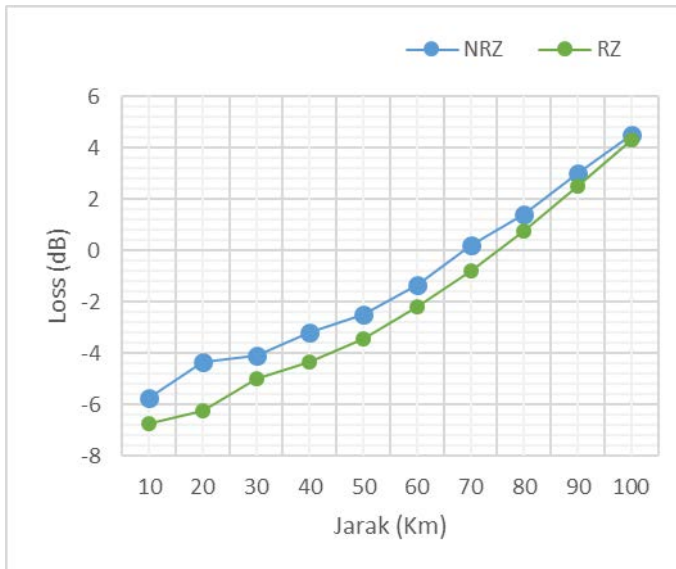


Gambar 4.24 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap BER

Berdasarkan gambar 4.24 pada *bit rate* 5 Gbps, nilai BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $1,0981 \times 10^{-15}$, BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $1,3664 \times 10^{-15}$. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai BER dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 5 Gbps.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $1,3664 \times 10^{-15}$ dengan nilai *Q-factor* sebesar 7,90213. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan *Q-factor* dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,90213)}} e^{-\frac{(7,90213)^2}{2}} \\
 &= 3,9135 \times 10^{-15}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.25 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap loss

Berdasarkan gambar 4.25 pada *bit rate* 5 Gbps, nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ 10 km yaitu 2,671 dBm. dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2,667 dBm. Dengan menggunakan FBG nilai *loss* semakin tinggi jika dibandingkan tanpa menggunakan FBG.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai *loss* sebesar 2,667 dB. Secara sistematis, nilai *loss* yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\
 &= -5,214 - (-7,881) \\
 &= 2,667 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

Tetapi dengan EDFA level daya sinyal membaik

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= -7,881 \text{ dBm} & P_{\text{EDFA}} &= 1,556 \text{ dBm} \\
 &= 1\text{W} \times 10^{(-7,881/10)/1000} & &= 1\text{W} \times 10^{(1,556/10)/1000} \\
 &= 162,89 \times 10^{-6} \text{ W} & &= 1430,87 \times 10^{-6} \text{ W} \\
 \text{Amplification P signal} &= P_{\text{EDFA}} / P_{\text{out}} \\
 &= 1430,87 \times 10^{-6} \text{ W} / 162,89 \times 10^{-6} \text{ W} \\
 &= 8,78\text{x}
 \end{aligned}$$

4.3.4 Analisis pengaruh Peletakan Kompensator Dispersi FBG pada *bit rate* 10 Gbps

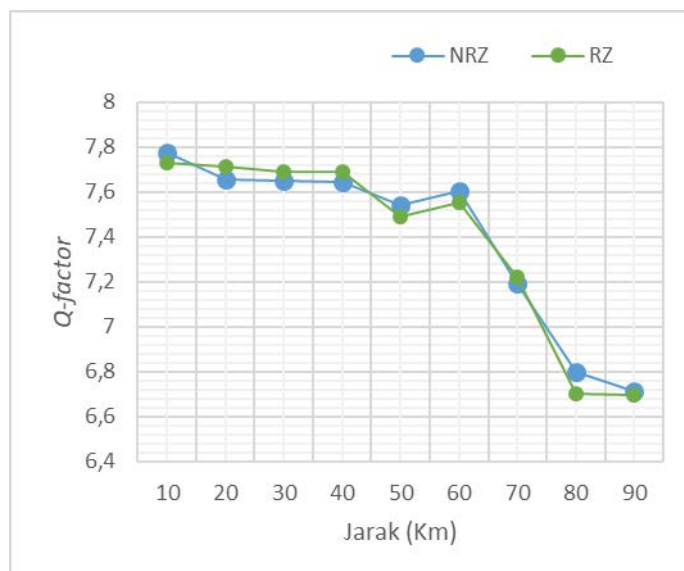
Berikut adalah data hasil simulasi dari pengaruh *bit rate* 10 Gbps terhadap jarak transmisi dilihat dari parameter BER, *Q-Factor*, dan Loss:

Tabel 4.9 Hasil Simulasi Pada Pengaruh Peletakan FBG *Bit Rate* 10 Gbps NRZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	NRZ	10 km	7,77622	$3,7319 \times 10^{-15}$	-3,121	-5,789	2,668	2,312
2			20 km	7,6573	$9,4829 \times 10^{-15}$		-7,731	4,668	1,61
3			30 km	7,65156	$9,8012 \times 10^{-15}$		-9,787	6,668	0,834
4			40 km	7,6432	$1,0384 \times 10^{-14}$		-11,79	8,669	0,014
5			50 km	7,54282	$2,2893 \times 10^{-14}$		-13,847	10,668	-0,931
6			60 km	7,60608	$1,3986 \times 10^{-14}$		-15,912	12,668	-2,017
7			70 km	7,19471	$3,1287 \times 10^{-13}$		-17,736	14,667	-3,114
8			80 km	6,79711	$5,3342 \times 10^{-12}$		-15,092	16,666	-1,567
9			90 km	6,7145	$9,4329 \times 10^{-12}$		-12,444	18,666	-0,274

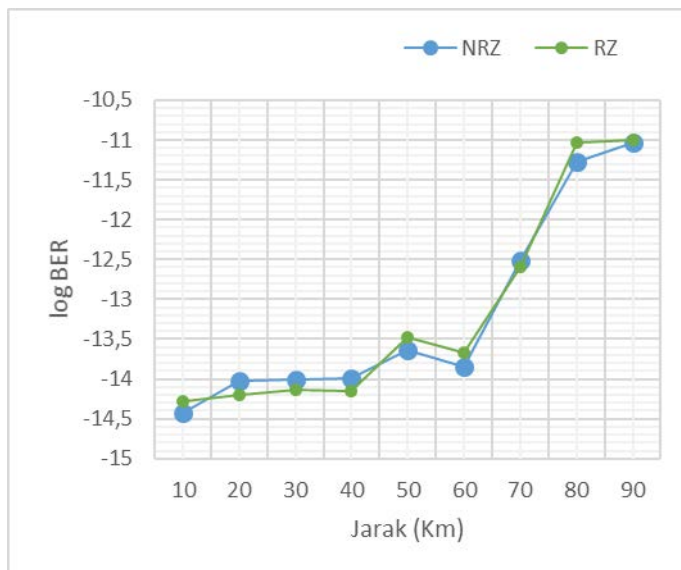
Tabel 4.10 Hasil Simulasi Pada Pengaruh Peletakan FBG *Bit Rate* 10 Gbps RZ

No	RF Carrier	Line Coding	fiber optic	Max. Q-Factor	Min. BER	P_{in} (dBm)	P_{out} (dBm)	Loss (dBm)	P_{EDFA} (dBm)
1	3,5 GHz	RZ	10 km	7,73281	$5,242 \times 10^{-15}$	-5,471	-8,122	2,651	1,465
2			20 km	7,71125	$6,1894 \times 10^{-15}$		-10,141	4,649	0,695
3			30 km	7,69096	$7,2292 \times 10^{-15}$		-12,135	6,649	-0,136
4			40 km	7,68816	$7,0782 \times 10^{-15}$		-14,381	8,646	-1,197
5			50 km	7,48951	$3,3286 \times 10^{-14}$		-16,443	10,645	-2,322
6			60 km	7,55376	$2,1060 \times 10^{-14}$		-6,725	12,64	1,975
7			70 km	7,22136	$2,5706 \times 10^{-13}$		-4,805	14,641	2,667
8			80 km	6,70392	$9,2565 \times 10^{-12}$		-4,756	16,642	2,685
9			90 km	6,69344	$9,9585 \times 10^{-12}$		-5,865	18,64	2,284

Gambar 4.26 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap *Q-factor*

Berdasarkan gambar 4.26 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai *Q-factor* tertinggi dengan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu 7,77622, sedangkan nilai *Q-factor* tertinggi dengan *line coding* RZ pada jarak 10 km yaitu 7,73281. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai

Q -factor dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 10 Gbps pada *line coding* NRZ dan RZ.

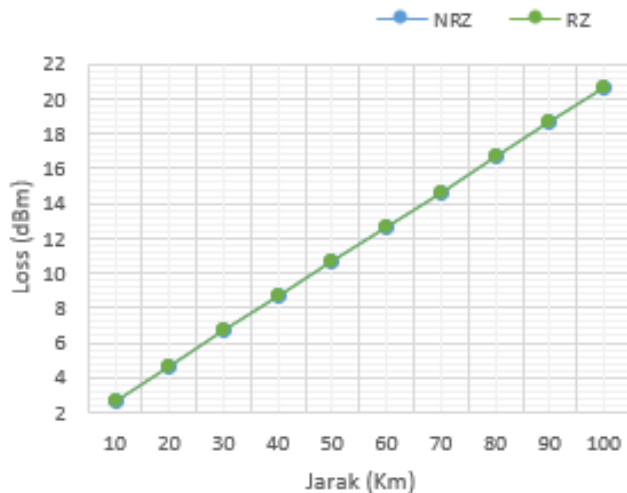


Gambar 4.27 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap BER

Berdasarkan gambar 4.27 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai BER terendah yang didapatkan *line coding* NRZ pada jarak 10 km yaitu $3,7319 \times 10^{-15}$, BER terendah yang didapatkan *line coding* RZ pada jarak 10 km yaitu $5,242 \times 10^{-15}$. Dengan FBG dan EDFA terjadi perbaikan nilai BER dibandingkan tanpa menggunakan FBG dan EDFA pada *bit rate* 10 Gbps pada *line coding* NRZ dan RZ.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai BER $5,242 \times 10^{-15}$ dengan nilai Q -factor sebesar 7,73281. Secara sistematis, nilai BER yang dihasilkan Q -factor dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 BER &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}Q} e^{-\frac{Q^2}{2}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi(7,73281)}} e^{-\frac{(7,73281)^2}{2}} \\
 &= 1,4863 \times 10^{-14}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.28 Grafik pengaruh Peletakan FBG terhadap loss

Berdasarkan gambar 4.28 pada *bit rate* 10 Gbps, nilai *loss* terendah yang didapatkan *line coding* NRZ 10 km yaitu 2,668 dBm, dan RZ pada jarak 10 km yaitu 2,651 dBm. Dengan menggunakan FBG nilai *loss* lebih besar jika dibandingkan tanpa menggunakan FBG.

Dari data hasil percobaan dengan menggunakan format *line coding* RZ pada panjang serat optik 10 km, didapatkan nilai *loss* sebesar 2,651 dBm. Secara sistematis, nilai *loss* yang dihasilkan dapat dibuktikan dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \text{Loss (dBm)} &= P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - P_{\text{out}} \text{ (dBm)} \\
 &= -5,471 - (-8,122) \\
 &= 2,651 \text{ dBm}
 \end{aligned}$$

Tetapi dengan menggunakan EDFA nilai level daya sinyal membaik

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} &= -8,122 \text{ dBm} & P_{\text{EDFA}} &= 1,465 \text{ dBm} \\
 &= 1\text{W} \times 10^{(-8,122/10)/1000} & &= 1\text{W} \times 10^{(1,465/10)/1000} \\
 &= 154,1 \times 10^{-6} \text{ W} & &= 1401,2 \times 10^{-6} \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Amplification P signal} &= P_{\text{EDFA}} / P_{\text{out}} \\
 &= 1401,2 \times 10^{-6} \text{ W} / 154,1 \times 10^{-6} \text{ W} \\
 &= 9,09\text{x}
 \end{aligned}$$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang mengacu pada ITU-T sesuai standard nilai BER 10^{-9} sampai 10^{-15} dan nilai Q -factor minimal 6. Pengaruh peletakan kompensator dispersi *Fiber Bragg Grating* (FBG) pada *bit rate* 5 dan 10 Gbps dengan line coding NRZ dan RZ, maka dibuat kesimpulan sebagai berikut:

- Pengaruh jarak transmisi terhadap *bit rate* dilihat dari parameter Q -factor dengan nilai minimal 6, penggunaan *bit rate* 5 Gbps dengan *line coding* NRZ dan RZ mampu mentransmisikan sampai dengan jarak 100 km, sedangkan pada *bit rate* 10 Gbps dengan NRZ dan RZ hanya mampu mentransmisikan sampai dengan jarak 90 km.
- Penggunaan kompensator dispersi FBG memperbaiki pelebaran pulsa yang terjadi tetapi nilai loss lebih besar dibandingkan tanpa menggunakan FBG.
- Penggunaan EDFA akan memperbaiki atau menguatkan level daya sinyal.
- Pada *bit rate* 5 Gbps NRZ pada jarak 10 km, nilai Q -factor yang didapatkan sebesar 7.92864, BER $1,0981 \times 10^{-15}$ and loss 2,667 dBm, tetapi dengan EDFA nilai level daya sinyal membaik dilihat dari $P_{out}/P_{EDFA} = 1430,87 \times 10^{-6} \text{ W} / 162,89 \times 10^{-6} \text{ W} = 8,78x$ penguatan level daya signal.
- Pada *bit rate* 10 Gbps RZ pada jarak 10 km, nilai Q -factor yang didapatkan sebesar 7.73281, BER $5,242 \times 10^{-15}$ and loss 2,561 dBm, tetapi dengan EDFA nilai level daya sinyal membaik dilihat dari $P_{out}/P_{EDFA} = 1401,2 \times 10^{-6} \text{ W} / 154,1 \times 10^{-6} \text{ W} = 9,09$ x penguatan level daya signal.

5.2 Saran

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada skripsi ini saran yang dapat diberikan adalah:

- Transmisi sistem RoF dengan *bit rate* 40 Gbps pada frekuensi 5G.
- Menggunakan beberapa kompensator dispersi FBG.

[Halaman ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

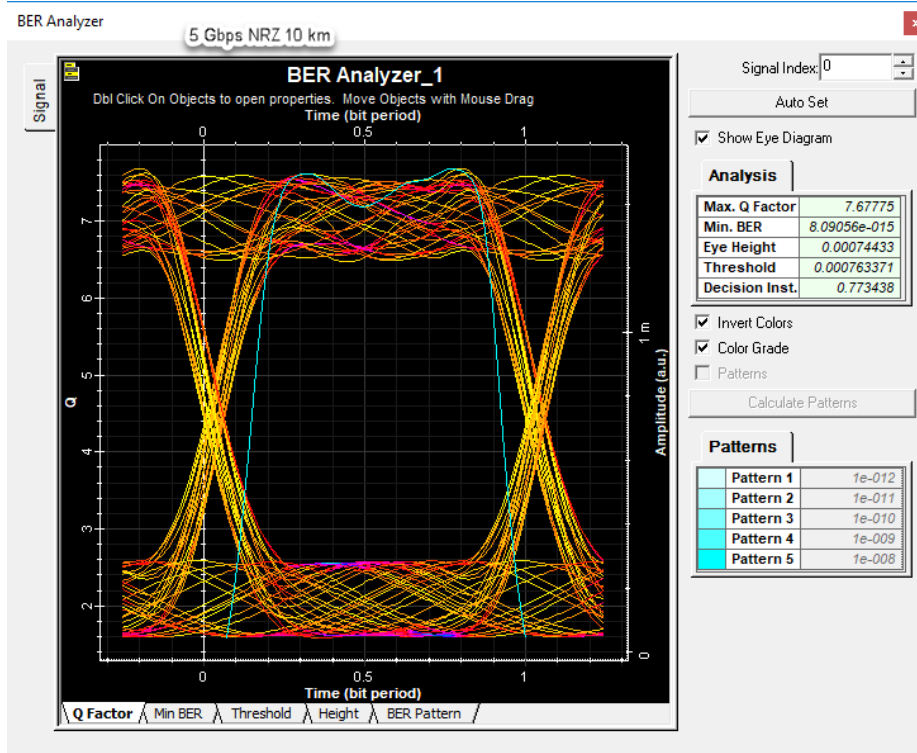
- Agrawal, G. P. 2002. *Fiber Optic Communication System*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Al-Raweshidy dan komaki. 2002. *Radio over Fiber Technologies for Mobile Communication Networks*. Norwood: Artech House.
- Amalia, Febyati. 2016. *Fiber Bragg Grating (FBG) pada Bit Rate 10 Gbps dan 40 Gbps dengan Line Coding NRZ dan RZ*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Chang, William S. 2002. *RF Photonic Technology in Optical Fiber Links*. San Diego: Cambridge
- Das dan Zahir. 2014. *Modeling and Performance Analysis of RoF System for Home Area Network with Different Line Coding Schemes Using Optisystem*. Journal IJMSE. 2045-7057.
- Dutton, H. J. R. 1998. *Understanding Optical Communications*. International Business Machines Corporation.
- Forouzan, Behrouz A et al. 2007. *Data Communications and Networking Fourth Edition*. McGraw-Hill.
- Ghafoor, Salman. 2012. *Radio over Fiber System*. United Kingdom: University of Southampton.
- ITU-T. 2012. *Optical system design and engineering considerations - Series G*. International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector.
- Johny, Shashidharan. 2012. *Design and Simulation of a Radio Over Fiber System and its Performance Analysis*. Journal IEEE. 978-1-4673.
- Karthikeyan dan Prakasam. 2013. *OFDM Signal Improvement Using Radio over Fiber for Wireless System*. Journal IJCNWC. 2250-3501.
- Mitschke, Fedor. 2009. *Fiber Optics Physics and Technology*. Germany: Springer.
- Osman, Onur. 2009. *Contemporary Coding Techniques and Applications for Mobile Communications*. Amerika: Taylor dan Francis Group.

- Pandey, Gupta dan Chaurasiya. 2014. *Radio over Fiber Technology with WDM PON System*. Journal of Innovation and Scientific Research IJISR-ISSR. 2351-8014.
- Prasad, Patra dan Barpanda. 2016. *Performance Improvement of Fiber Bragg Grating as Dispersion Compensator on the Receiver Characteristics*. Journal IJIRCCE. 2320- 9801.
- Reynaert dan Steyaert. 2006. *RF POWER AMPLIFIERS FOR MOBILE COMMUNICATIONS*. Netherlands: Springer.
- Senior, John M. 2009. *Optical Fiber Communication Principles and Practice Third Edition* Prentice Hall.
- Sharma, E. A., Singh, E.S., & Sharma, E. B. 2013. *Investigation Dispersion Compensation using Fiber Bragg Grating in Optical Fiber Communication System*. International Journal of Computer Applications, Vol. 126.
- Shieh, William dan Djordjevic. 2010. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*. San Diego: Elsevier Inc.
- Tao pu, Tao fang et al. 2015. *DISPERSION COMPANSATION METHOLDS FOR RADIO OVER FIBER SYSTEM*. Journal IEEE. 978-1-4673-7373-9.
- Yadav, Jaiswal dan Kumar. 2014. *Radio over Fiber Technology*. Journal IOSR-JECE. 2278-2834.
- Zhu, Zhang, Wang, Cheng, Liu dan Chang. 2013. *Radio Over Fiber Access Architecture for Integrated Broadband Wireless Services*. Journal of Lightwave Tecnology IEEE. 0733-8724.

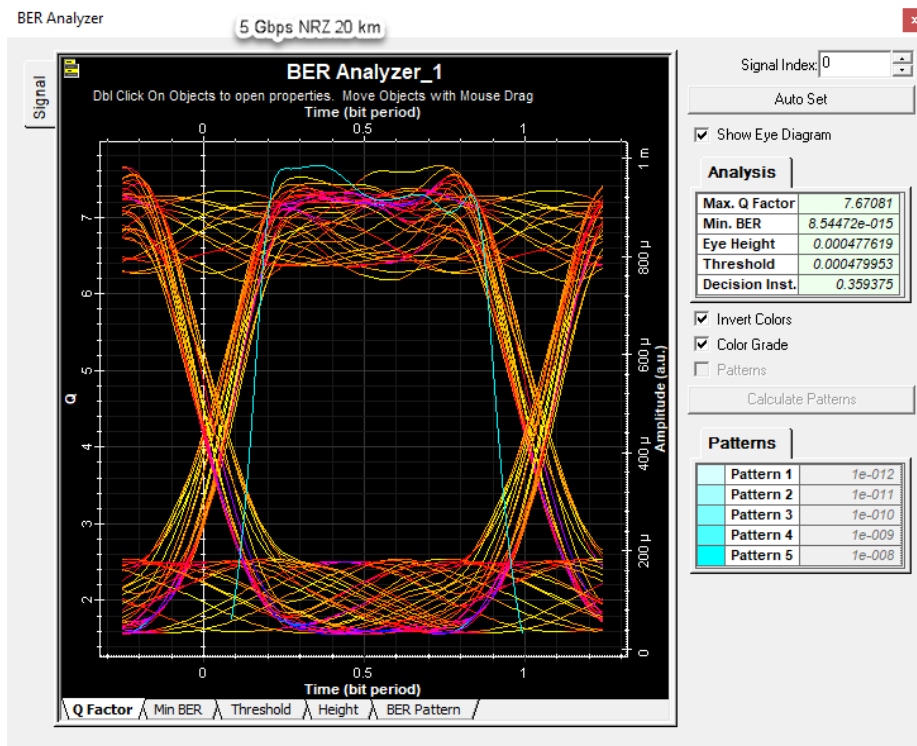
LAMPIRAN

Lampiran 1 Eye Pattern

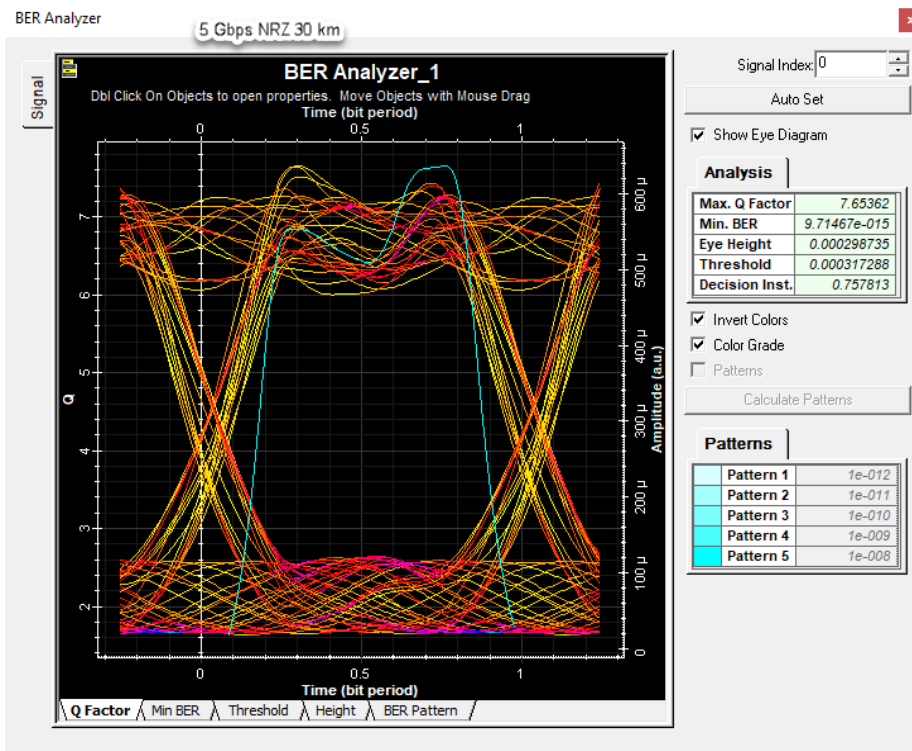
1. 5 Gbps NRZ 10 km



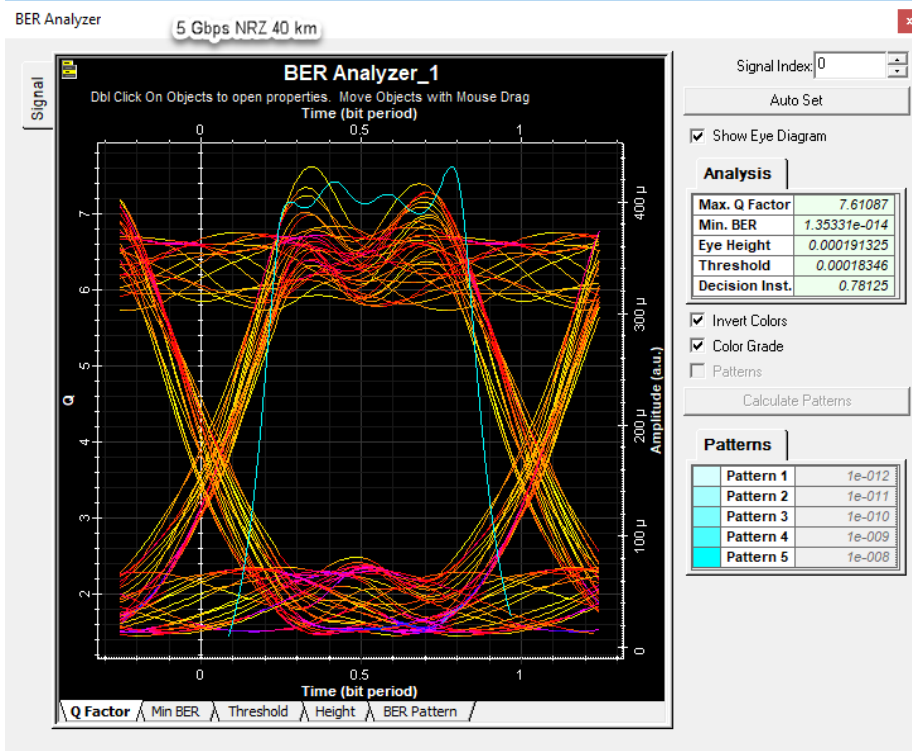
2. 5 Gbps NRZ 20 km



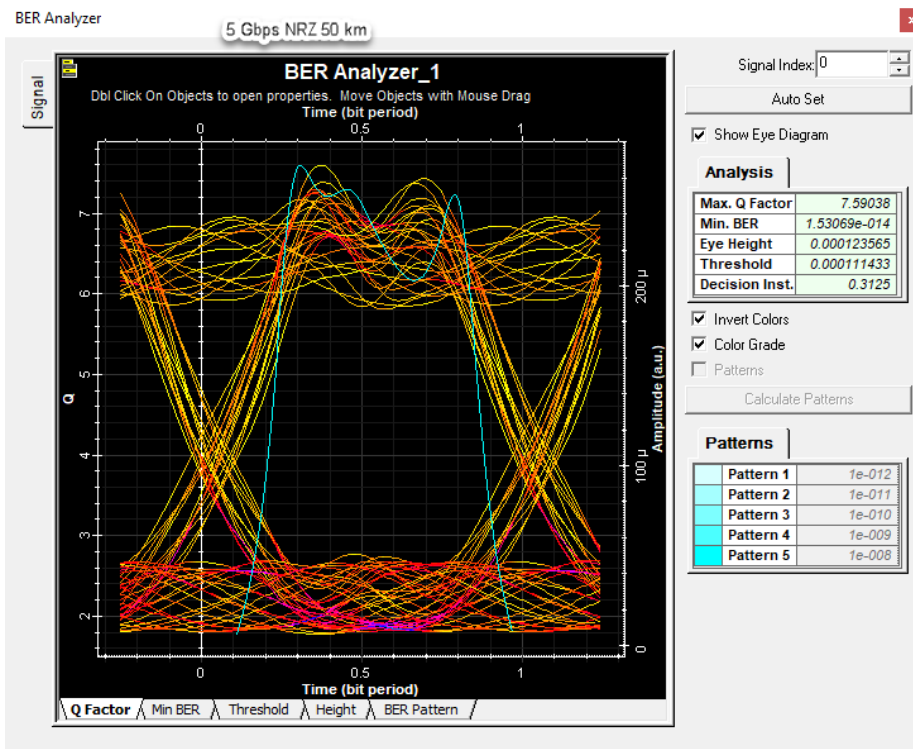
3. 5 Gbps NRZ 30 km



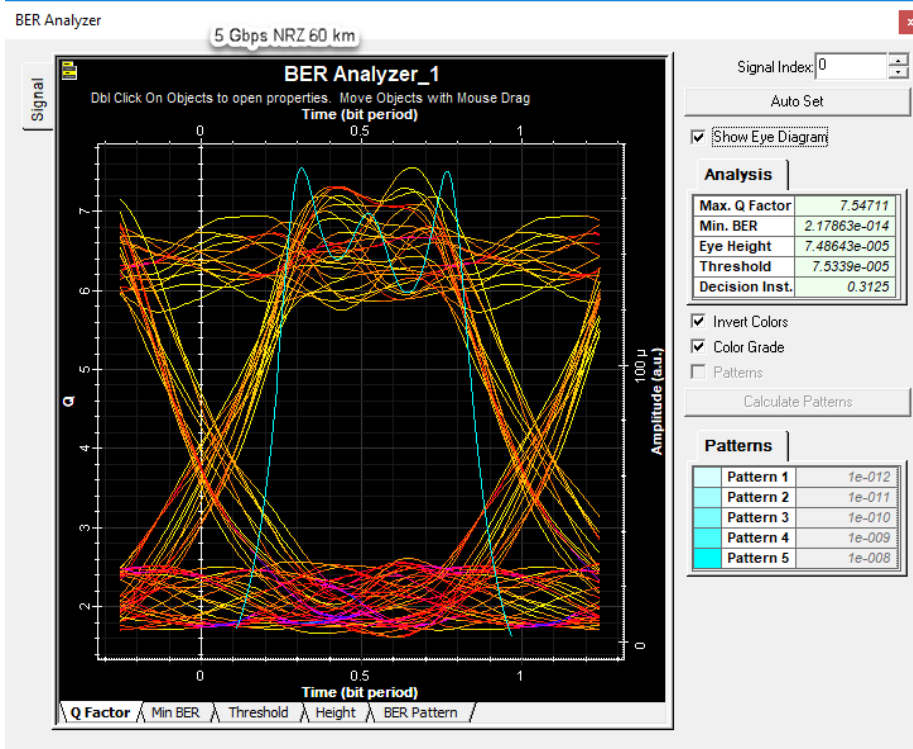
4. 5 Gbps NRZ 40 km



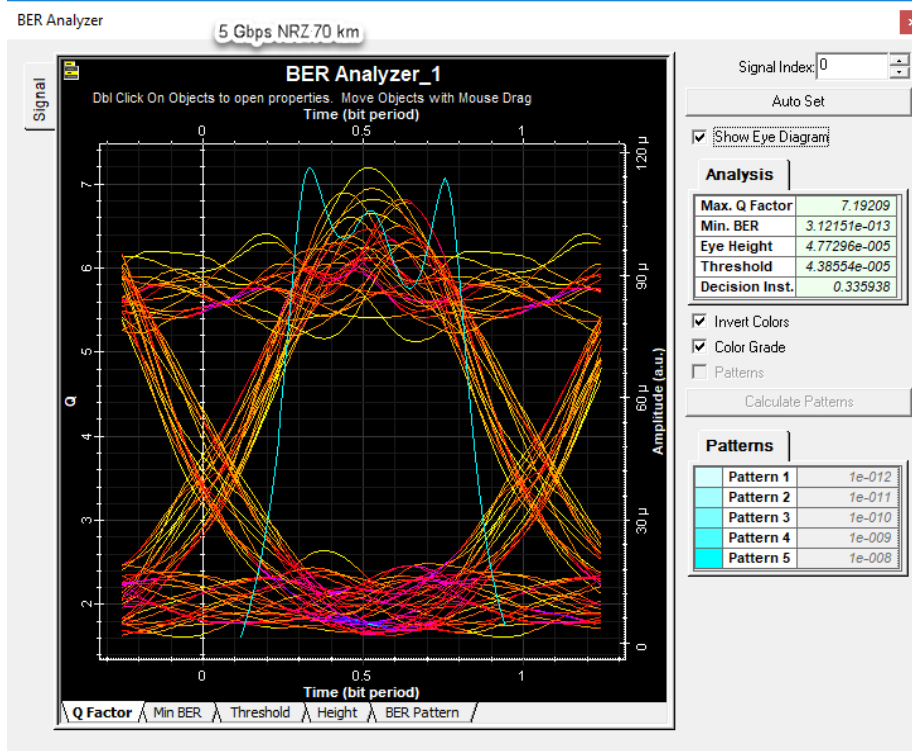
5. 5 Gbps NRZ 50 km



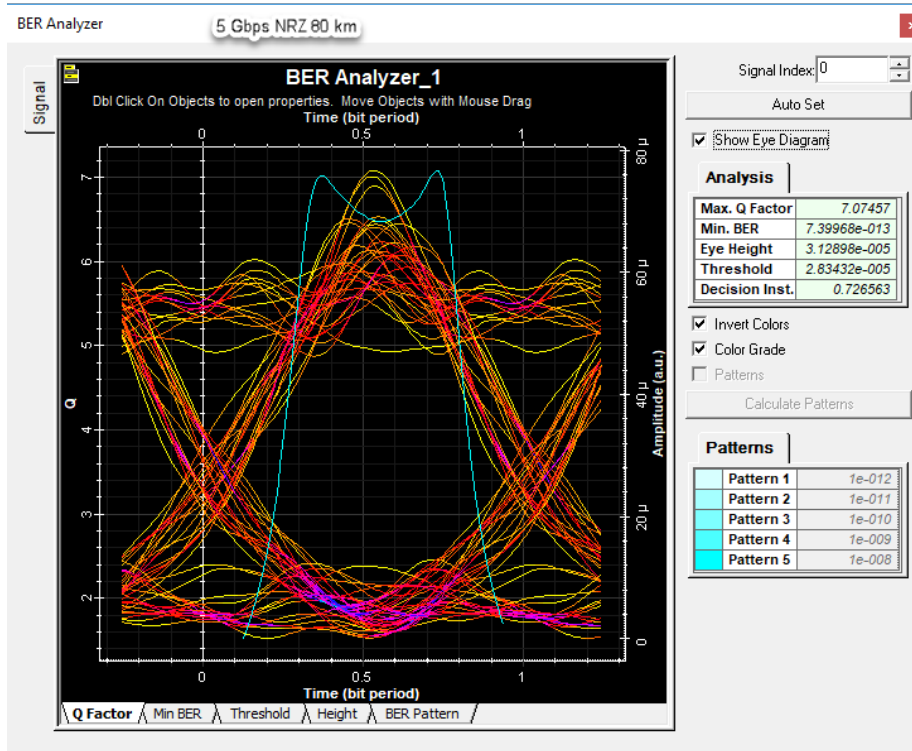
6. 5 Gbps NRZ 60 km



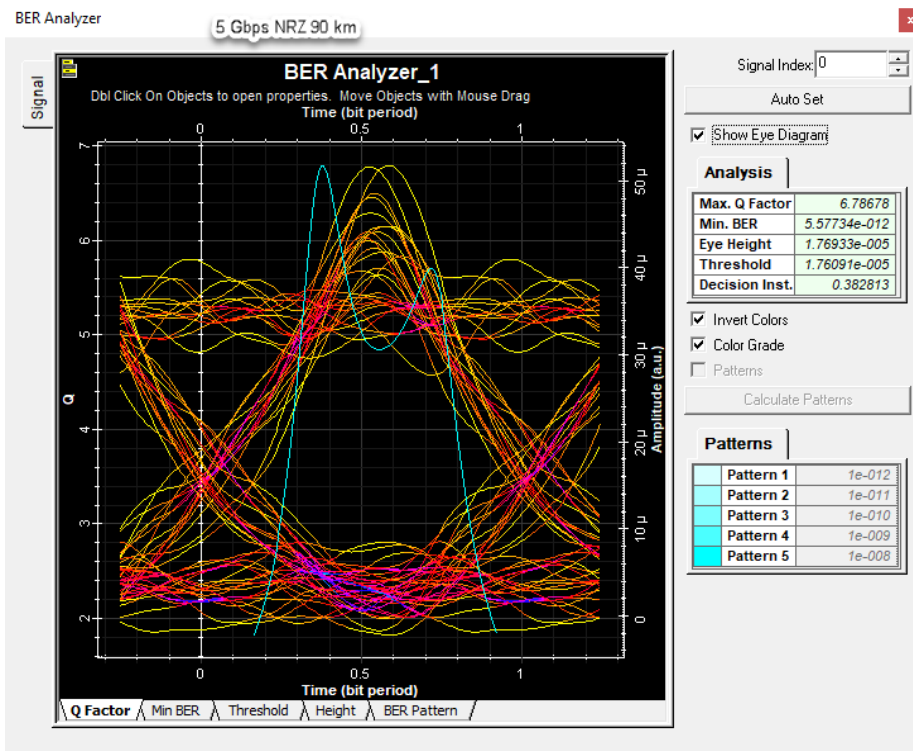
7. 5 Gbps NRZ 70 km



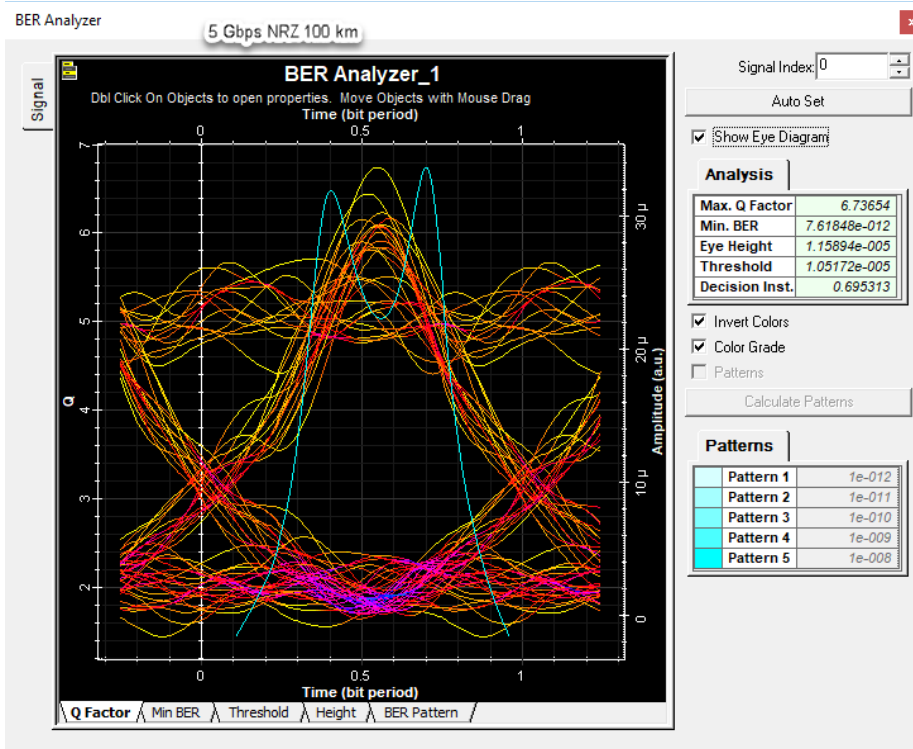
8. 5 Gbps NRZ 80 km



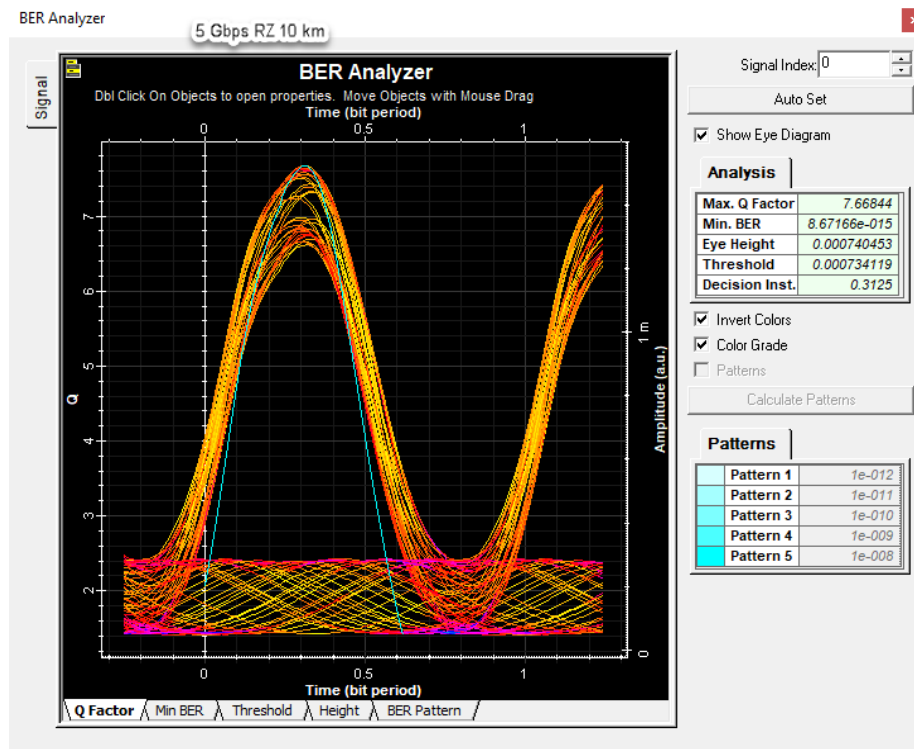
9. 5 Gbps NRZ 90 km



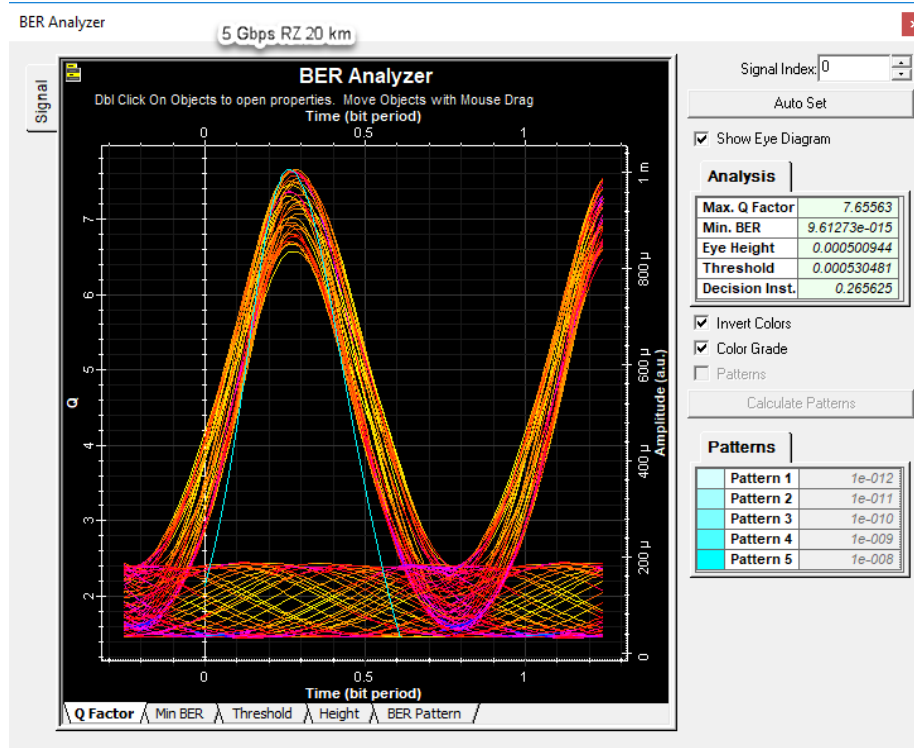
10. 5 Gbps NRZ 100 km



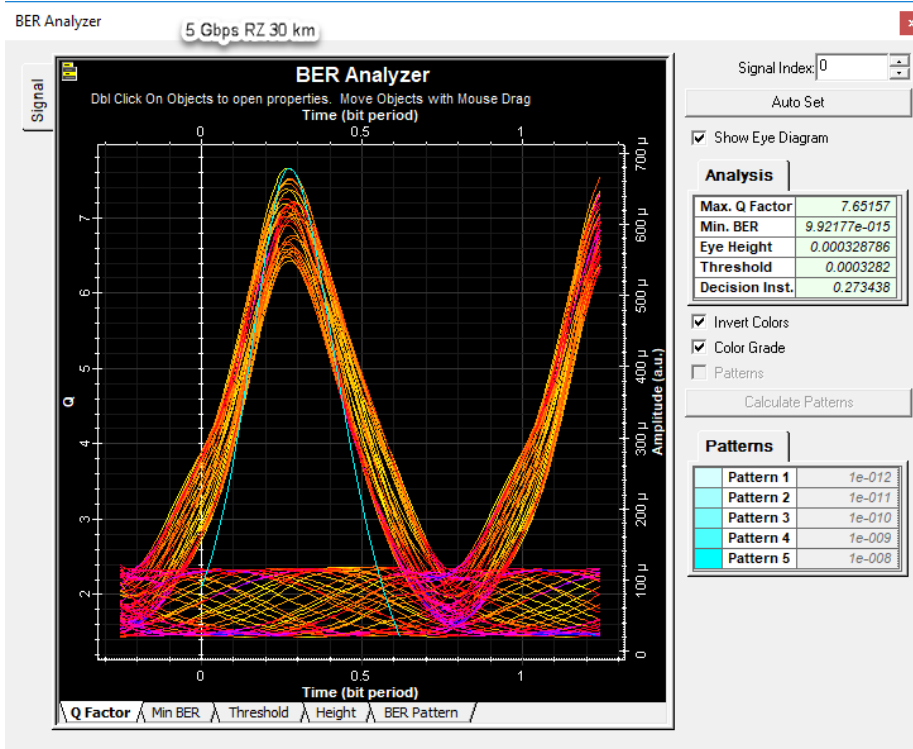
11. 5 Gbps RZ 10 km



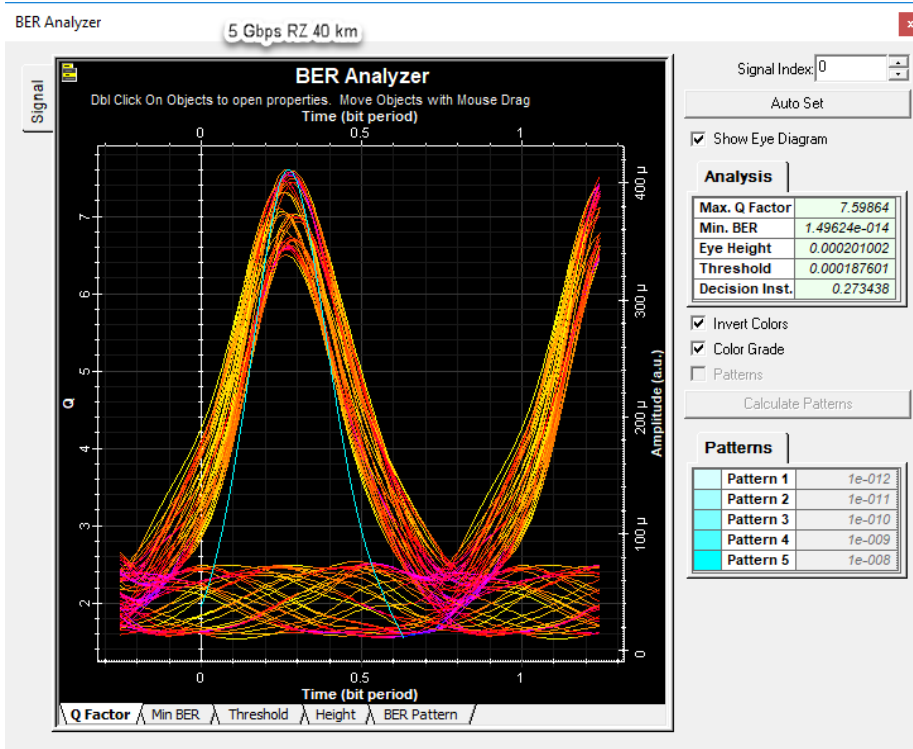
12. 5 Gbps RZ 20 km



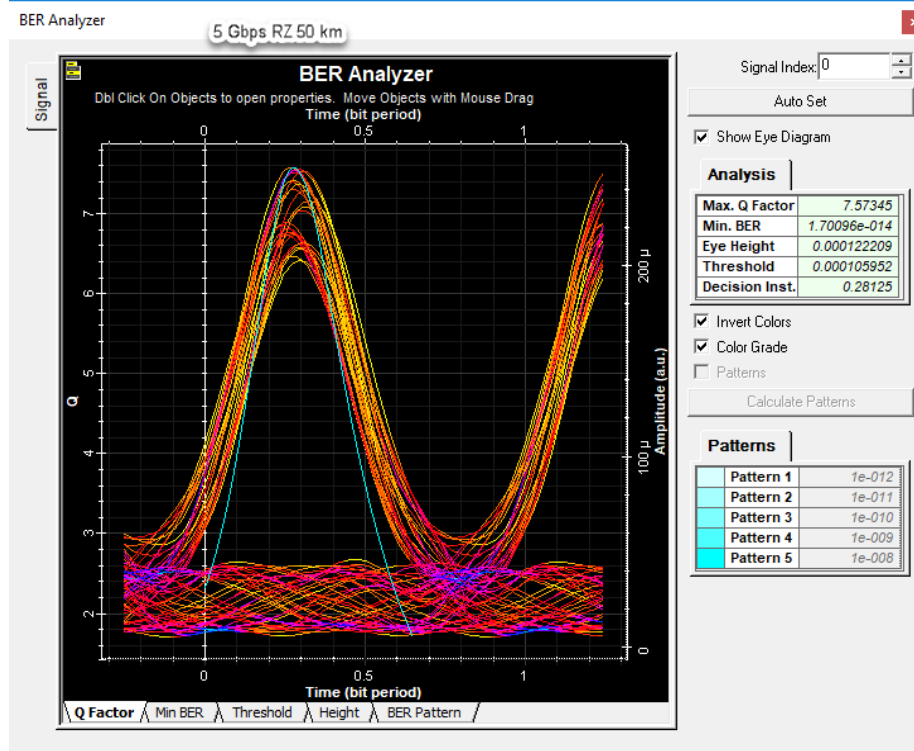
13. 5 Gbps RZ 30 km



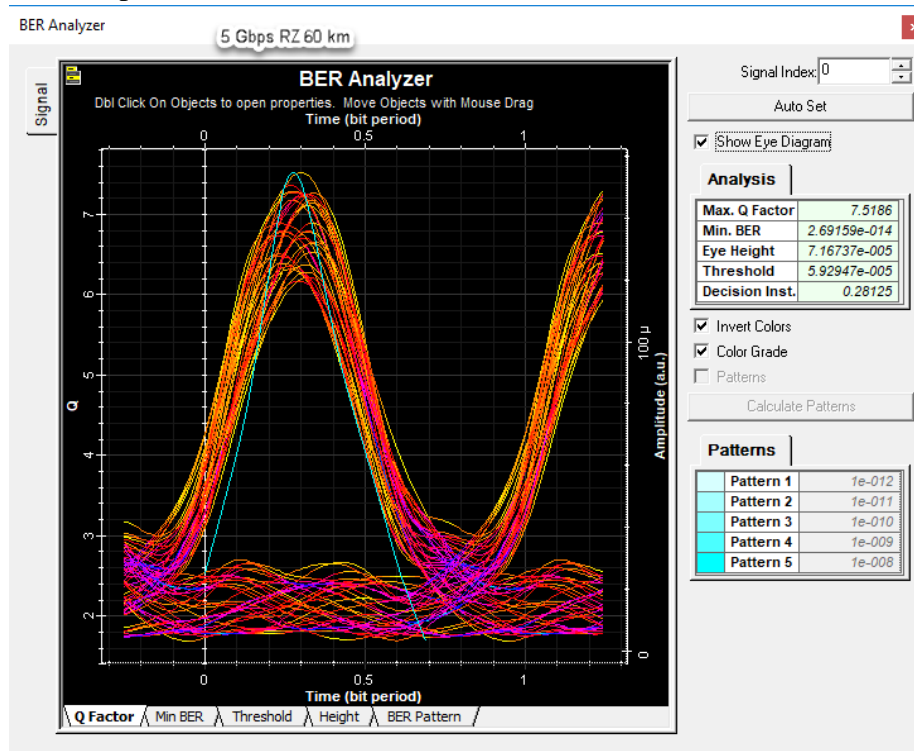
14. 5 Gbps RZ 40 km



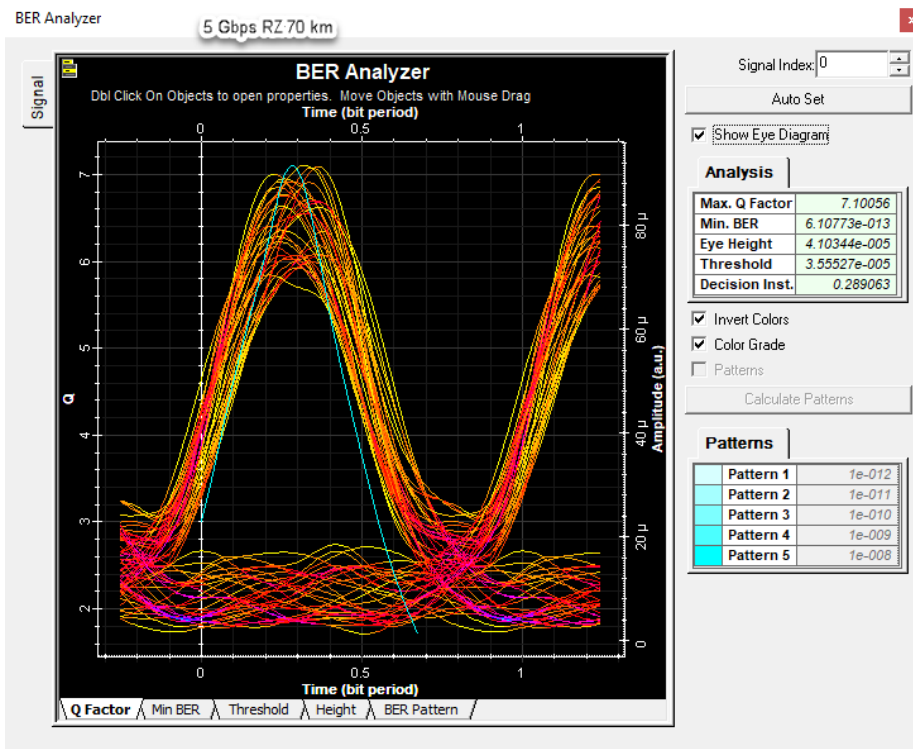
15. 5 Gbps RZ 50 km



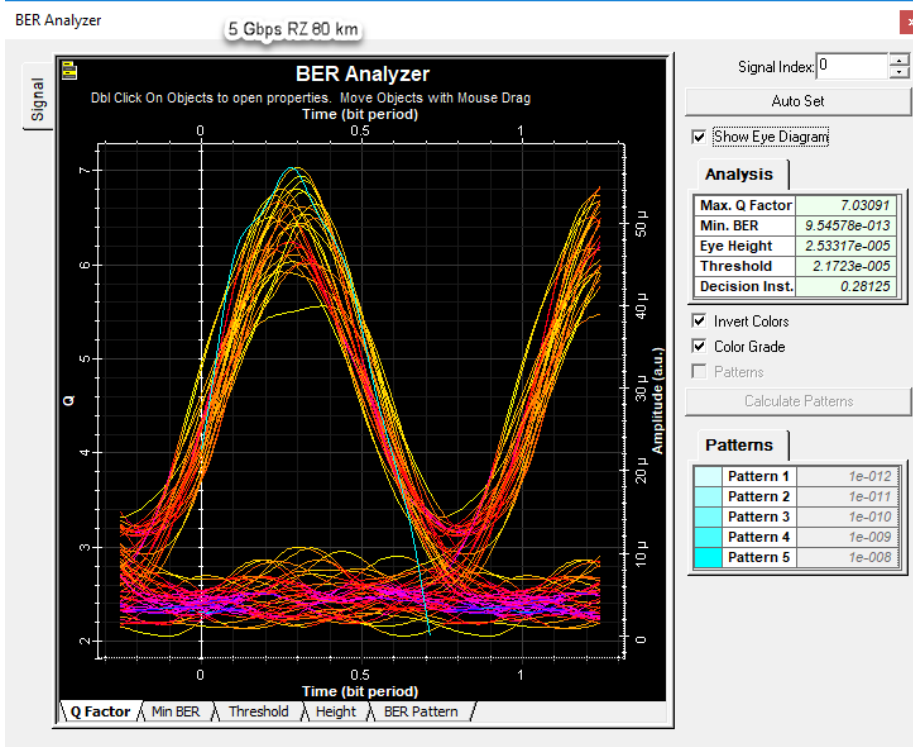
16. 5 Gbps RZ 60 km



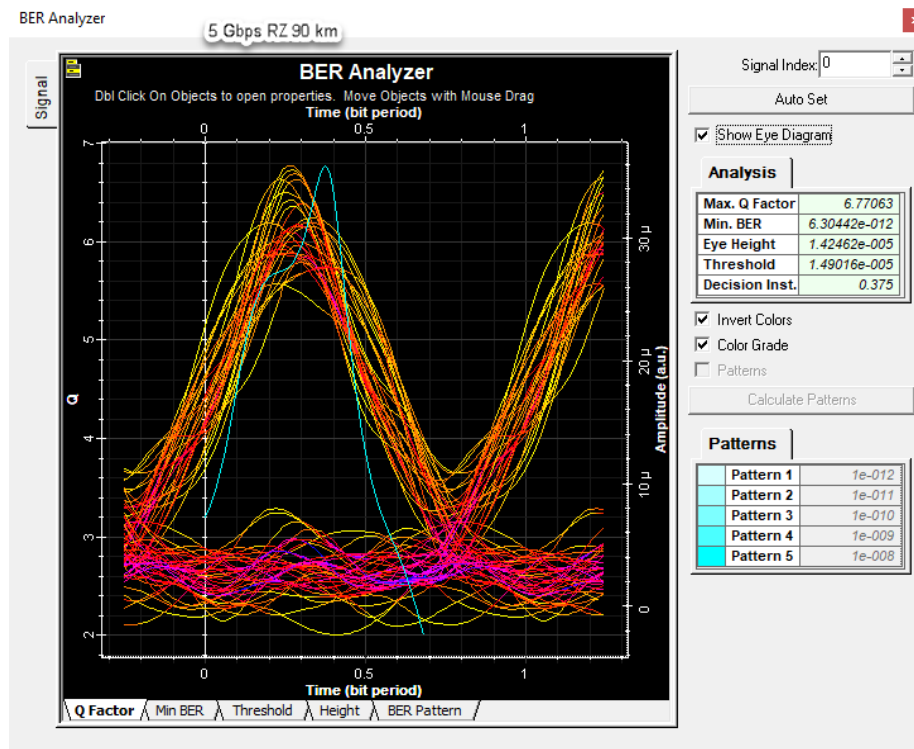
17. 5 Gbps RZ 70 km



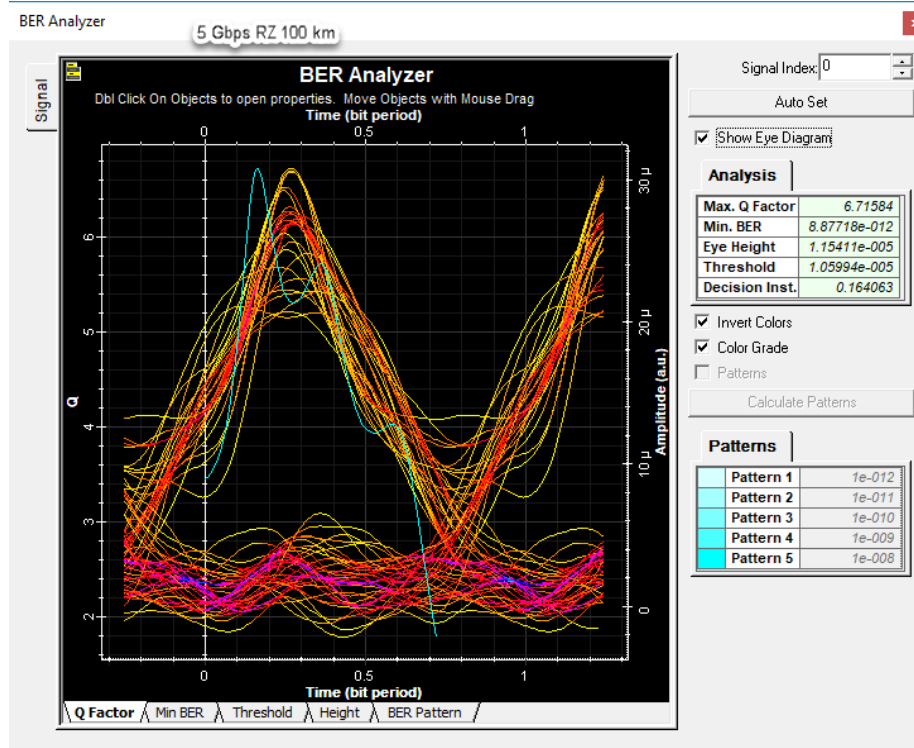
18. 5 Gbps RZ 80 km



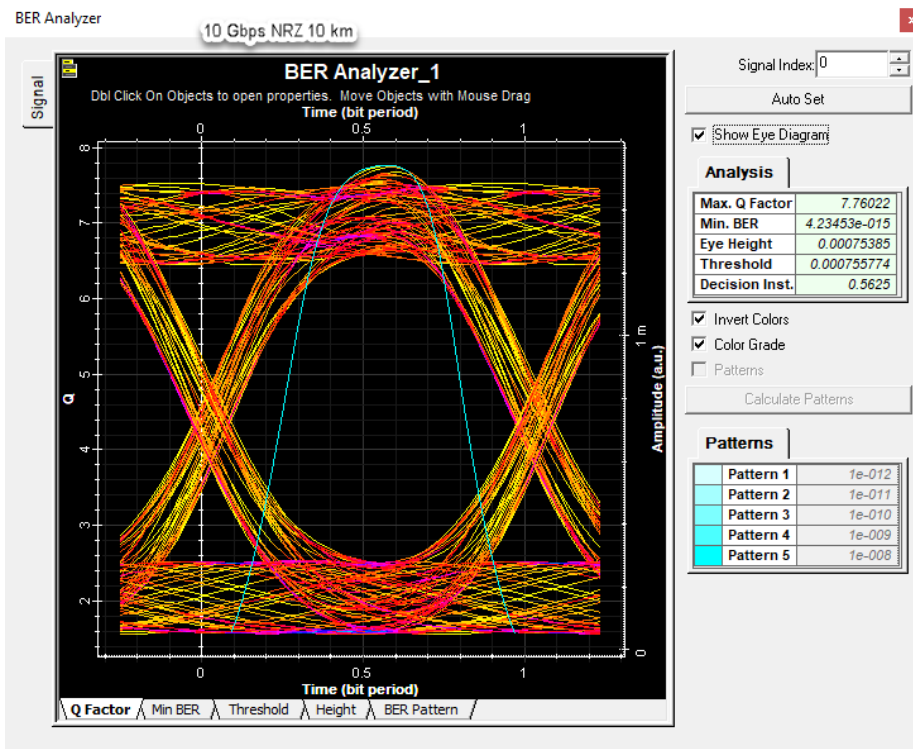
19. 5 Gbps RZ 90 km



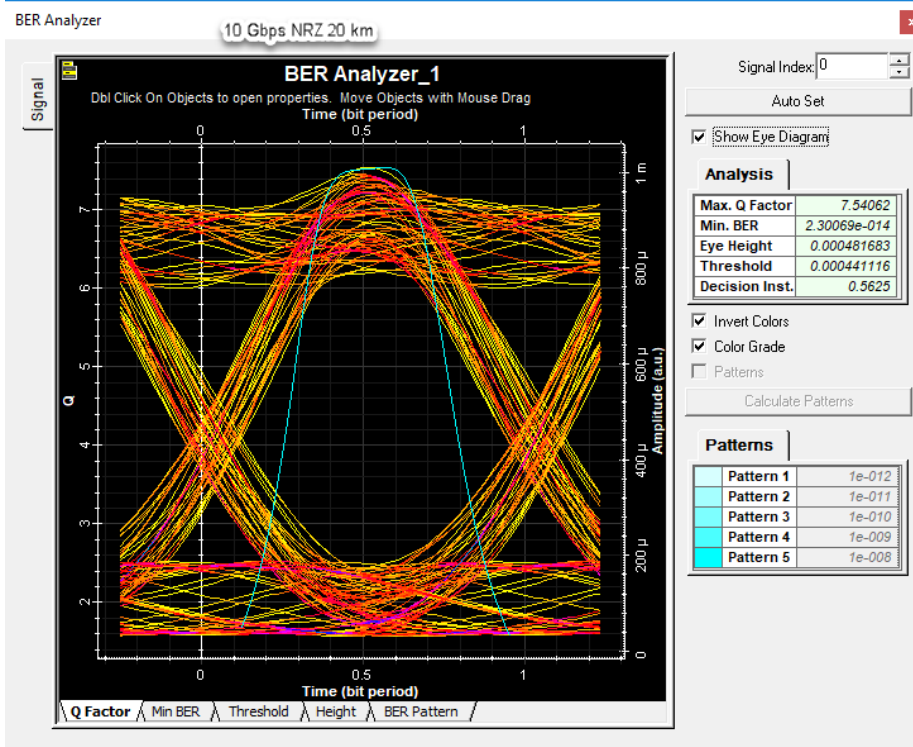
20. 5 Gbps RZ 100 km



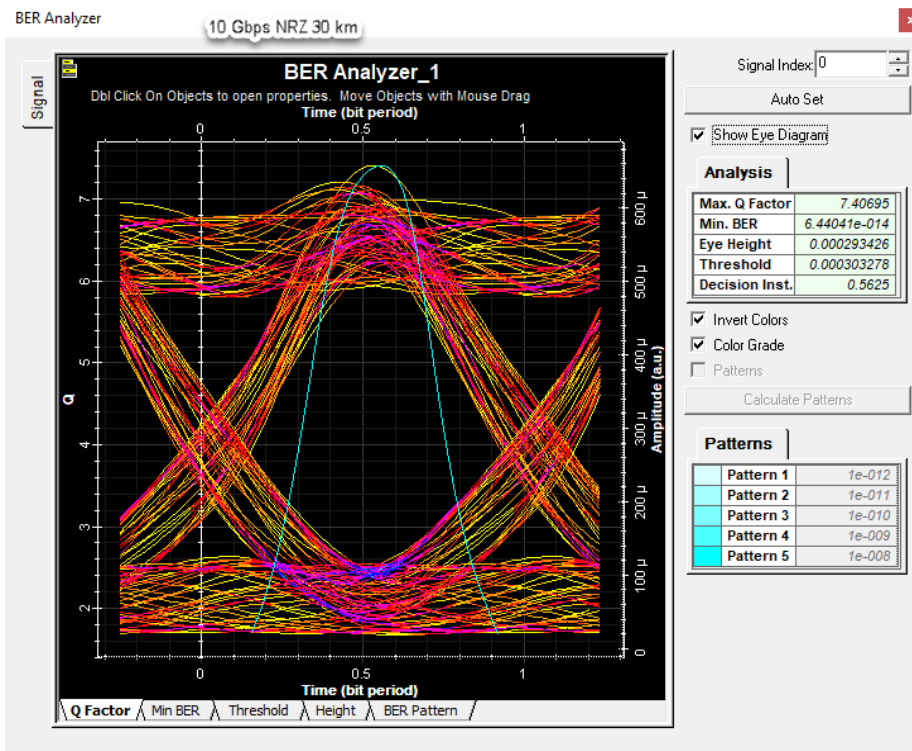
21. 10 Gbps NRZ 10 km



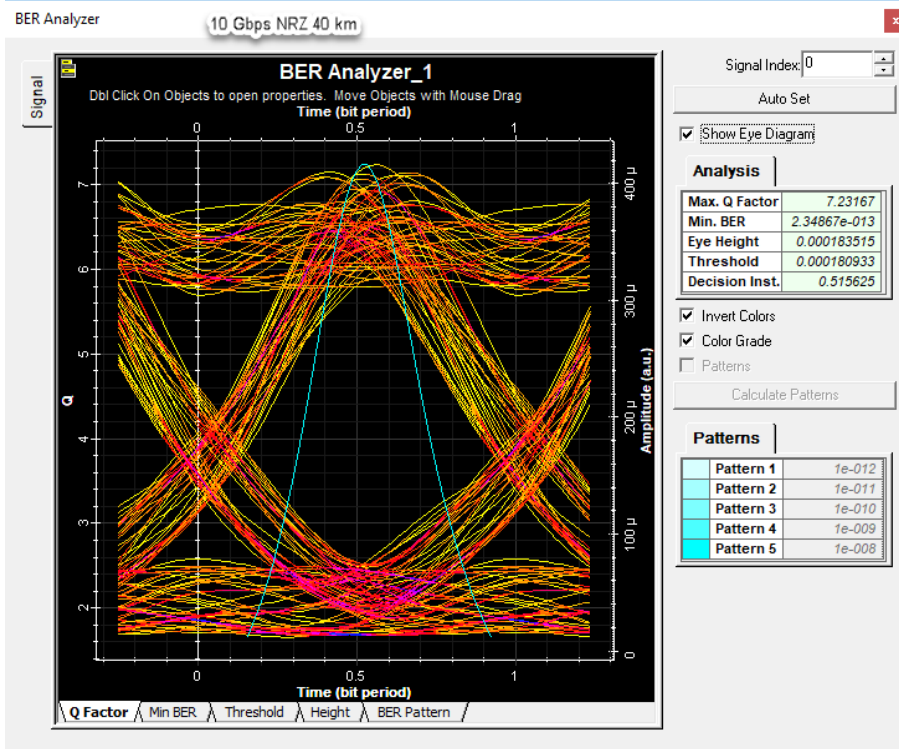
22. 10 Gbps NRZ 20 km



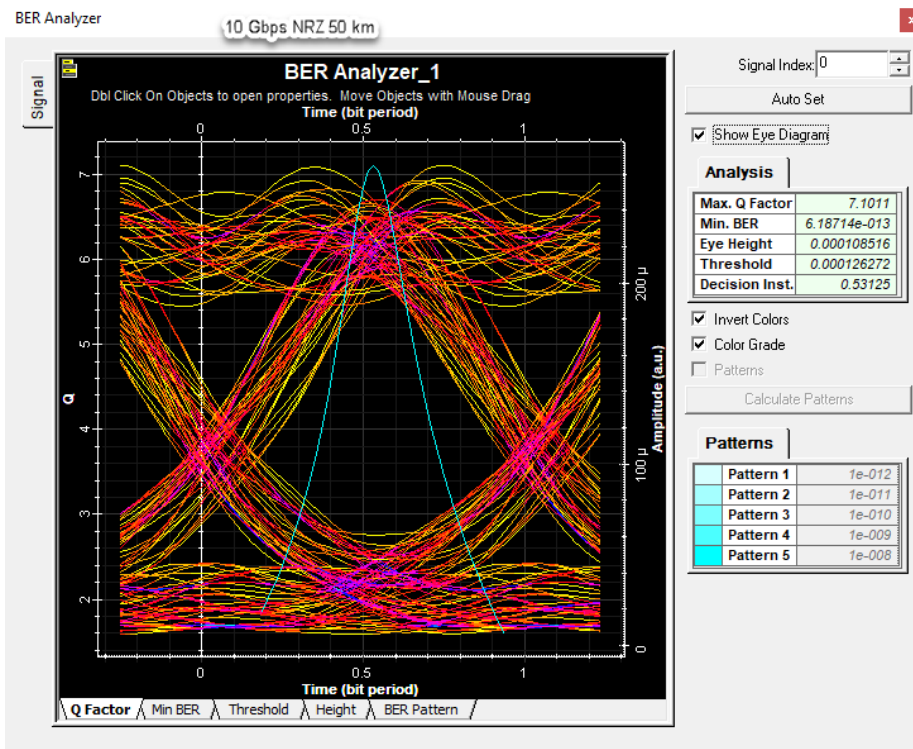
23. 10 Gbps NRZ 30 km



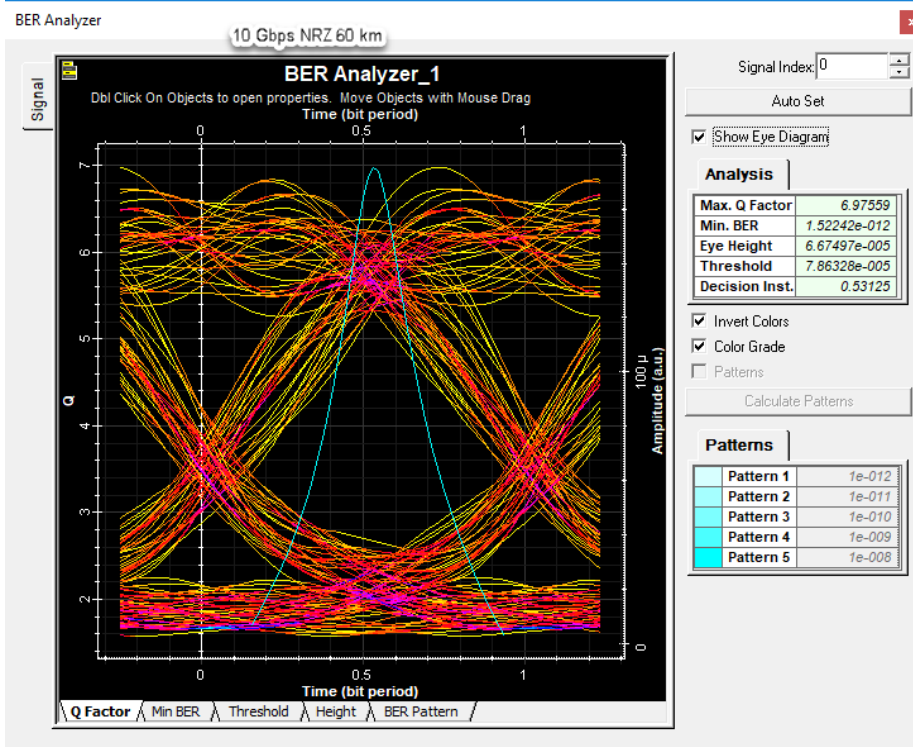
24. 10 Gbps NRZ 40 km



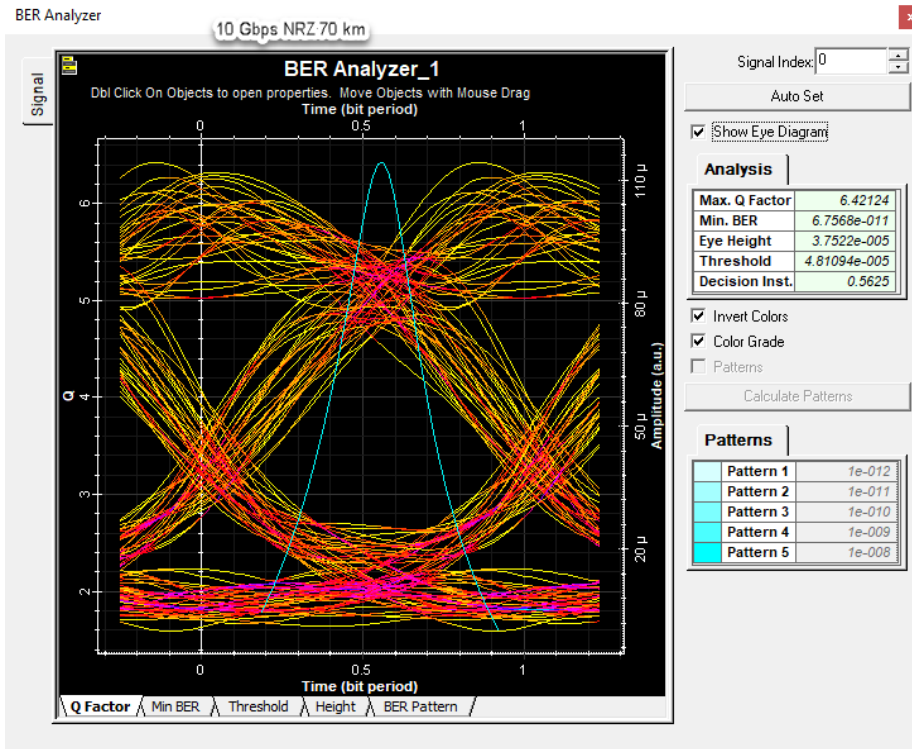
25. 10 Gbps NRZ 50 km



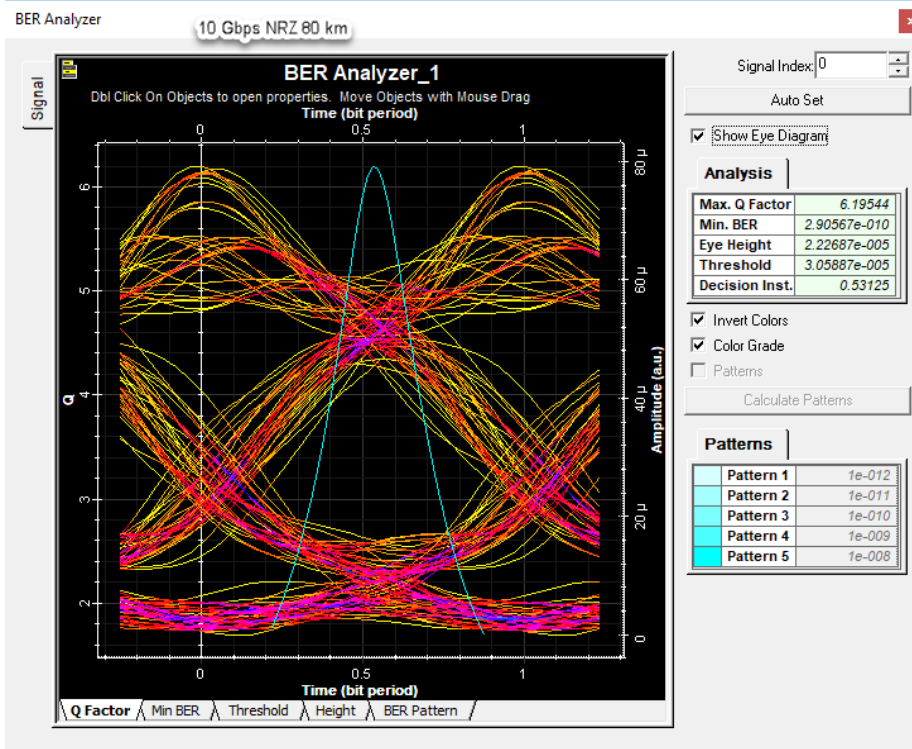
26. 10 Gbps NRZ 60 km



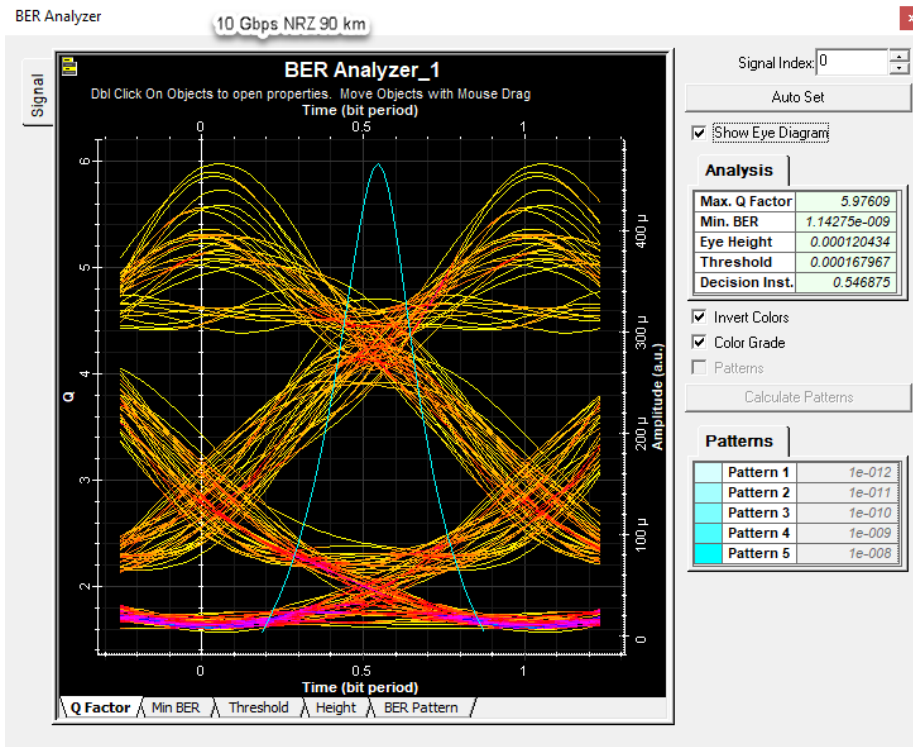
27. 10 Gbps NRZ 70 km



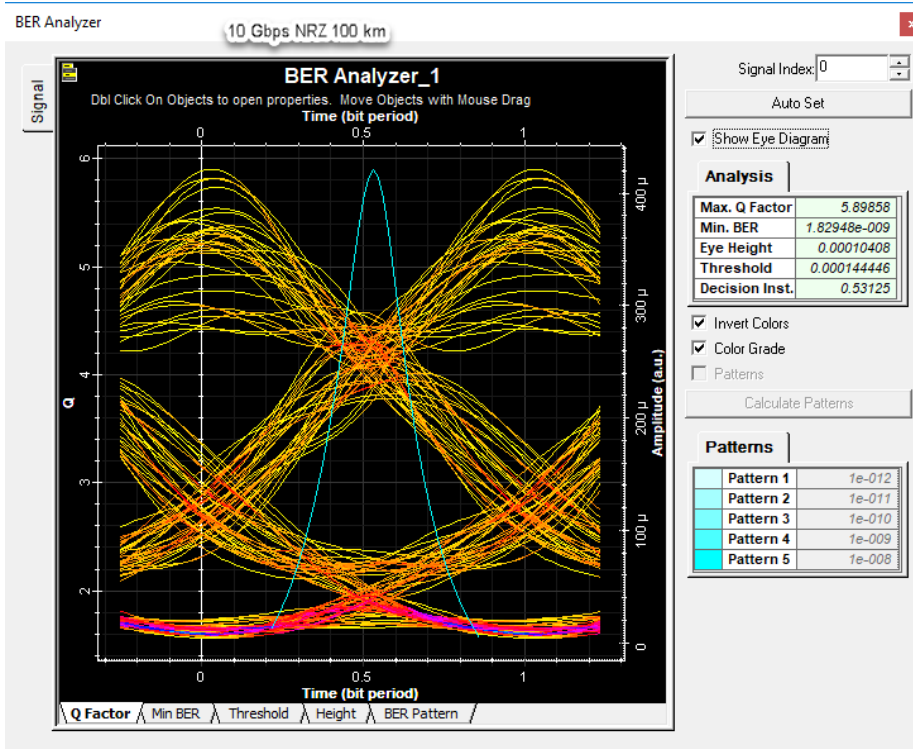
28. 10 Gbps NRZ 80 km



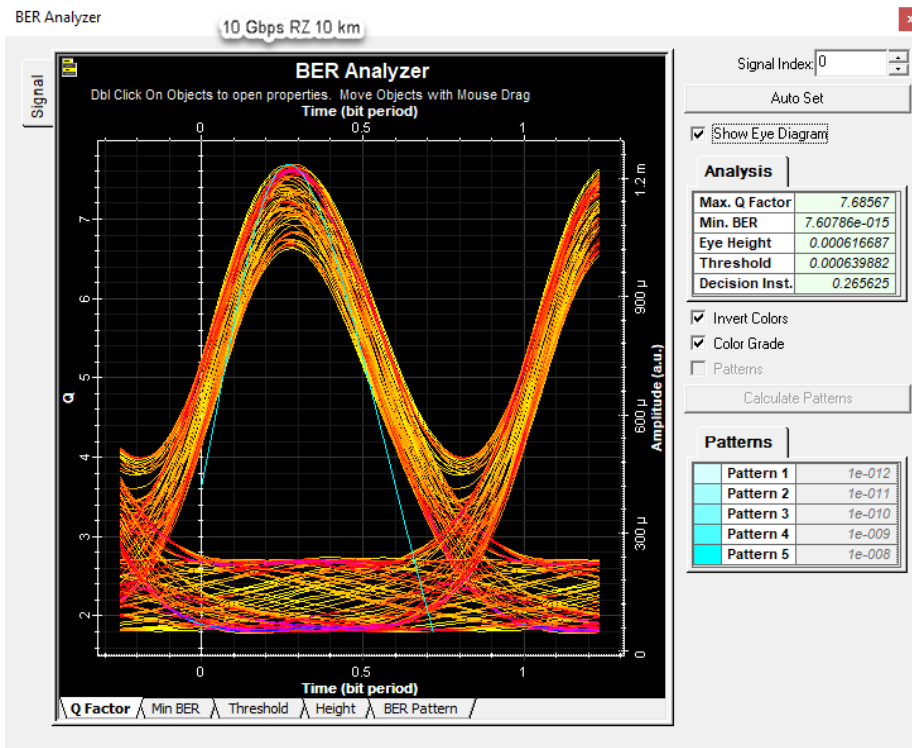
29. 10 Gbps NRZ 90 km



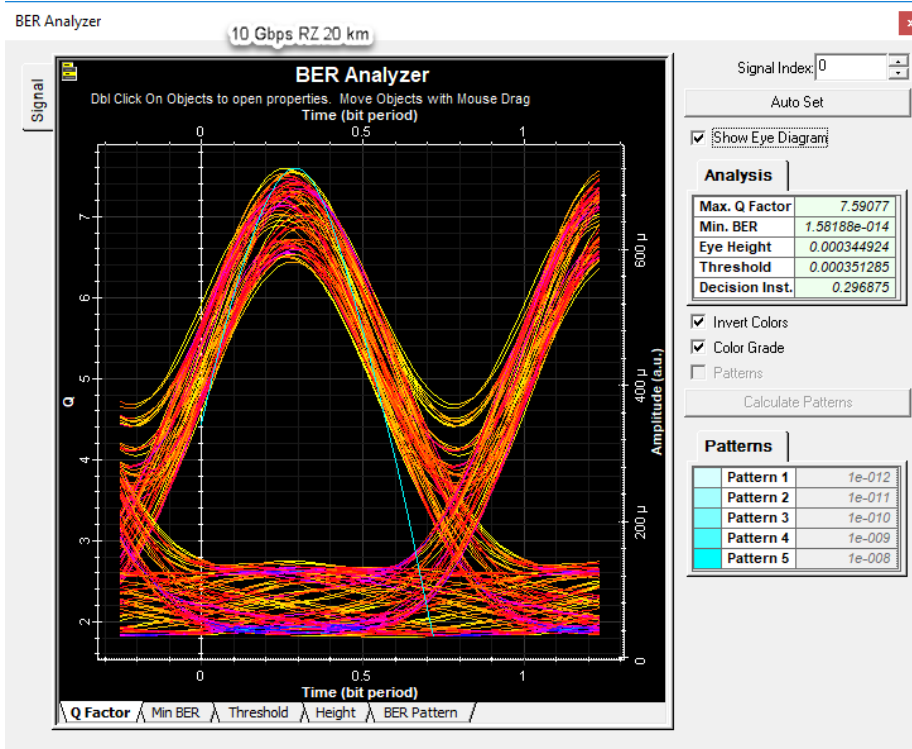
30. 10 Gbps NRZ 100 km



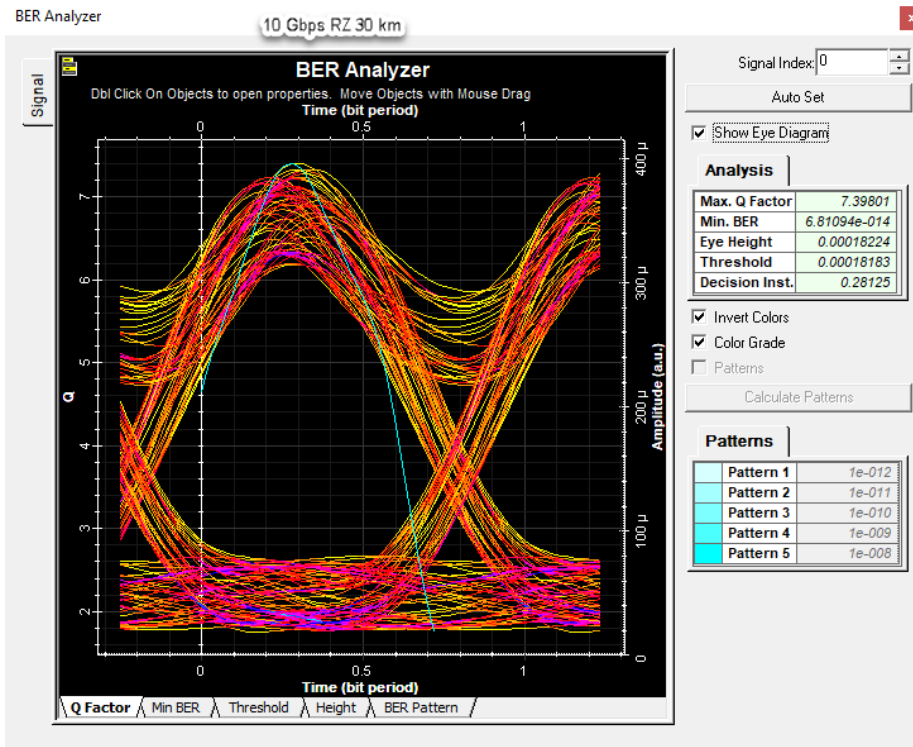
31. 10 Gbps RZ 10 km



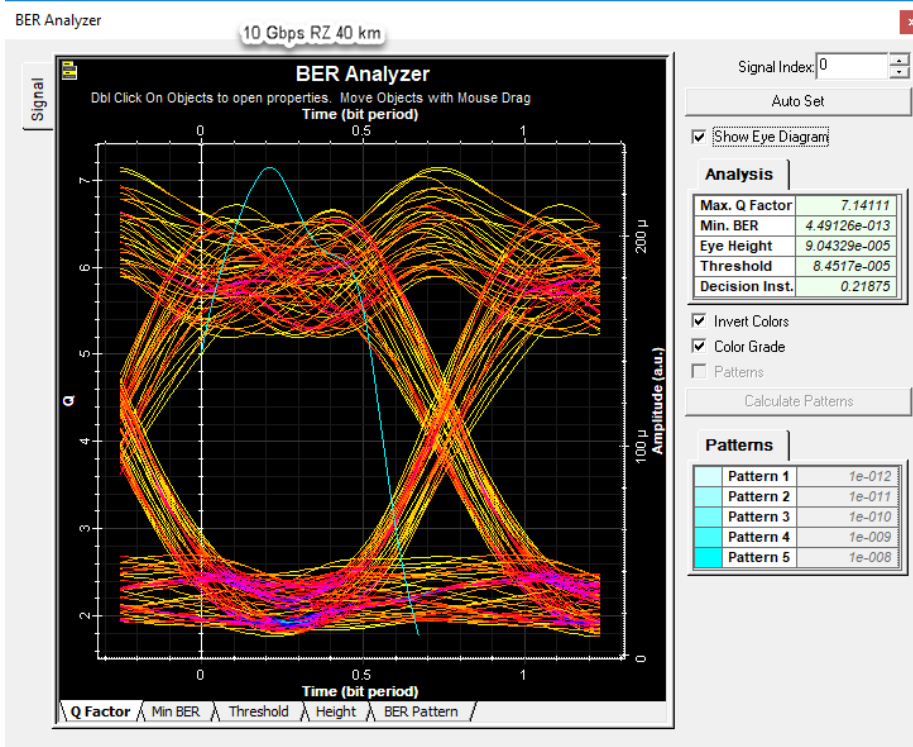
32. 10 Gbps RZ 20 km



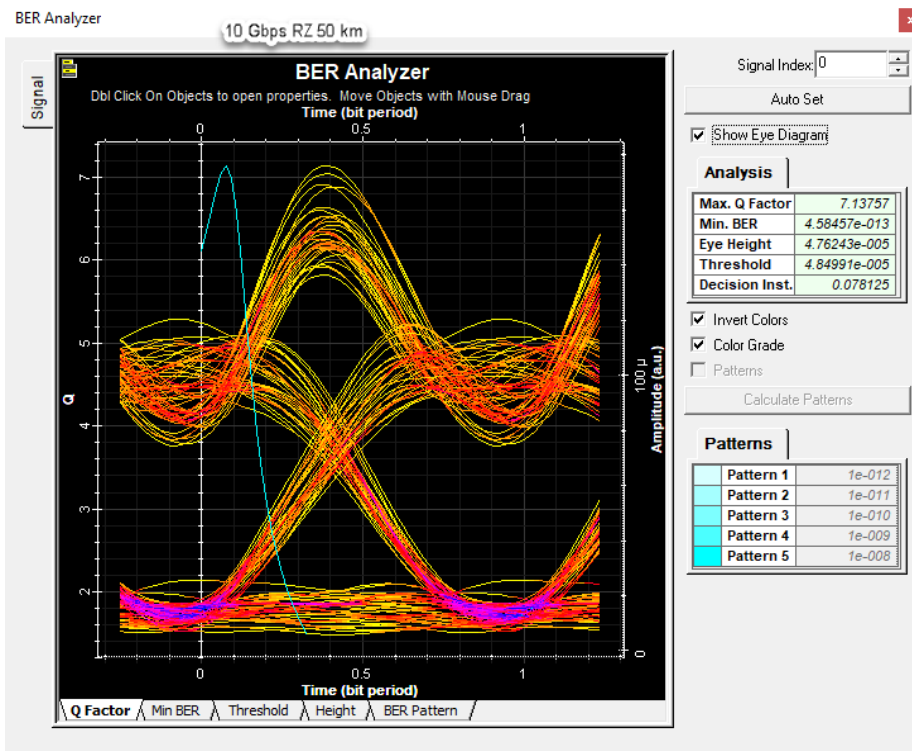
33. 10 Gbps RZ 30 km



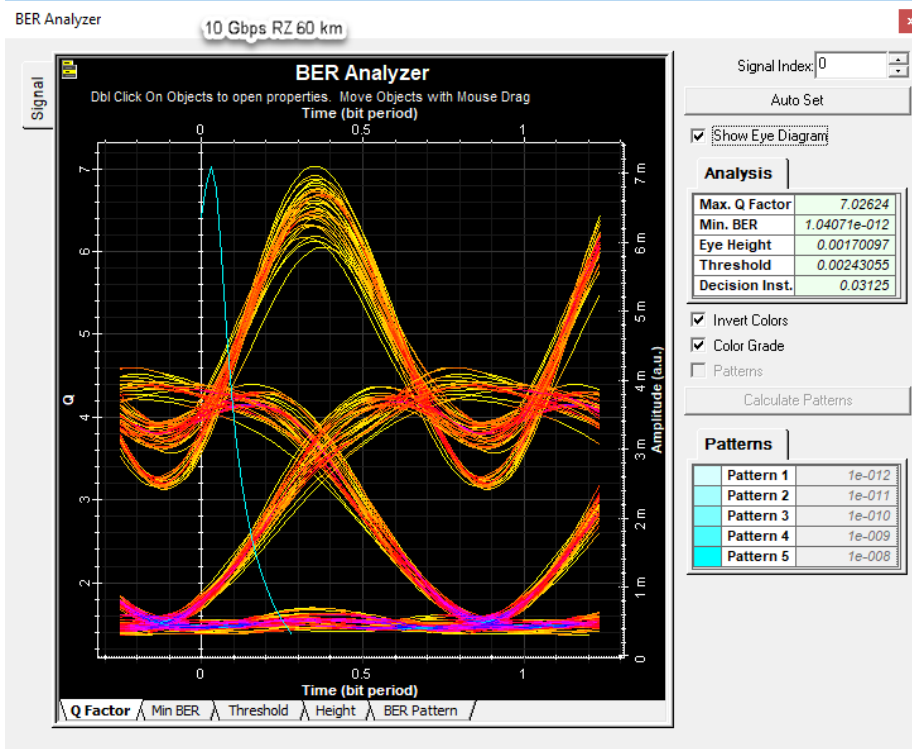
34. 10 Gbps RZ 40 km



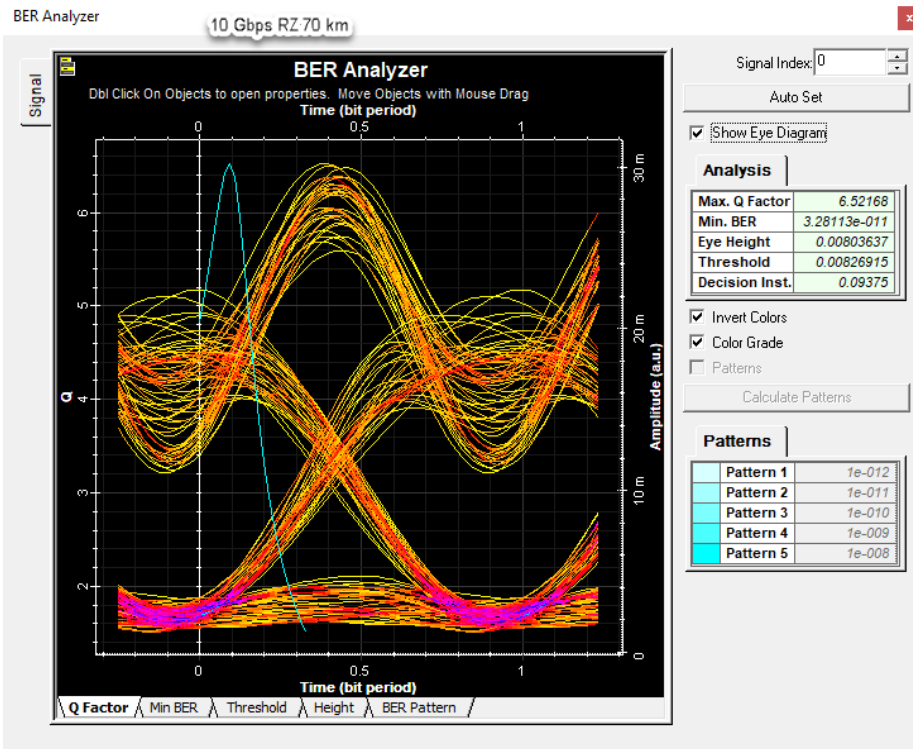
35. 10 Gbps RZ 50 km



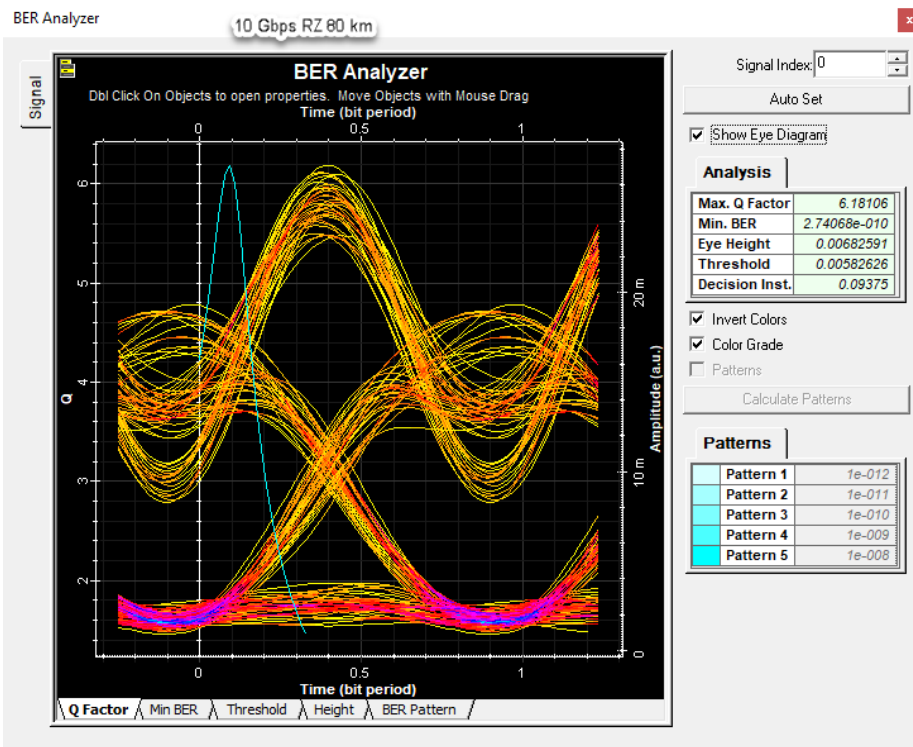
36. 10 Gbps RZ 60 km



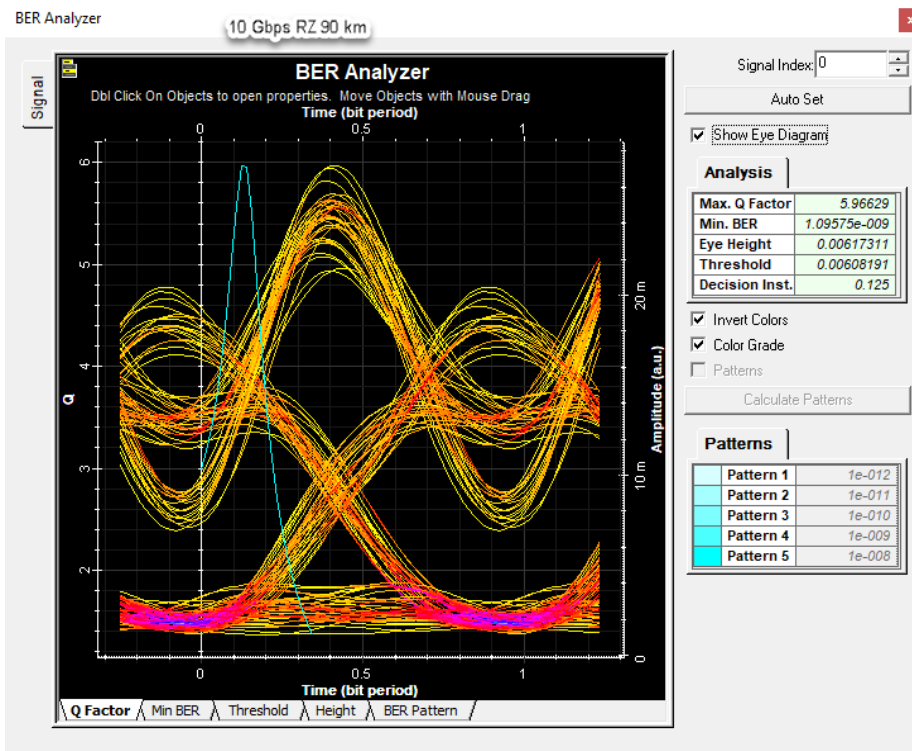
37. 10 Gbps RZ 70 km



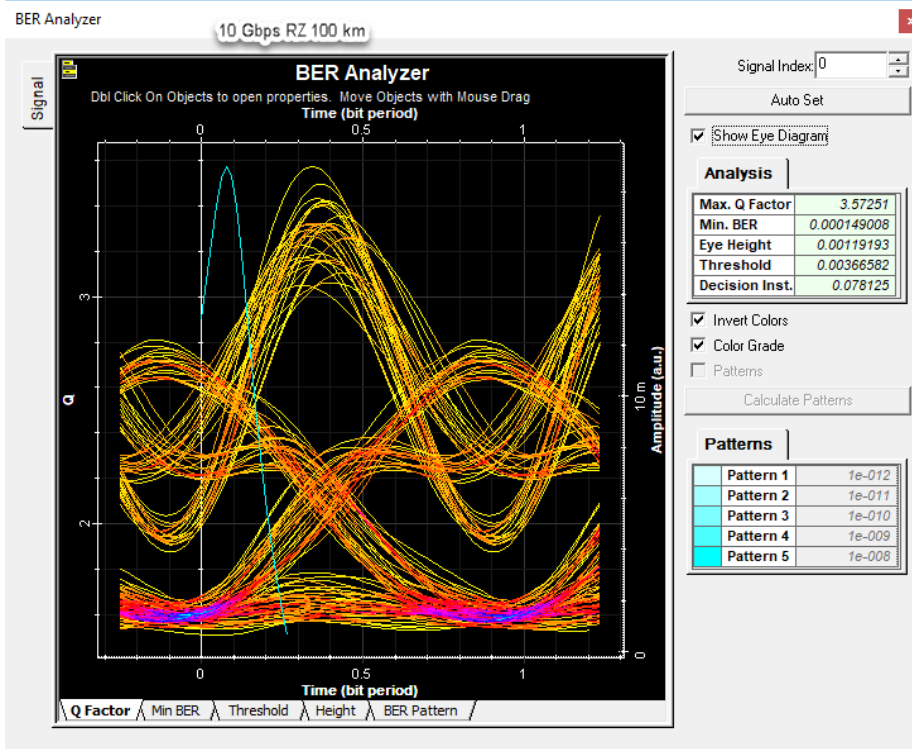
38. 10 Gbps RZ 80 km



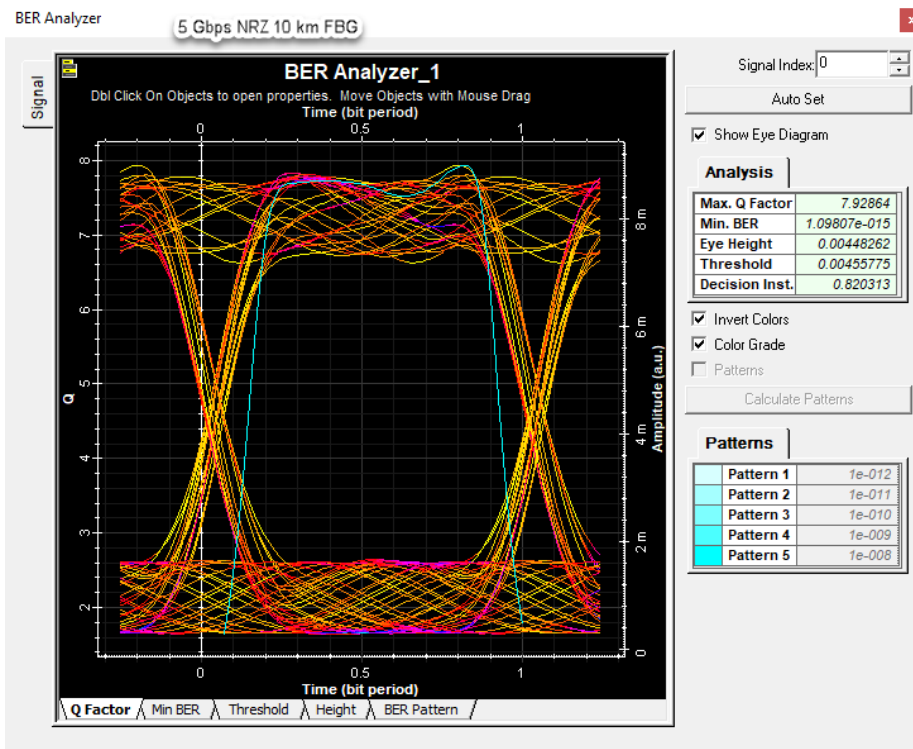
39. 10 Gbps RZ 90 km



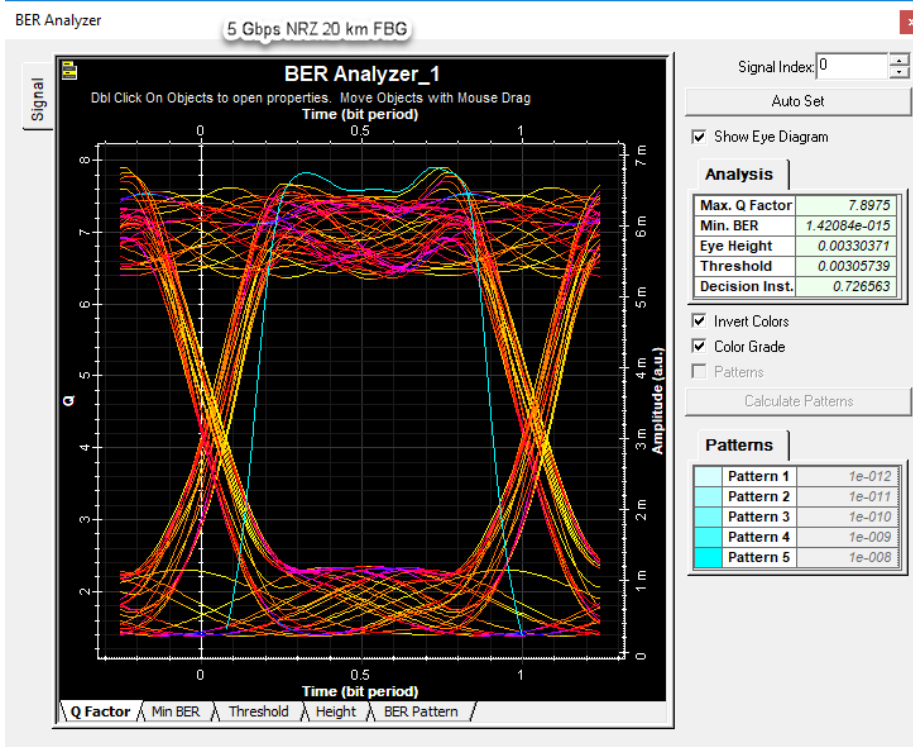
40. 10 Gbps RZ 100 km



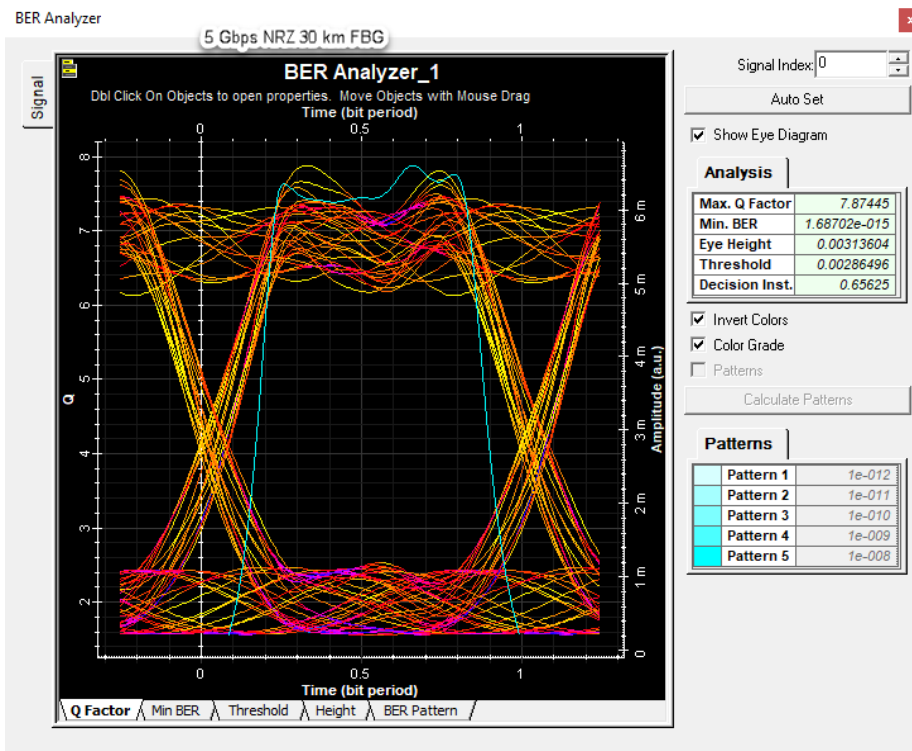
41. 5 Gbps NRZ 10 km FBG



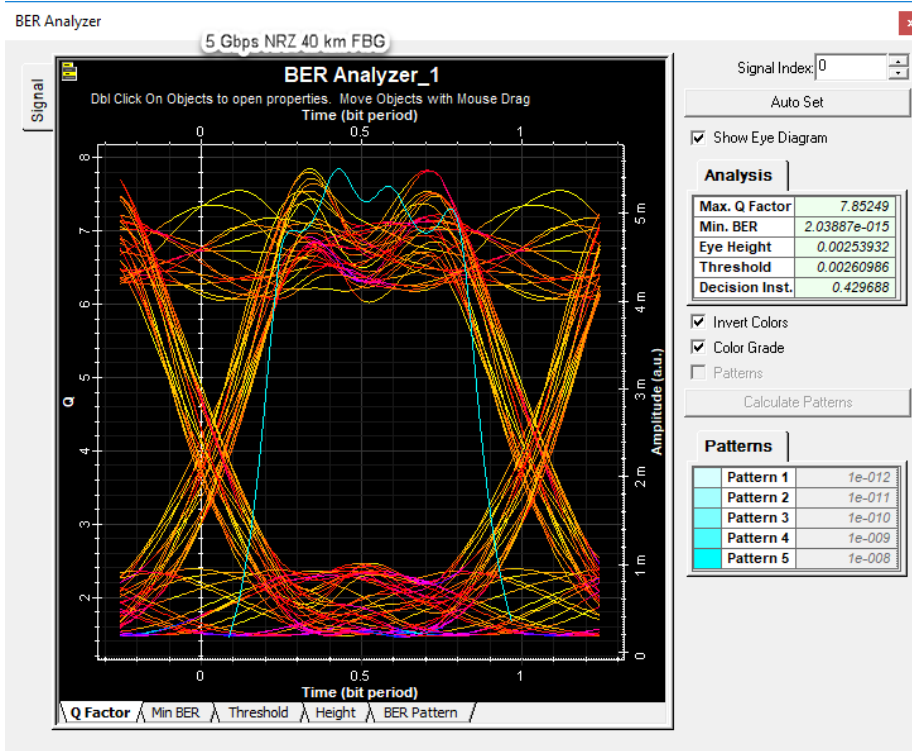
42. 5 Gbps NRZ 20 km FBG



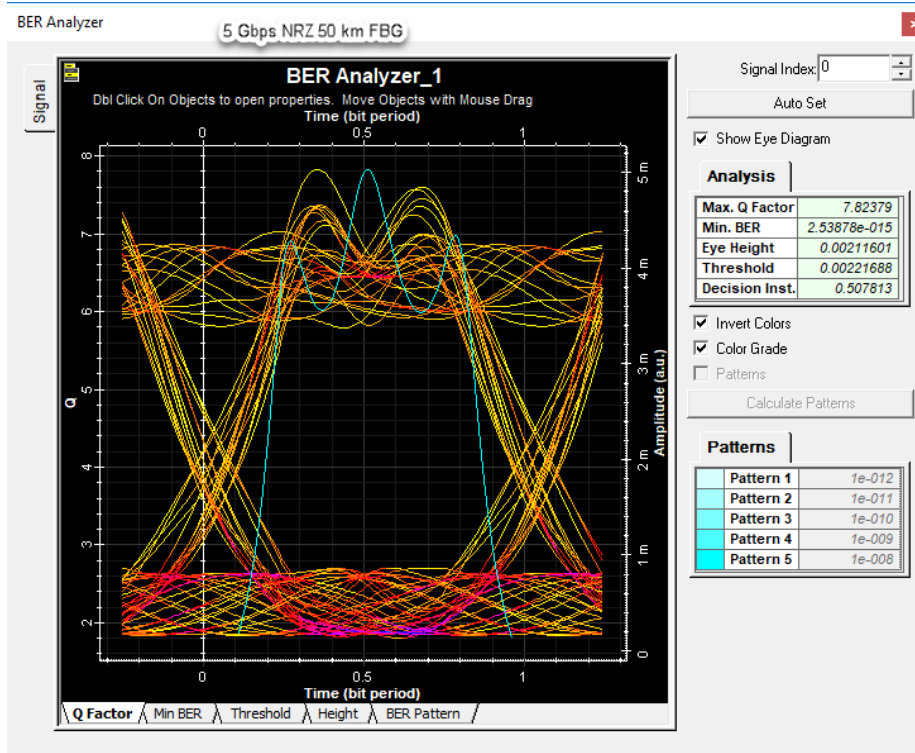
43. 5 Gbps NRZ 30 km FBG



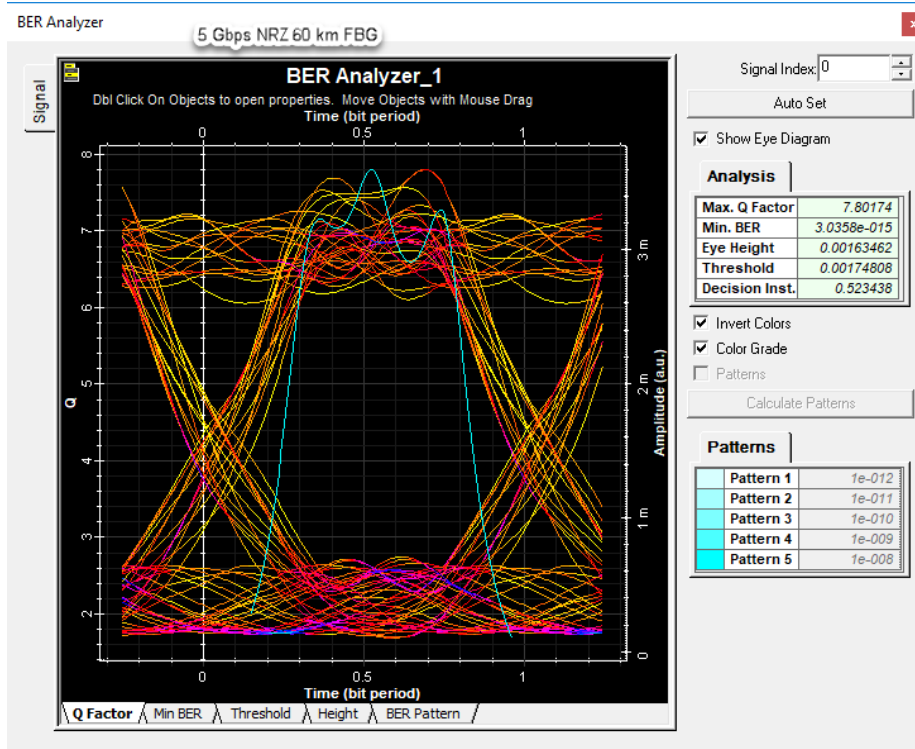
44. 5 Gbps NRZ 10 km FBG



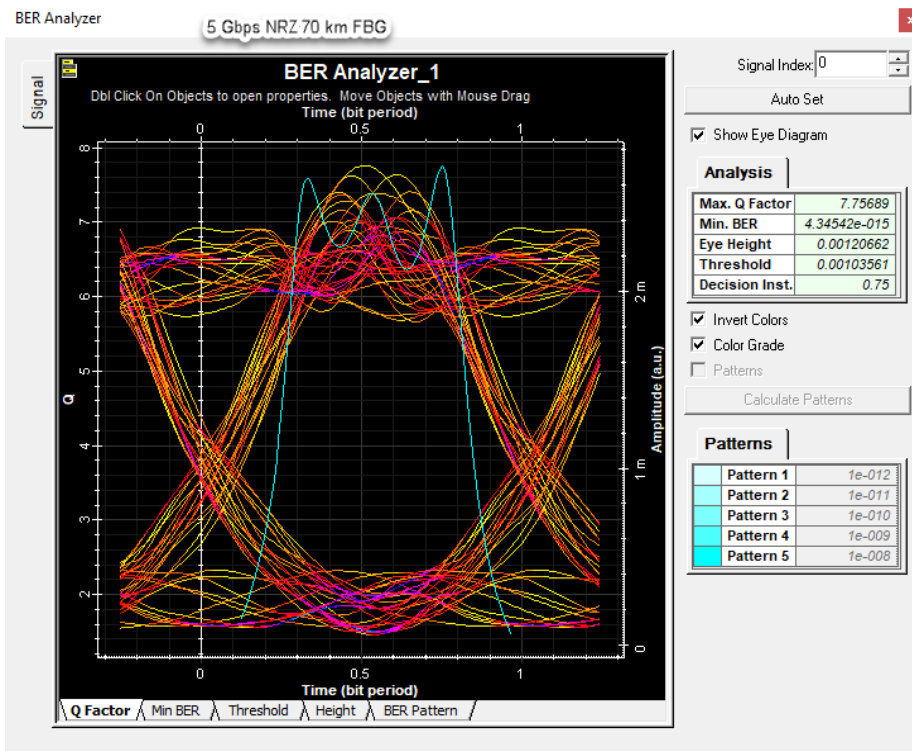
45. 5 Gbps NRZ 50 km FBG



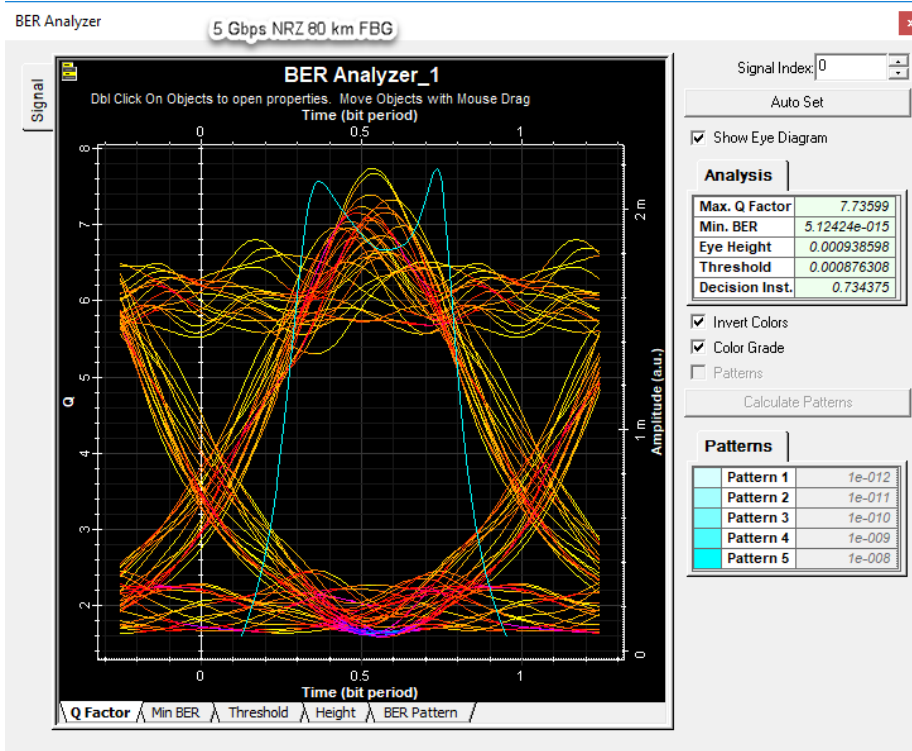
46. 5 Gbps NRZ 60 km FBG



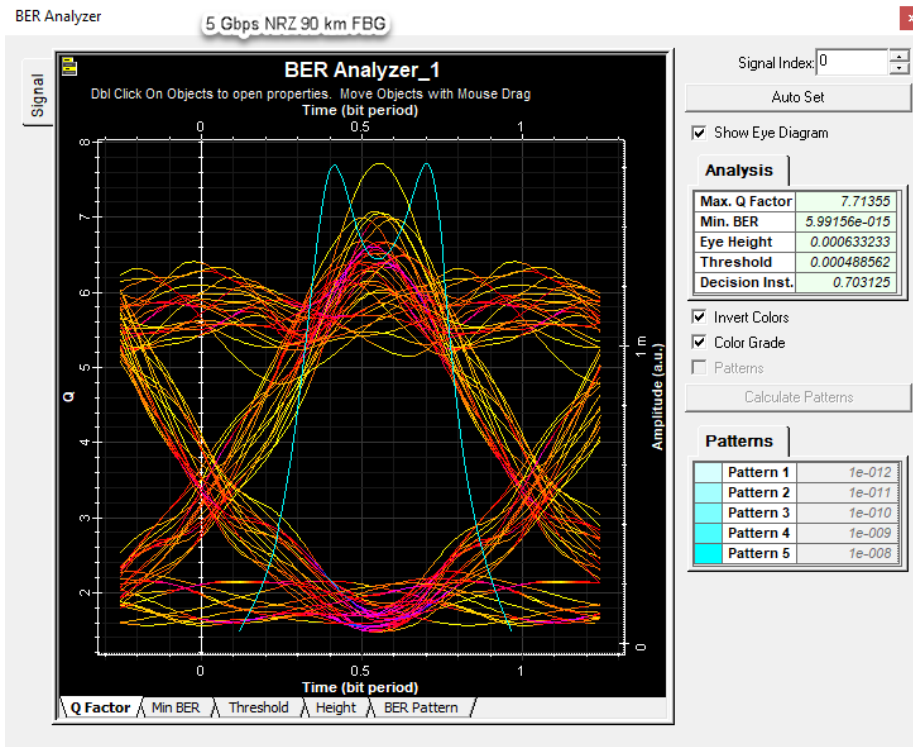
47. 5 Gbps NRZ 70 km FBG



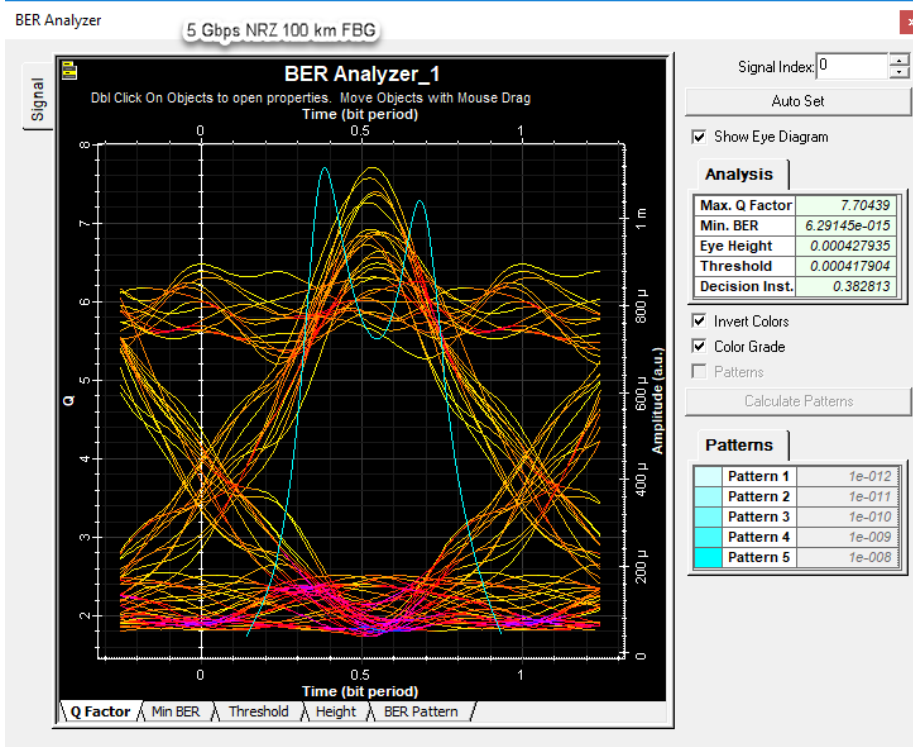
48. 5 Gbps NRZ 80 km FBG



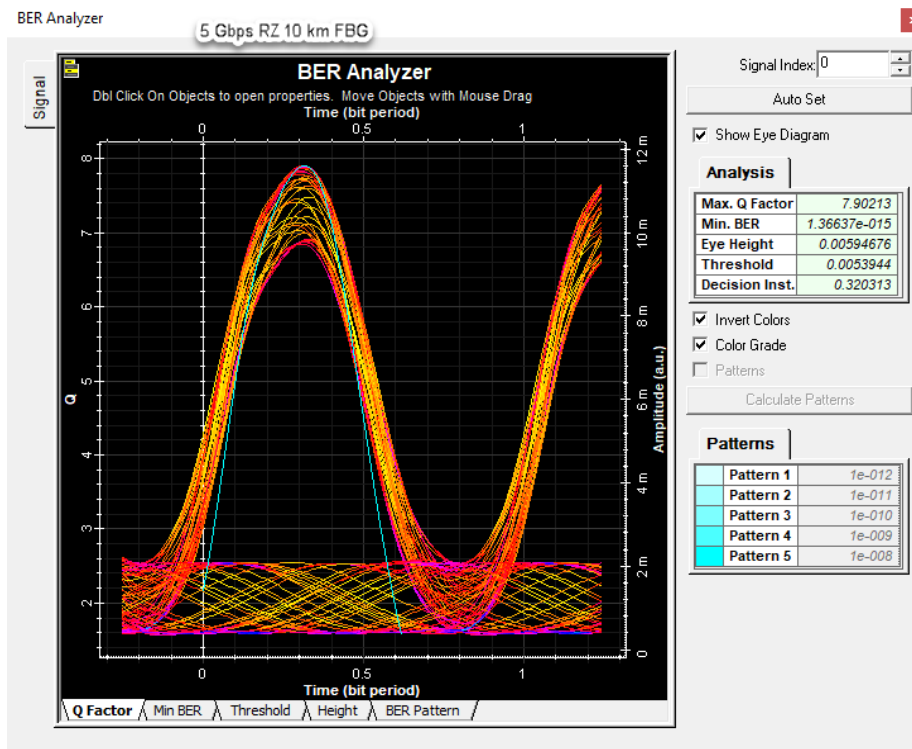
49. 5 Gbps NRZ 90 km FBG



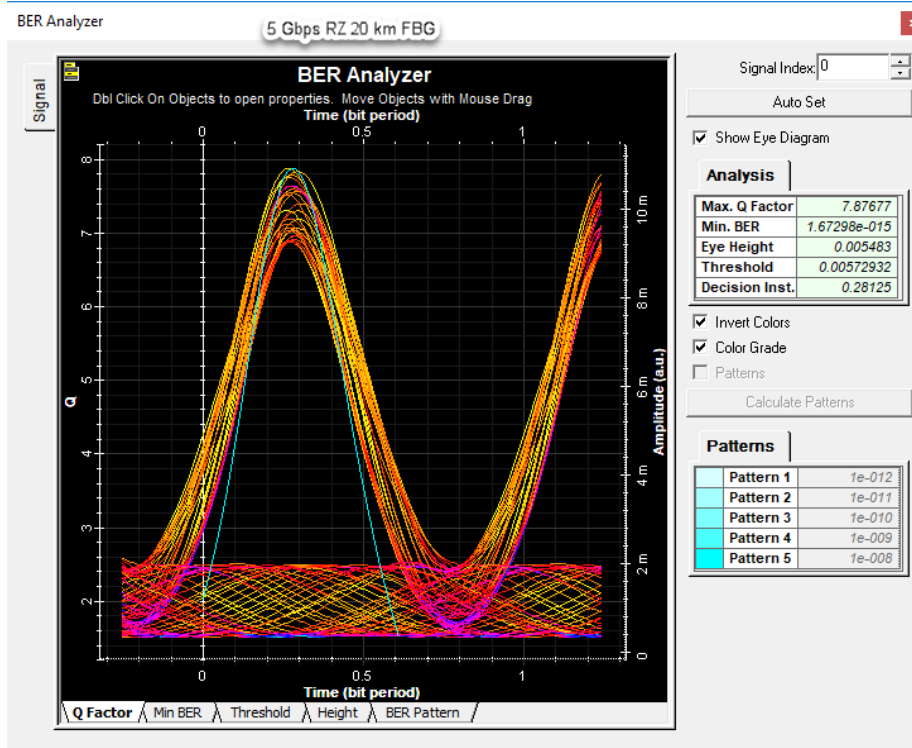
50. 5 Gbps NRZ 100 km FBG



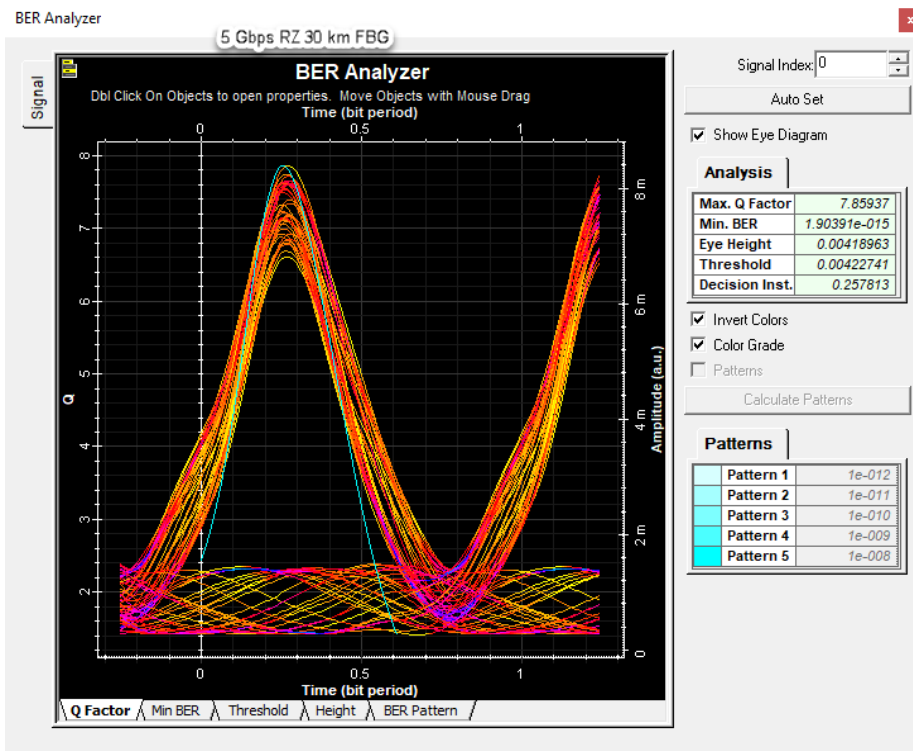
51. 5 Gbps RZ 10 km FBG



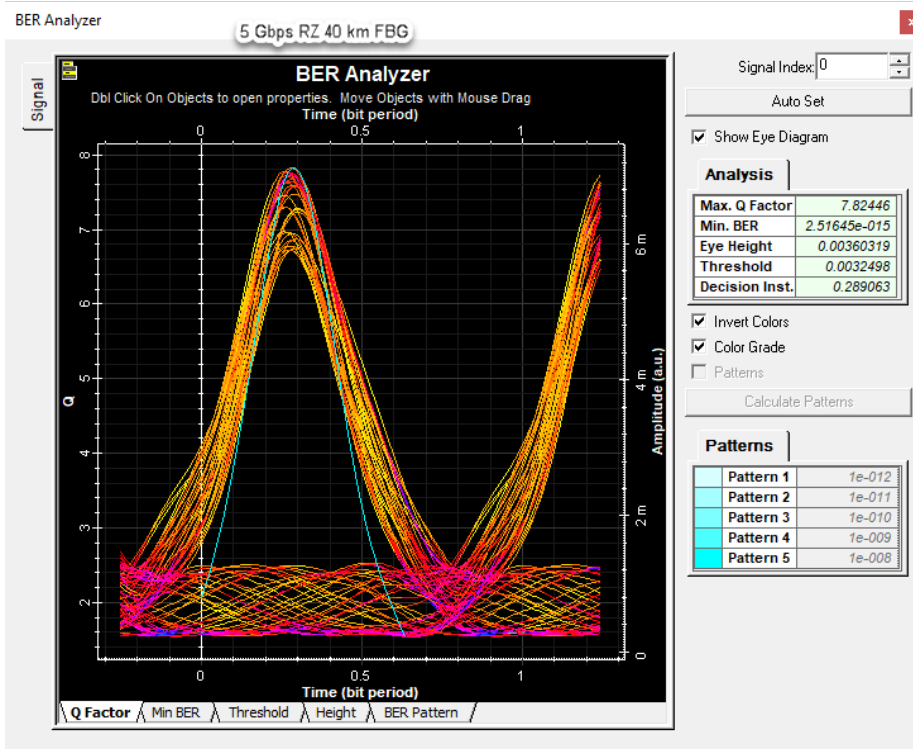
52. 5 Gbps RZ 20 km FBG



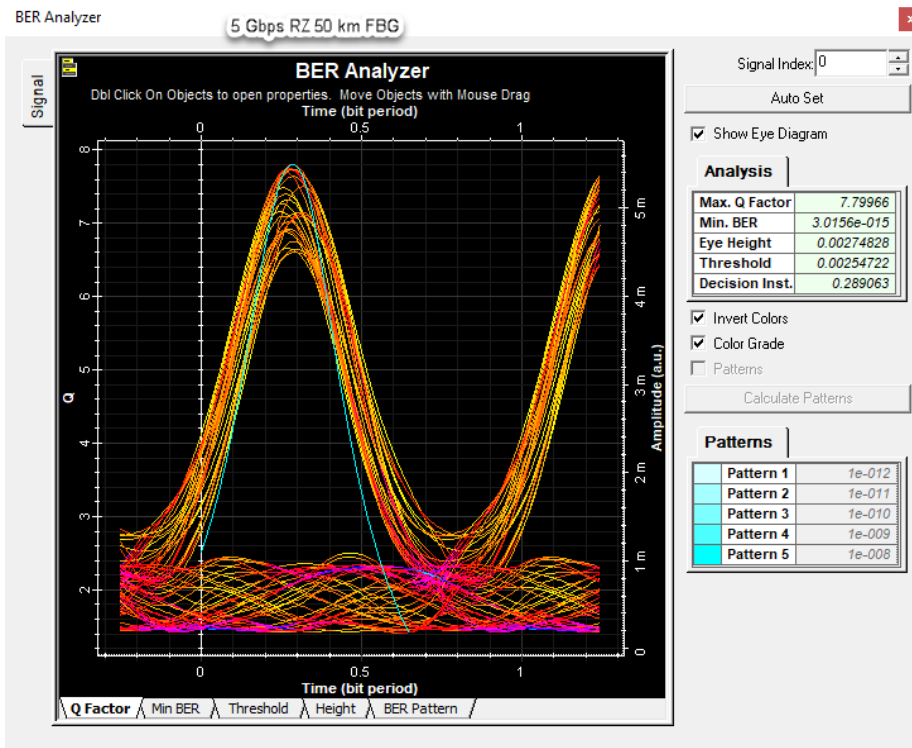
53. 5 Gbps RZ 30 km FBG



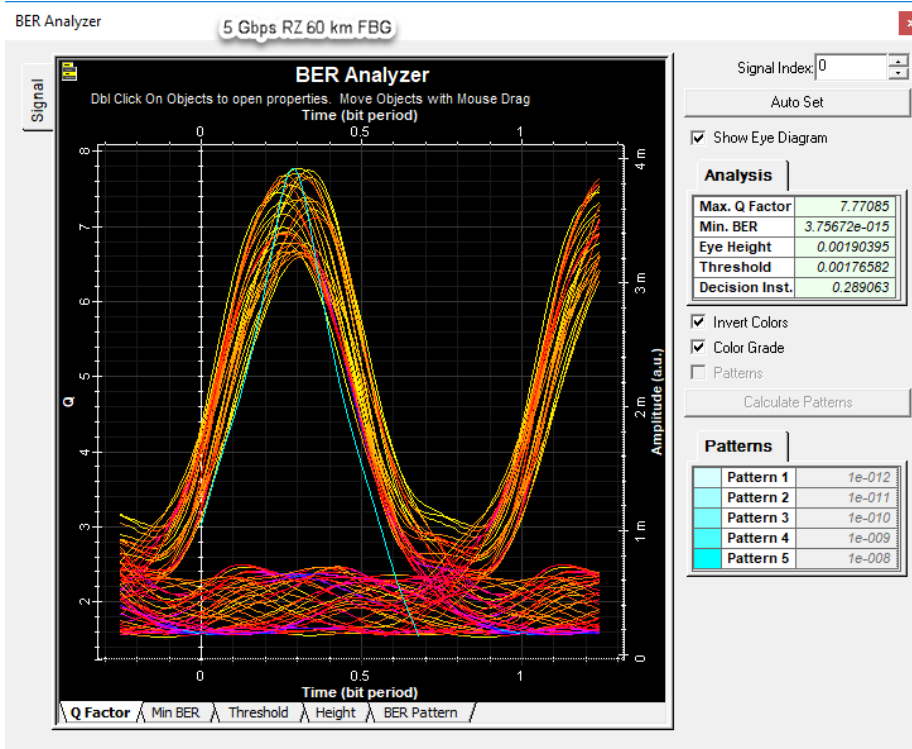
54. 5 Gbps RZ 40 km FBG



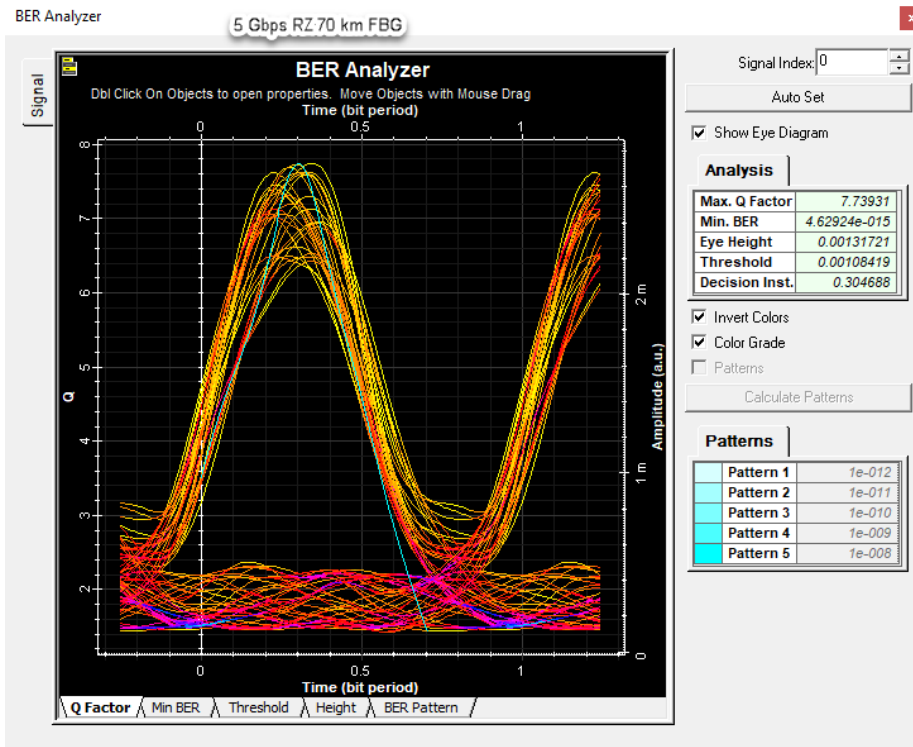
55. 5 Gbps RZ 50 km FBG



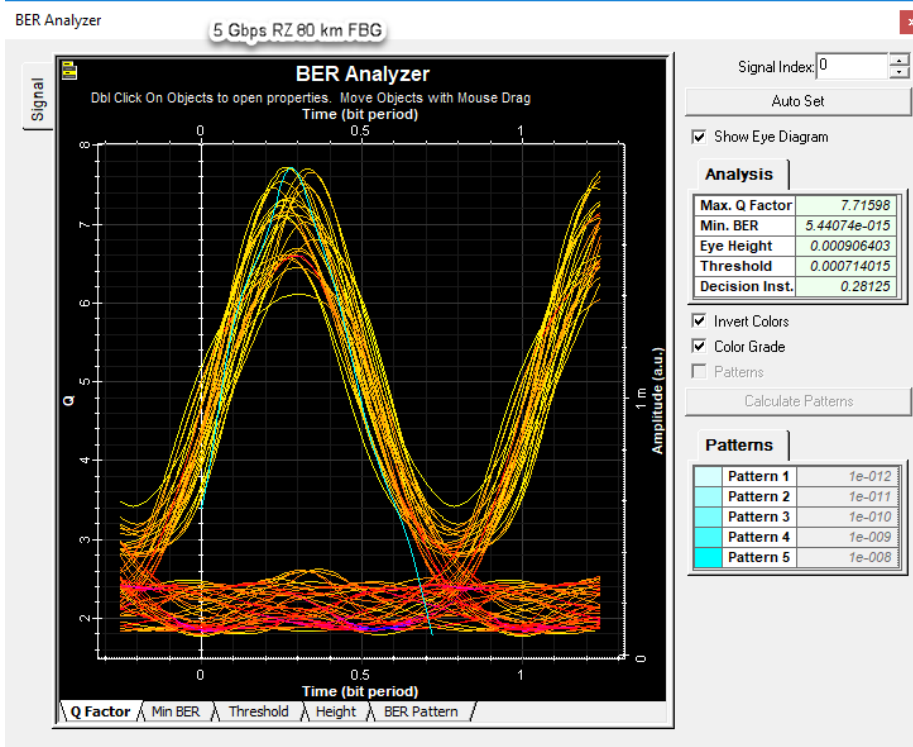
56. 5 Gbps RZ 60 km FBG



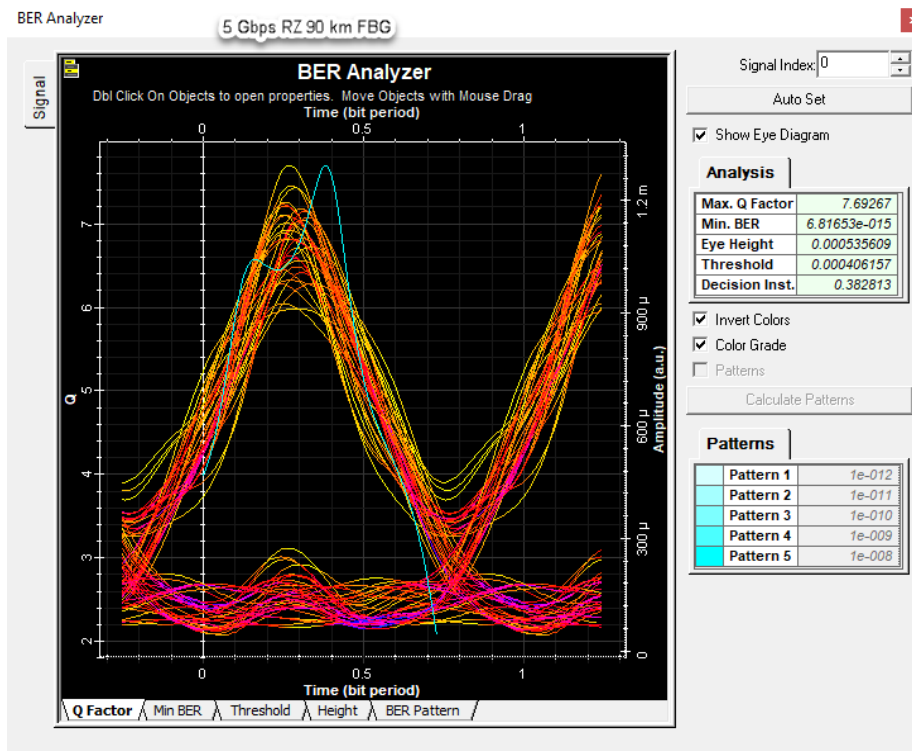
57. 5 Gbps RZ 70 km FBG



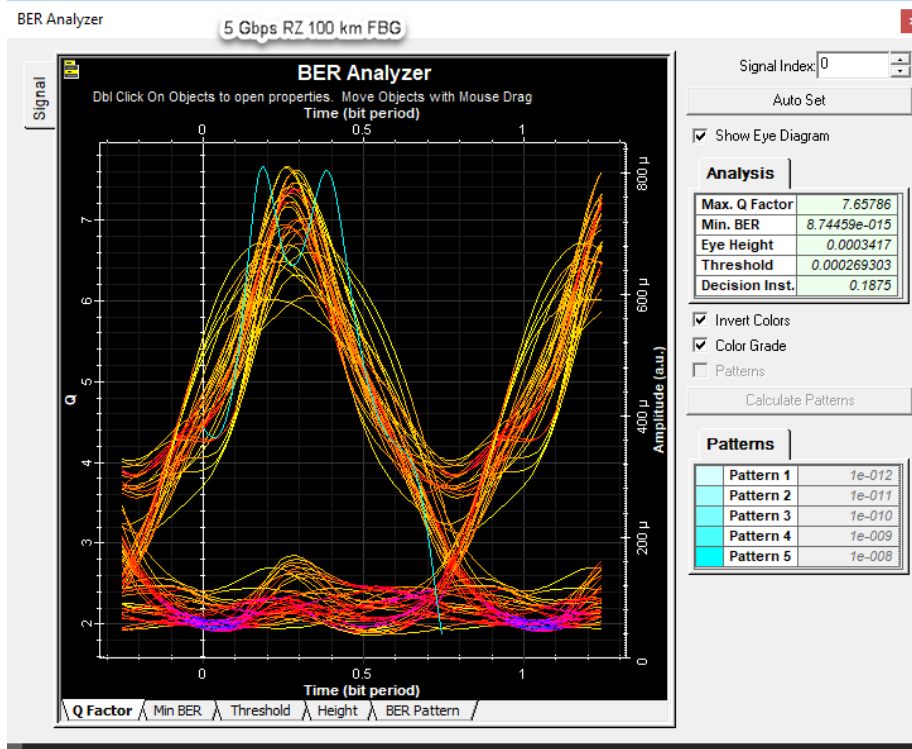
58. 5 Gbps RZ 80 km FBG



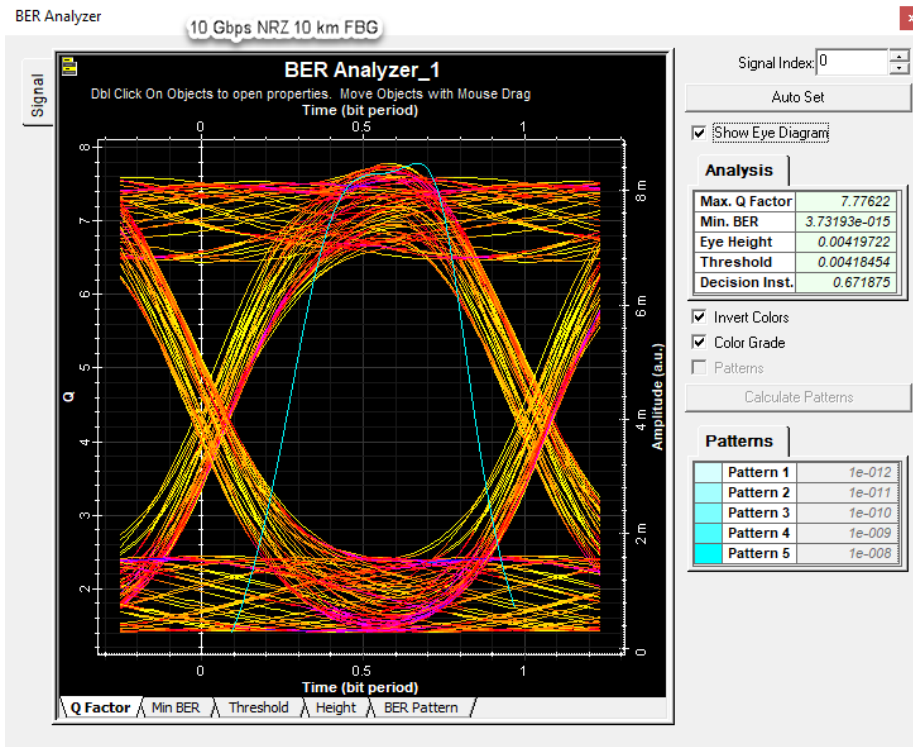
59. 5 Gbps RZ 90 km FBG



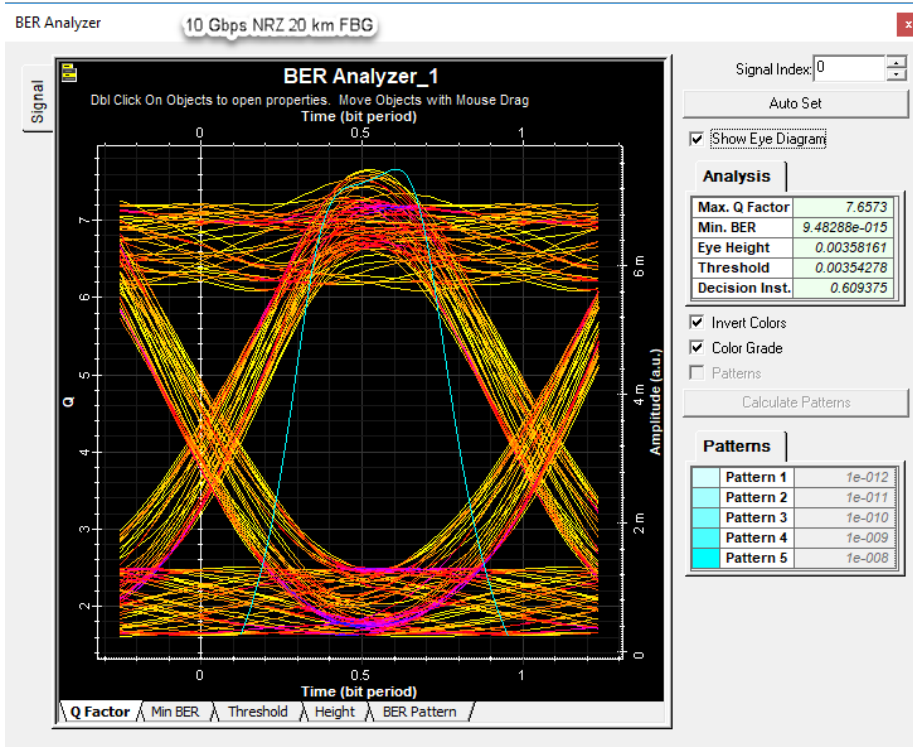
60. 5 Gbps RZ 100 km FBG



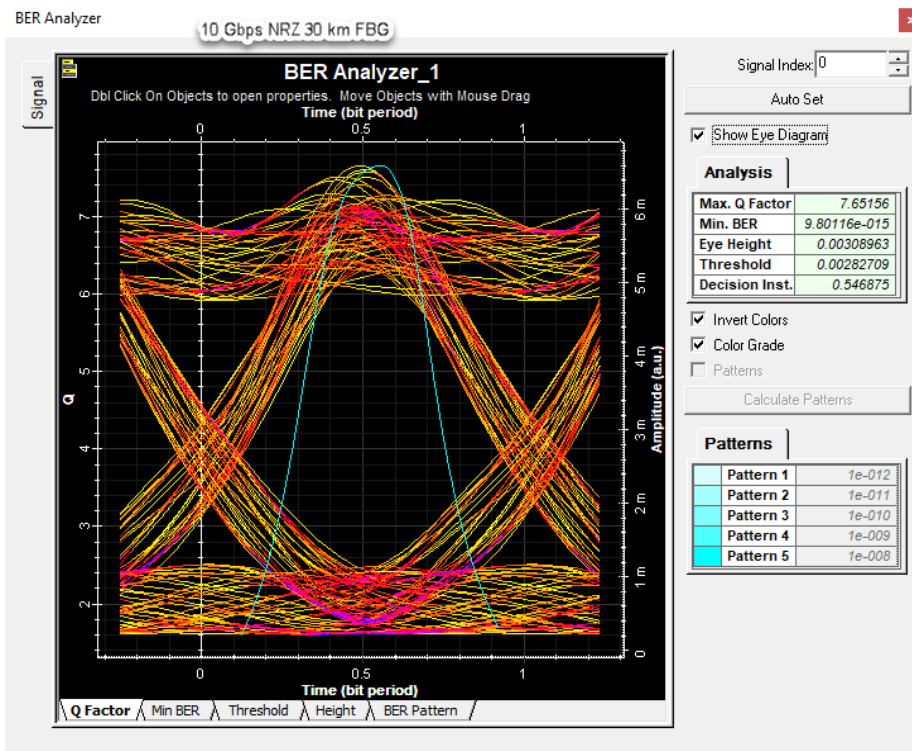
61. 10 Gbps NRZ 10 km FBG



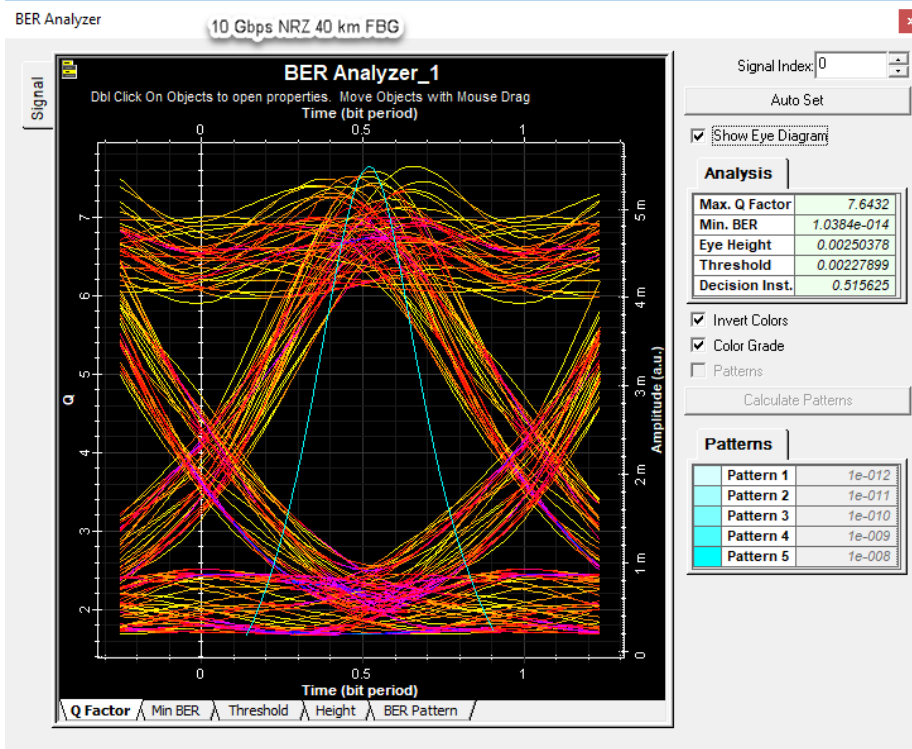
62. 10 Gbps NRZ 20 km FBG



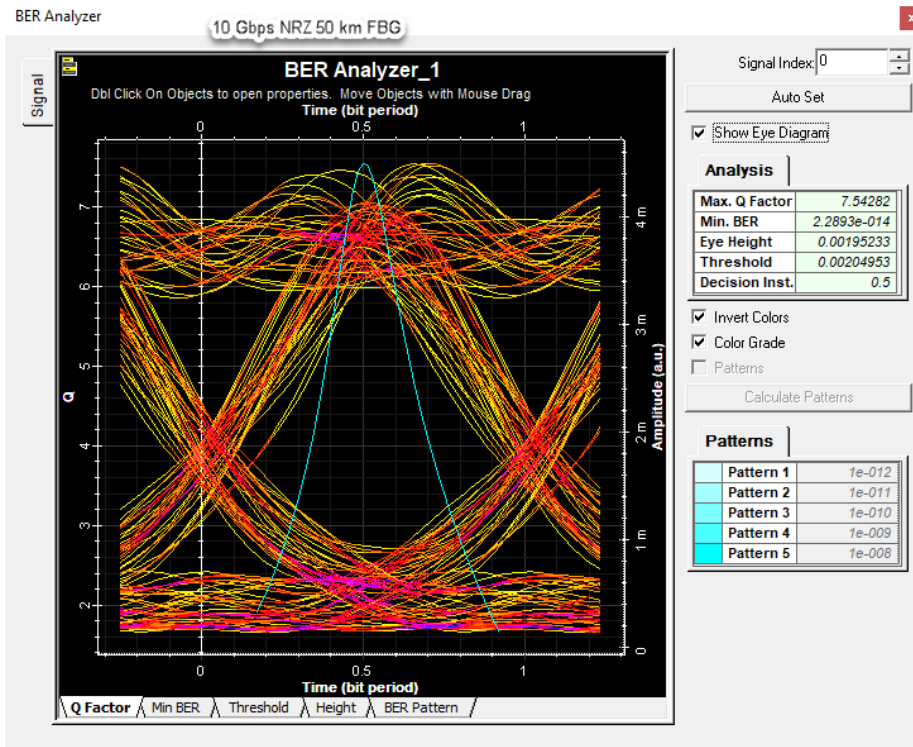
63. 10 Gbps NRZ 30 km FBG



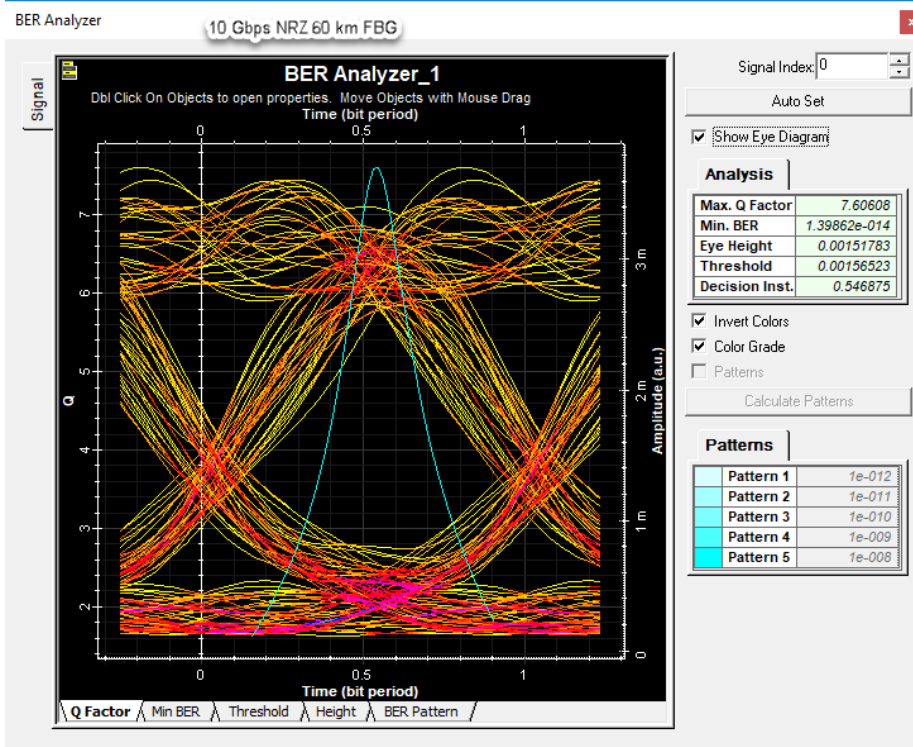
64. 10 Gbps NRZ 40 km FBG



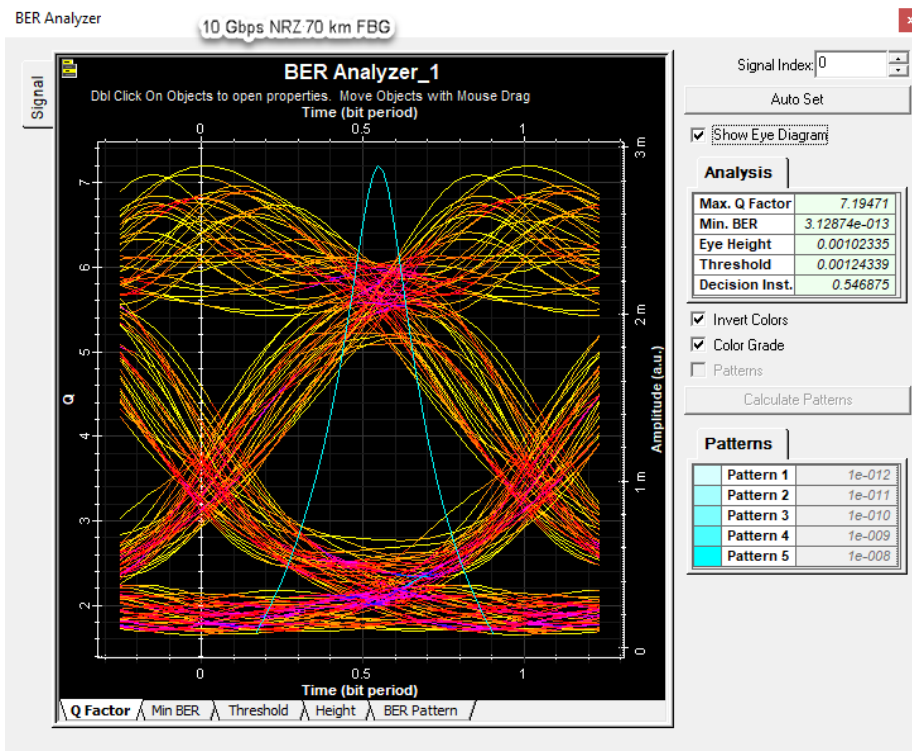
65. 10 Gbps NRZ 50 km FBG



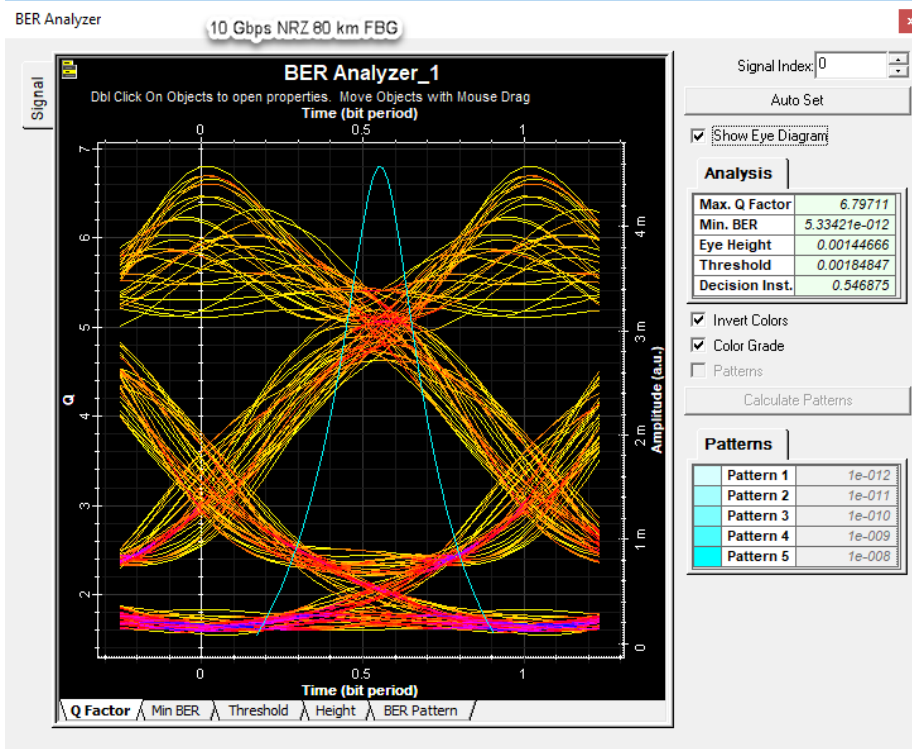
66. 10 Gbps NRZ 60 km FBG



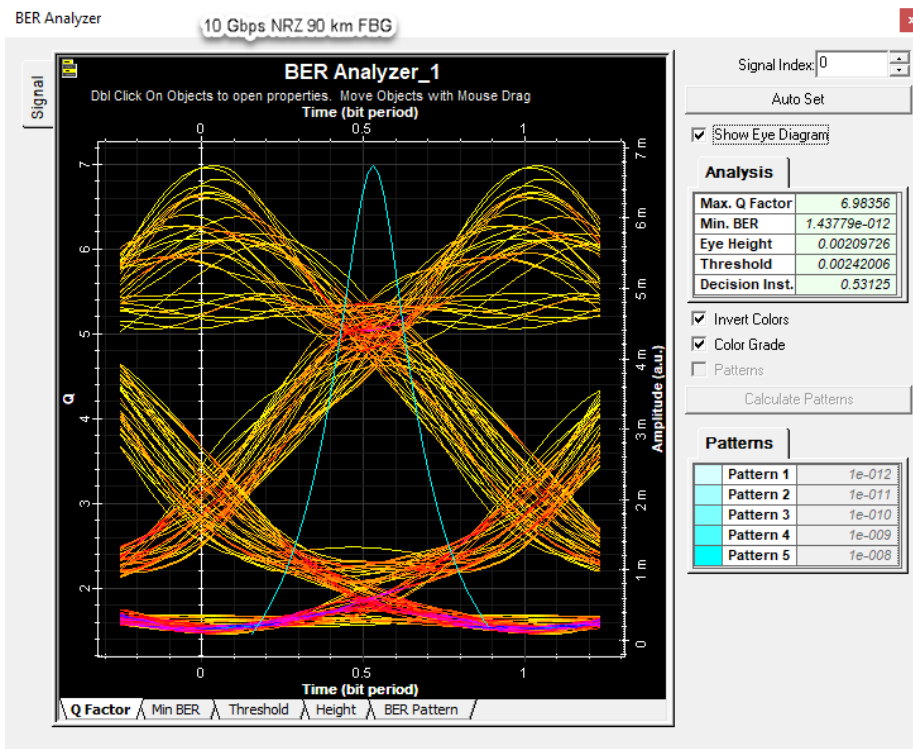
67. 10 Gbps NRZ 70 km FBG



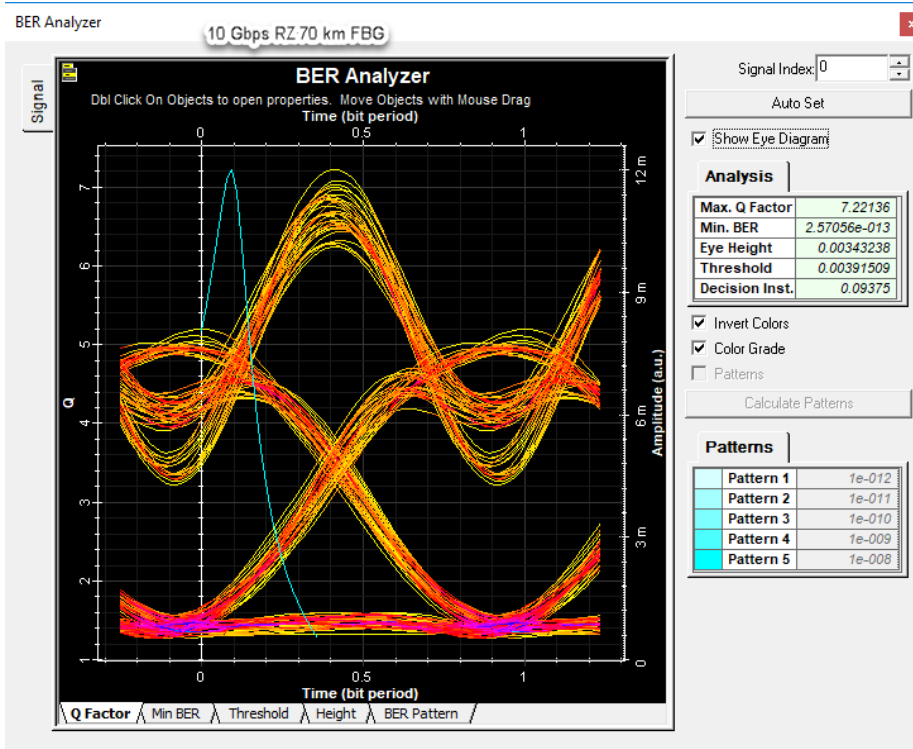
68. 10 Gbps NRZ 80 km FBG



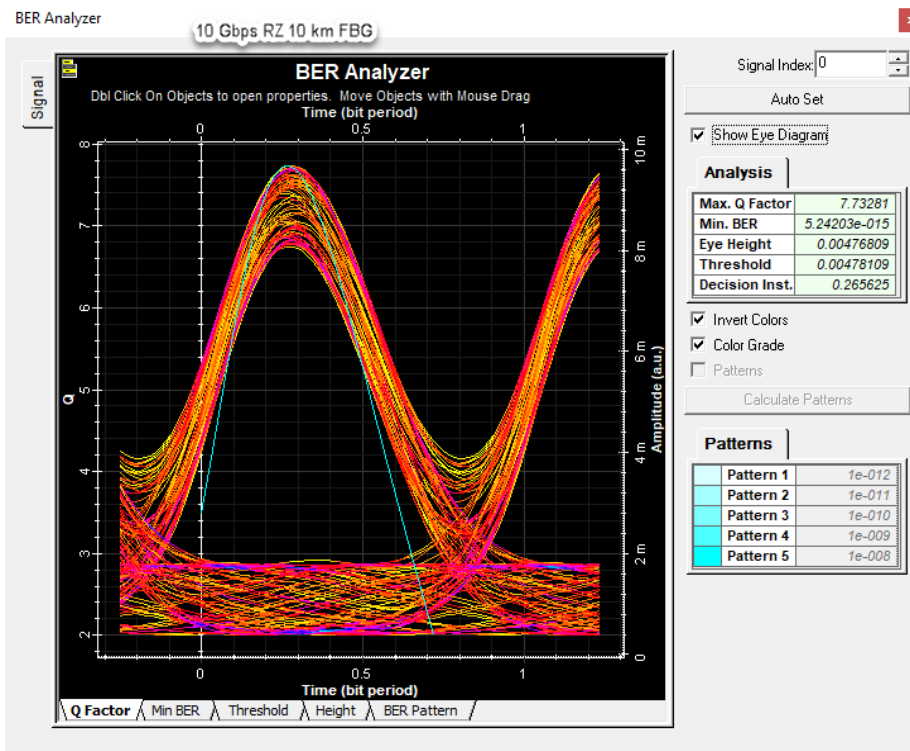
69. 10 Gbps NRZ 90 km FBG



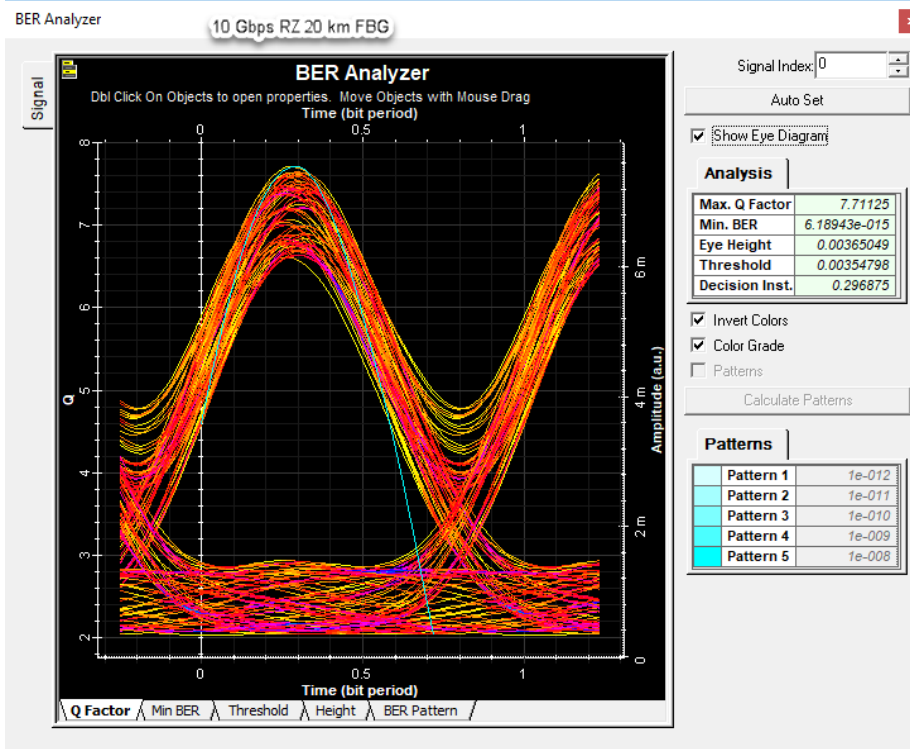
70. 10 Gbps NRZ 100 km FBG



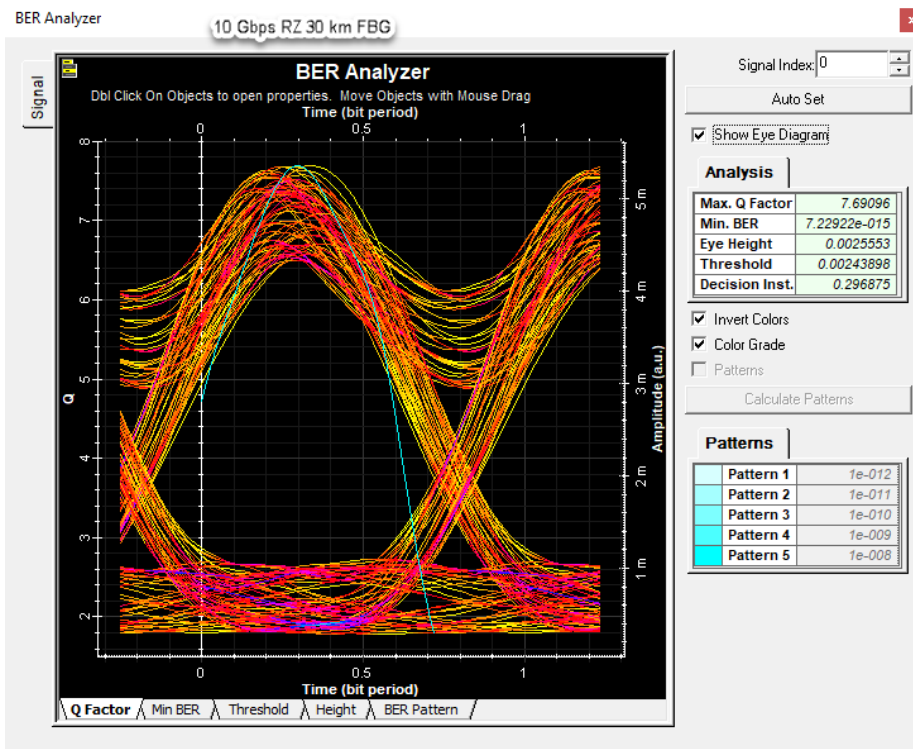
71. 10 Gbps RZ 10 km FBG



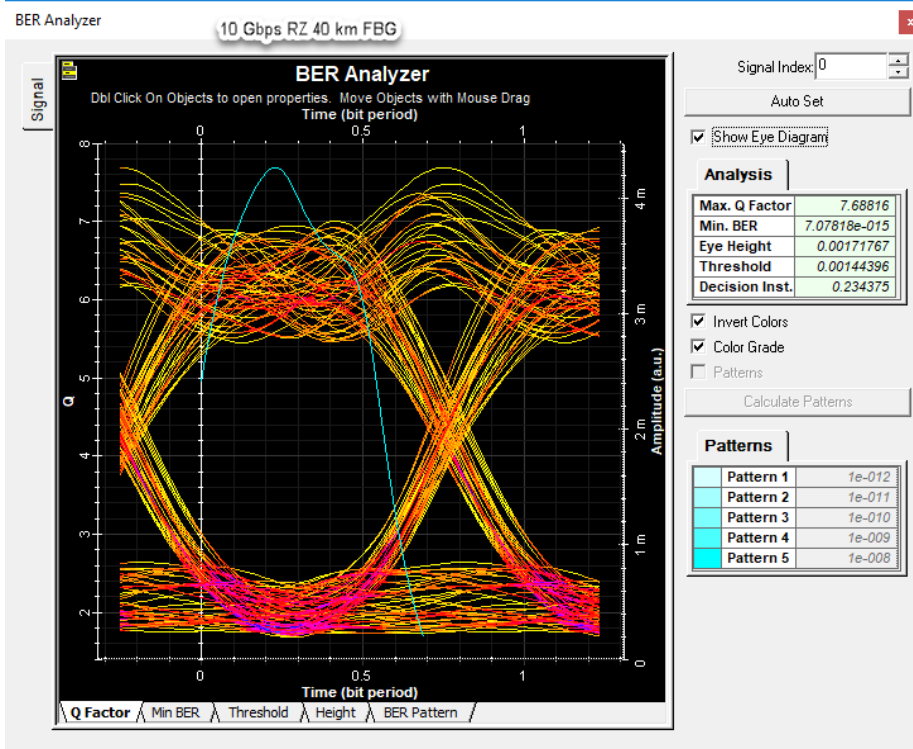
72. 10 Gbps RZ 20 km FBG



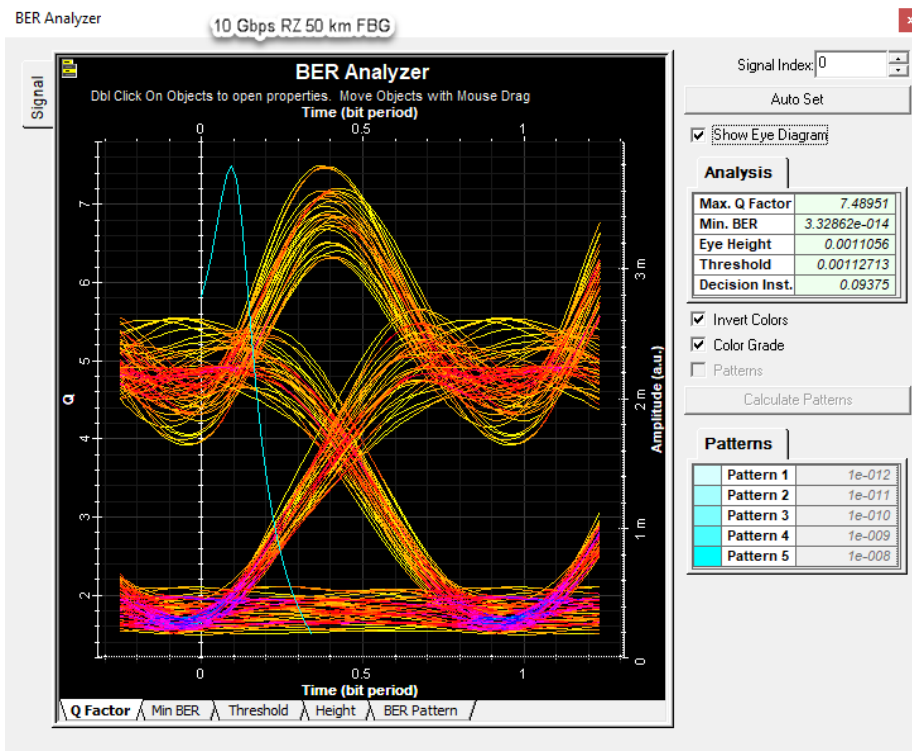
73. 10 Gbps RZ 30 km FBG



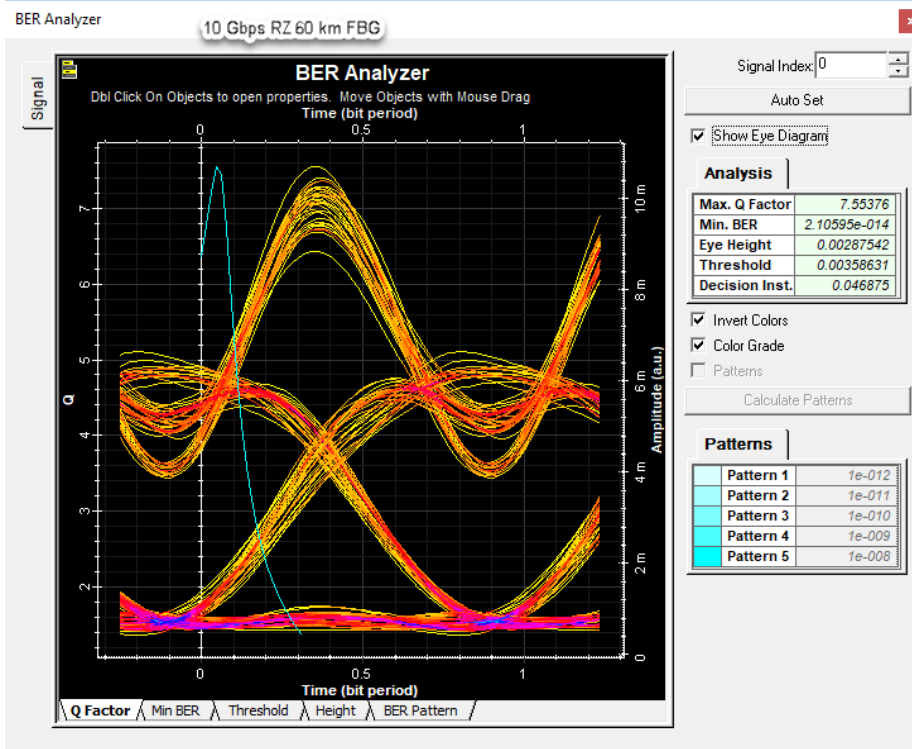
74. 10 Gbps RZ 40 km FBG



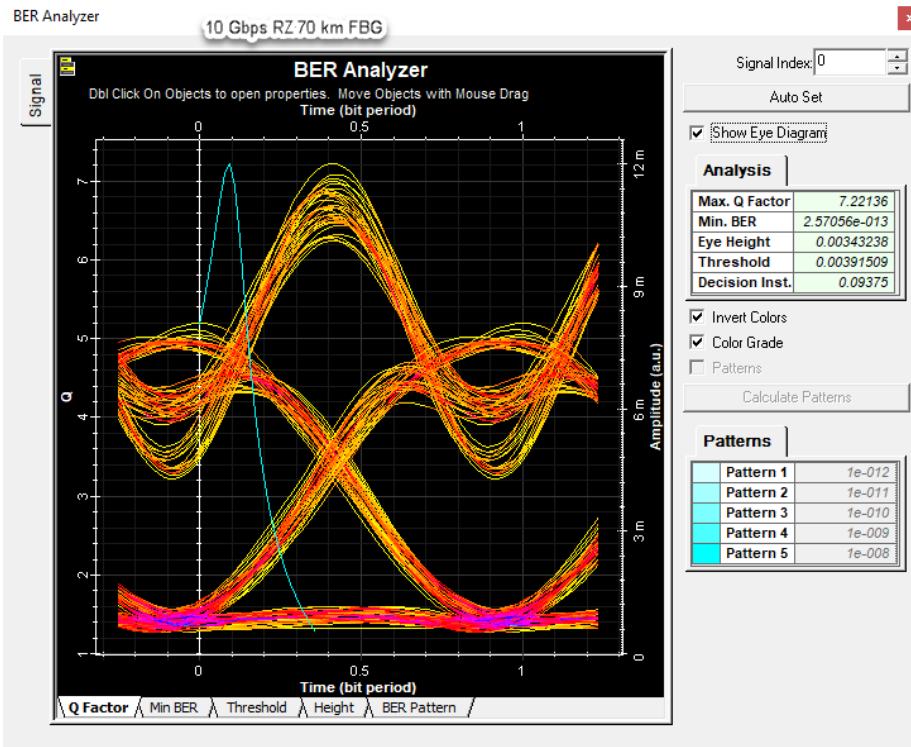
75. 10 Gbps RZ 50 km FBG



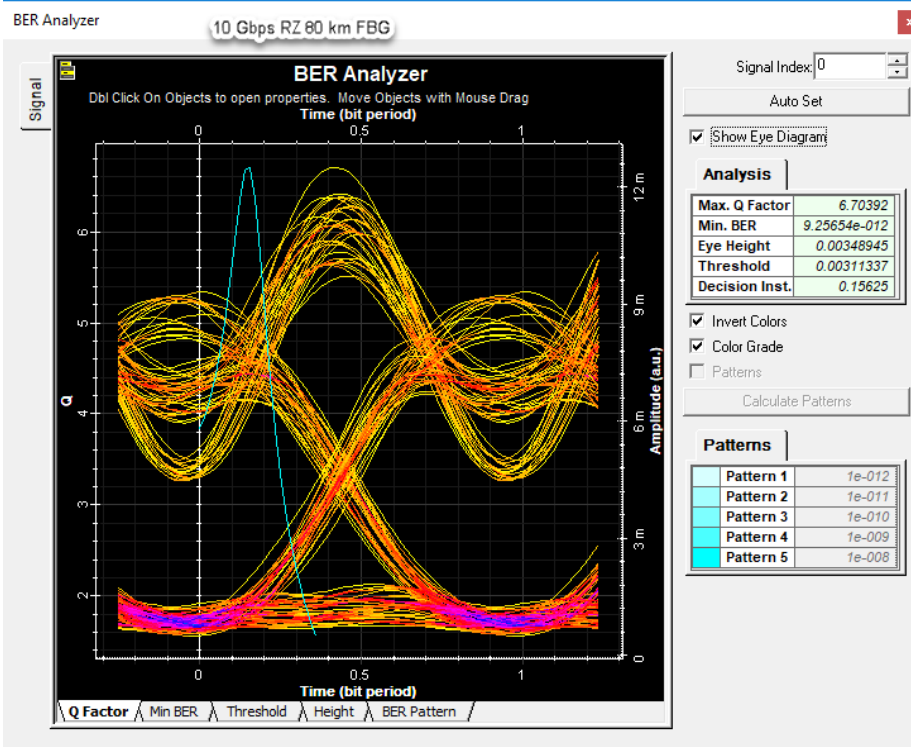
76. 10 Gbps RZ 60 km FBG



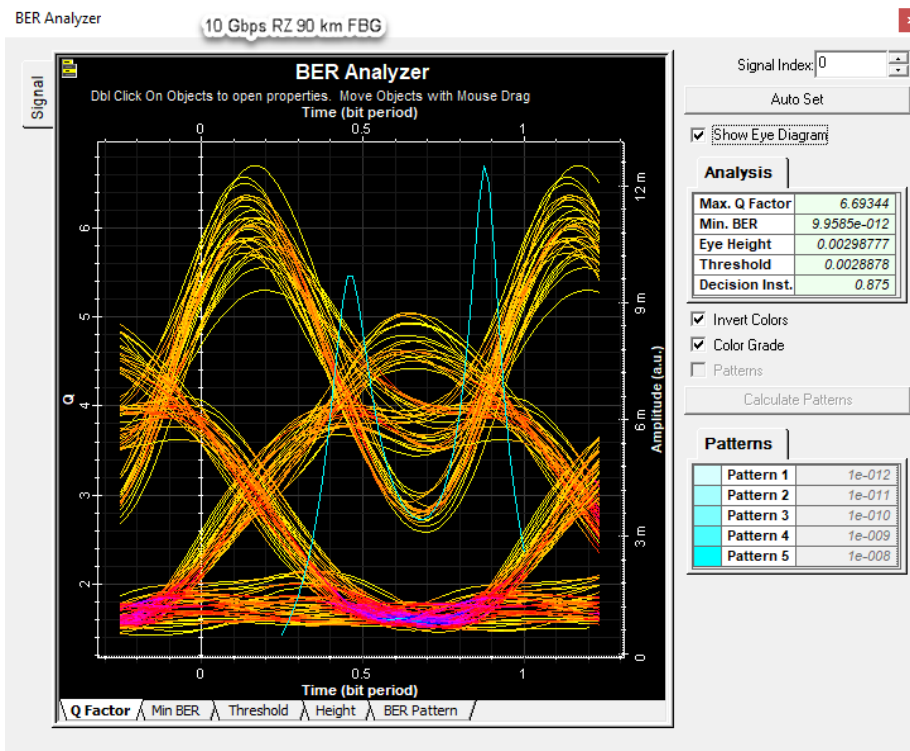
77. 10 Gbps RZ 70 km FBG



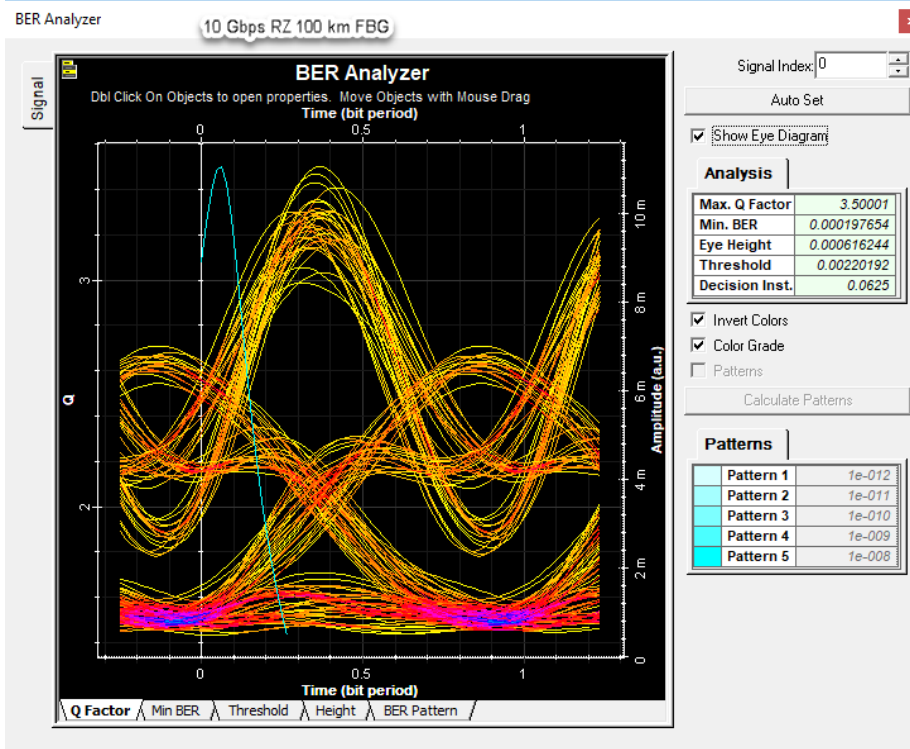
78. 10 Gbps RZ 80 km FBG



79. 10 Gbps RZ 90 km FBG



80. 10 Gbps RZ 100 km FBG



Lampiran 2 DataSheet

1. bit rate

SONET/SDH Signal Hierarchy				
Synchronous Transport Signal Level $n = STS-n = n \times 51.84$ Mbps				
STM=Synchronous Transport Module, OC=Optical Carrier level				
ANSI Designation	Optical Signal	CCITT Designation	Data Rate (Mbps)	Payload Rate (Mbps)
STS-1	OC-1		51.84	50.112
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376
STS-96	OC-96	STM-32	4976.64	4810.176
STS-192	OC-192	STM-64	9953.28	9620.928

The Ohio State University Raj Jain

2. Wavelength

Figure 8-17 Wavelength-division multiplexing

Table 8-3 ITU GRID

Center Wavelength – nm (vacuum)	Optical Frequency (THz)		
		1546.92	193.8
		1547.72	193.7
1530.33	195.9	1548.51	193.6
1531.12	195.8	1549.32	193.5
1531.90	195.7	1550.12	193.4
1532.68	195.6	1550.92	193.3
1533.47	195.5	1551.72	193.2
1534.25	195.4	1552.52	193.1
1535.04	195.3	1553.33	193.0
1535.82	195.2	1554.13	192.9
1536.61	195.1	1554.93	192.8
1537.40	195.0	1555.75	192.7
1538.19	194.9	1556.55	192.6
1538.98	194.8	1557.36	192.5
1539.77	194.7	1558.17	192.4
1540.56	194.6	1558.98	192.3
1541.35	194.5	1559.79	192.2
1542.14	194.4	1560.61	192.1
1542.94	194.3	1561.42	192.0
1543.73	194.2	1562.23	191.9
1544.53	194.1	1563.05	191.8
1545.32	194.0	1563.86	191.7
1546.12	193.9		

3. Photodetector APD

FIBER OPTIC TELECOMMUNICATION

The most commonly used photodetectors are the PIN and avalanche photodiodes (APD). The material composition of the device determines the wavelength sensitivity. In general, silicon devices are used for detection in the visible portion of the spectrum; InGaAs crystal are used in the near-infrared portion of the spectrum between 1000 nm and 1700 nm, and germanium PIN and APDs are used between 800 nm and 1500 nm. Table 8-5 gives some typical photodetector characteristics:

Table 8-5 Typical Photodetector Characteristics

Photodetector	Wavelength (nm)	Responsivity (A/W)	Dark Current (nA)	Rise Time (ns)
Silicon PIN	550–850	0.4–0.7	1–5	5–10
Silicon PIN	850–950	0.6–0.8	10	0.070
InGaAs PIN	1310–1550	0.85	0.5–1.0	0.005–6
InGaAs APD	1310–1550	0.80	30	0.100
Germanium	1000–1500	0.70	1000	12

Some of the more important detector parameters listed below are defined and described in Module 1-6, *Optical Detectors and Human Vision*.

Responsivity—the ratio of the electrical power to the detector's output optical power

Quantum efficiency—the ratio of the number of electrons generated by the detector to the number of photons incident on the detector

$$\text{Quantum efficiency} = (\text{Number of electrons}) / \text{Photon}$$

Dark current—the amount of current generated by the detector with no light applied. Dark current increases about 10% for each temperature increase of 1°C and is much more prominent in Ge and InGaAs at longer wavelengths than in silicon at shorter wavelengths.

Noise floor—minimum detectable power that a detector can handle. The noise floor is related to the dark current since the dark current will set the lower limit.

$$\text{Noise floor} = \text{Noise (A)} / \text{Responsivity (A/W)}$$

Response time—the time required for the detector to respond to an optical input. The response time is related to the bandwidth of the detector by

$$\text{BW} = 0.35/t_r$$

where t_r is the rise time of the device. The rise time is the time required for the detector to rise to a value equal to 63.2% of its final steady-state reading.

Noise equivalent power (NEP)—at a given modulation frequency, wavelength, and noise bandwidth, the incident radiant power that produces a signal-to-noise ratio of one at the output of the detector (Source: Electronic Industry Association—ELA)

4. RF Frequency

Frequency bands

The radio spectrum of frequencies is divided into bands with conventional names designated by the International Telecommunications Union (ITU):

Frequency	Wavelength	Designation	Abbreviation ^[6]	IEEE bands ^[7]
3–30 Hz	10 ⁵ –10 ⁴ km	Extremely low frequency	ELF	-
30–300 Hz	10 ⁴ –10 ³ km	Super low frequency	SLF	-
300–3000 Hz	10 ³ –100 km	Ultra low frequency	ULF	-
3–30 kHz	100–10 km	Very low frequency	VLF	-
30–300 kHz	10–1 km	Low frequency	LF	-
300 kHz – 3 MHz	1 km – 100 m	Medium frequency	MF	-
3–30 MHz	100–10 m	High frequency	HF	HF
30–300 MHz	10–1 m	Very high frequency	VHF	VHF
300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	Ultra high frequency	UHF	UHF, L, S
3–30 GHz	10–1 cm	Super high frequency	SHF	S, C, X, Ku, K, Ka
30–300 GHz	1 cm – 1 mm	Extremely high frequency	EHF	Ka, V, W, mm
300 GHz – 3 THz	1 mm – 0.1 mm	Tremendously high frequency	THF	-

Frequencies of 1 GHz and above are conventionally called microwave,^[8] while frequencies of 300 GHz and above are designated millimeter wave. More detailed band designations are given by the standard IEEE letter- band frequency designations^[7] and the EU/NATO frequency designations.^[9]

5. Power Laser

Performance Specifications: Typical Product Configurations (more options available)

PD-LD Part No. ¹	Wavelength (nm)			Min. Fiber Coupled Power (mW)	Threshold Current (mA)		Operating Current (mA)		Monitor PD Current (mA)	
	Min.	Typ.	Max.		Typ.	Max.	Typ.	Max.	Min.	Typ.
Continuous Wavelength InGaAsP Lasers @ 25C										
PL13U001100B-R-I-01	1290	1310	1330	1 mW	6	20	18	40	InGaAs 0.1	0.8
PL13N0.51FAA-0-I-01	1290	1310	1330	0.5mW FC/APC	6	20	18	40	InGaAs 0.1	0.8
PL13U0011SAA-0-I-01	1295	1310	1325	1 mW SC/APC	6	20	18	40	InGaAs 0.1	0.8
PL15M0011FAA-0-I-01	1530	1550	1570	1mW FC/APC	10	30	30	60	InGaAs 0.1	-
PL15N0.51FAC-R-I-01	1530	1550	1570	0.5 mW FC/APC	10	30	30	60	InGaAs 0.1	0.8
Parameter	Condition		Min	Typ	Max	Unit				
Optical Isolation	Temp.= +25°C		30	45	—	dB				
	Temp.= -40~+85°C		20	—	—					

6. 5G Frequency

5G expected to use a wide range of frequency bands

The ability to use a range of frequency bands and access technologies to deliver the particular requirements of a specific use case or service, will be a key characteristic of 5G networks.⁵⁸ This is likely to require the use of frequency bands other than those currently dedicated to mobile broadband use, and the flexible use of unlicensed spectrum or sharing of underutilised spectrum to provide extra capacity when required.

5G networks are expected to require a wide range of frequencies both below and above 6 GHz, although the exact frequencies are yet to be identified. A number of industry groups, academics and governments around the world have begun to explore the possibility of using higher frequencies for mobile broadband communications.

The ACMA and Australian industry representatives recently attended the International Telecommunication Union (ITU) Radiocommunication Sector 2015 World Radiocommunication Conference (WRC-15). The WRC-15 made a number of decisions that will influence how the issue of additional spectrum for mobile broadband will be considered around the world, and in Australia.

⁵⁸ ACMA, *Beyond 2020—A spectrum management strategy to address the growth in mobile broadband capacity*, September 2015, pages 33–34.

⁵⁹ ACMA, *Beyond 2020—A spectrum management strategy to address the growth in mobile broadband capacity*, September 2015 and ACMA, *Five-year spectrum outlook 2015–19: The ACMA's spectrum demand analysis and strategic direction for the next five years*, August 2015, page 38.

⁶⁰ Huawei, *5G: A Technology Vision*, January 2014, page 6.

Under WRC-15 Agenda item 1.1 additional spectrum allocations for mobile services on a primary basis and additional identifications for International Mobile Telecommunications (IMT) were made in a number of bands. The main outcome of this agenda item was the significant international harmonisation of the frequency ranges 1 427–1 518 MHz and 3 400–3 600 MHz for IMT.