

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OPTİK MODÜLATÖRLERDE PERFORMANS ANALİZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Emine TARI

**FBE Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç.Dr. N. Özlem ÜNVERDİ (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. OPTİK DALGA KLAVUZLARINDA MODAL ANALİZ	4
2.1 Optik Dalga Klavuzlarının Özellikleri	4
2.2 Maddenin Elektriksel özellikleri	4
2.3 Maxwell Denklemleri ve Dalga Klavuzları için Temel Eşitlikler	5
2.4 Dielektrik-Dielektrik Sınır Koşulları	7
2.5 Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Optik Dalga Kılavuzu	7
2.6 TE Modları	9
2.6.1 Kılavuzlanmış Çift TE Modları	9
2.6.2 Kılavuzlanmış Tek TE Modları	10
2.6.3 TE Modları İçin Karakteristik Denklemler	12
2.7 TM Modları	13
2.7.1 Kılavuzlanmış Çift TM Modları	14
2.7.2 Kılavuzlanmış Tek TM Modları	14
3. OPTİK MODÜLATÖRLER	16
3.1 Optik Modülatörlere Giriş	16
3.2 Modülasyon Teknikleri	16
3.2.1 Direkt Modülasyon	16
3.2.2 Harici Modülasyon	18
3.3 Optik Modülatörlerde Temel Özellikler	20
3.3.1 Spektral Genişlik	20
3.3.2 Sönümleme Oranı	20
3.4 Modülatör Çeşitleri	22
3.4.1 Genlik Modülatörü	22
3.4.2 Faz Modülatörü	23
3.4.3 Elektrooptik Faz Modülasyonu	23
3.4.4 Frekans Modülatörü	24
3.4.5 EML Modülatörü (Electroabsorption Modulator)	24
3.4.6 Mach-Zender Modülatörü	25
3.5 Modülasyon ve Bias Voltaj Aralığı	26
3.6 Işık Kaynakları	28
3.6.1 Soğurma ve Işıma	29
3.6.2 Işık Yayan Diyot(LED)	30
3.6.3 Lazer Diyot	32
4. OPTİK MODÜLATÖR SİMÜLASYONU VE ANALİZİ	34
4.1 Mach-Zender ve EML Modülatörlerinin Performans Karşılaştırması	34
4.2 Mach-Zender ve EML Modülatörlerinde Gürültü Analizi	36

4.3	Optik Modölatörlerde Sönümleme Etkisi Analizi	39
4.4	Optik Modölatörlerde Ortalama Gücün Çıkış İşaretine Etkisi	41
4.5	Optik Modölatörlerde Bias Gerilimi Analizi.....	45
4.6	Optik haberleşme Ağlarında Yol Kaybı Analizi	47
5.	SONUÇLAR.....	52
KAYNAKLAR		54
ÖZGEÇMİŞ.....		55

SİMGE LİSTESİ

γ	Optik fiberin kılıf bölgesinin özdegeri
κ	Optik fiberin çekirdek bölgesinin özdegeri
ρ	Optik fiberin kılıf bölgesini saran ortamın özdegeri
ω	Açısal frekans
ν	Azimutal mod sayısı
E	Elektrik alan
H	Magnetik alan
n_1	Optik fiberin çekirdek bölgesinin kırılma indisi
n_2	Optik fiberin kılıf bölgesinin kırılma indisi
n_3	Optik fiberin kılıf bölgesini saran ortamın kırılma indisi
μ	Ortamın magnetik geçirgenliği (permeabilite)
μ_0	Serbest uzayın magnetik geçirgenliği
ε	Ortamın dielektrik sabiti (permittivite)
ε_1	Çekirdek bölgesi dielektrik sabiti
ε_2	Kılıf bölgesi dielektrik sabiti
k	Dalga sayısı
k_0	Serbest uzaydaki dalga sayısı
β	Propagasyon sabiti (faz sabiti)
d	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinin yarıçapı
f	Optik işaret frekası
B	Optik işaretin band genişliği
λ	Optik işaretin dalgaboyu
c	Boşluktaki ışık hızı
α	Cıvıltı parametresi (chirp factor)
T_f	Sönümlleme Oranı

KISALTMA LİSTESİ

CW	Continuous Wave (Sürekli Dalga)
BER	Bit Hata Oranı
ER	Extinction Ratio(Sönümleme Oranı)
EML	Electroabsorption Modulator
OMA	Optical Modulation Amplitude (Optik Modülasyon Genliği)
OSNR	Optik İşaret Gürültü Oranı (Optical Signal to Noise Ratio)
PP	Güç Cezası
SDH	Synchronous Digital Hierarchy (Senkron Sayısal Hiyerarşi)
SONET	Synchronous Optical Network (Senkron Optik Ağ)
TE	Transverse Electric (Enine Elektrik)
TM	Transverse Magnetic (Enine Magnetik)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Simetrik düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu.....	8
Şekil 2.2	Katmanlı yapıdaki optik dalga kılavuzlarında TE tek ve çift modlarının karakteristik denklemleri grafiği.....	13
Şekil 3.2	Direkt modülasyon düzeneği.....	17
Şekil 3.3	Direkt modülasyonda modüle edilmiş işaret	17
Şekil 3.4	Harici modülasyon	18
Şekil 3.5	Harici modülasyon düzeneği.....	19
Şekil 3.6	Harici modülasyonda modüle edilmiş işaret	19
Şekil 3.7	ER faktörü ve güç cezası ilişkilendirilmesi (Säckinger, 2005)	22
Şekil 3.8	EML'nin genel yapısı.....	24
Şekil 3.9	Mach-Zender modülatörün genel yapısı.	25
Şekil 3.10	Tek sonlu modülatör sürücüsü	27
Şekil 3.11	Modülatör ve bias gerilimi ilişkisi	27
Şekil 3.12	Soğurma (emme)	29
Şekil 3.13	Kendiliğinden ışıma (Spontaneous emission)	30
Şekil 3.14	Uyarılmış Işıma (Stimulated emission).....	30
Şekil 3.15	LED'lerin akım-gerilim eğrisi (I-V eğrisi).....	31
Şekil 3.16	LED modülatörlerin karakteristiği	31
Şekil 3.17	Yüzey emisyonlu LED	32
Şekil 3.18	Kenar emisyonlu LED.....	32
Şekil 4.1	Mach-Zender Tasarımı.....	34
Şekil 4.2	EML Tasarımı	35
Şekil 4.3	Mach-Zender modülatörün çıkış gücü	35
Şekil 4.4	EML modülatörün çıkış gücü.....	36
Şekil 4.5	Mach-Zender modülatöründe gürültünün etkisinin incelendiği düzenek.....	37
Şekil 4.6	Mach-Zender modülatöründe gürültü karakteristiği	37
Şekil 4.7	EML'de gürültünün etkisinin incelendiği düzenek	38
Şekil 4.8	EML'de gürültü karakteristiği.....	38
Şekil 4.9	ER faktörü 30 dB olan düzenek	39
Şekil 4.10	ER faktörü 30 dB olan düzeneğin çıkış gücü	40
Şekil 4.11	ER faktörü 5 dB olan düzenek	40
Şekil 4.12	ER faktörü 5 dB olan düzeneğin çıkış gücü	41
Şekil 4.13	ER faktörü 5 dB ve giriş gücü 10 dBm olan düzenek	42
Şekil 4.14	ER faktörü 5 dB ve giriş gücü 10 dBm olan düzeneğin çıkış karakteristiği	43

Şekil 4.15	ER faktörü 5 dB ve giriş gücü 200 dBm olan düzenek	43
Şekil 4.16	ER faktörü 5 dB ve giriş gücü 200 dBm olan düzeneğin çıkış karakteristiği	44
Şekil 4.17	Bias geriliminin 0V olarak uygulandığı düzenek	45
Şekil 4.18	Bias geriliminin 0V olarak uygulandığı düzeneğin çıkış işareti	46
Şekil 4.19	Bias geriliminin -1V olarak uygulandığı düzenek	46
Şekil 4.20	Bias geriliminin 1V olarak uygulandığı düzeneğin çıkış işareti	47
Şekil 4.21	Yol Kaybı etkisinin incelendiği düzenek	48
Şekil 4.22	Kayıpsız kanalda modülatör çıkış işareti	49
Şekil 4.23	Kayıplı kanalda modülatör çıkış işareti	49
Şekil 4.24	Kayıplı ve kayıpsız ortam optik işaretlerinin modülatör çıkış karakteristiği	50

ÖNSÖZ

THz'ler mertebesinde çalışan ve dolayısıyla kapasiteleri yüksek olan optik ağlar, haberleşme alanında kaliteli ve güvenli altyapı ihtiyacını karşılayacak niteliktedir. Bu özellikleri ile tercih edilen optik ağlar, karşımıza optik doğrultu kuplörü, optik fiber sensör, optik kuvvetlendirici, optik filtre, optik dedektör ve optik modülatör gibi devre elemanlarını çıkarmıştır. Bu çalışmada optik devre elemanlarından biri olan optik modülatörler incelenmiş olup Optik modülatörlerin performans analizleri ele alınmıştır.

Çalışmam sırasında benden desteğini hiç esirgemeyen ve bana her zaman yol gösteren sevgili hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. N. Özlem Ünverdi'ye ve hayatımın her döneminde desteğiyle yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

ÖZET

Son yıllarda haberleşme ağlarında artan trafiğe bağlı olarak kapasite ihtiyacı doğmuştur. Optik ağlar, THz'ler seviyesinde çalışan frekans karakteristiği sayesinde büyük ölçüde bu ihtiyaca çözüm olmuştur. Optik ağlarda, optik kuplör, optik sensör, optik kuvvetlendirici, optik filtre ve optik modülatör gibi devre elemanları kullanılarak veri iletimindeki performans artırılmaktadır.

Bu çalışmada, söz konusu devre elemanlarından optik modülatörlerin çalışma prensipleri dikkate alınarak iletişimdeki yeri ve kullanımı irdelenmiştir. İletilen işaretin faz, genlik ve frekans bilgilerinin, optik modülatör üzerindeki etkileri OptiSystem 7.0 simülatör yazılımı aracılığıyla analiz edilmiştir.

Çalışmanın Birinci Bölüm'ünde, konuya giriş yapılarak optik haberleşmenin tarihçesi anlatılmıştır. İkinci Bölüm'de, optik dalga kılavuzlarının modal analizi yapılmıştır. Üçüncü Bölüm'de, optik modülatörler ve çalışma prensipleri incelenmiştir. Dördüncü Bölüm'de modülatörlerle ilgili uygulamalar ve performans analizi simülasyonlarına yer verilmiş ve Beşinci Bölüm'de çalışmadan elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler; optik modülatör, Mach_Zender, optik modülatörlerde çıkış gücü, sönümleme Oranı, bias gerilimi.

ABSTRACT

In recent years, capacity requirements are increased at communication networks due to high data traffic. Optical networks has been mainly provided a capacity solution by the high frequency characteristic in the range of THz. Data transmission performance has been increased by using optical circuit devices such as optical coupler, optical sensor, optical amplifier optical filter and optical modulators.

In this study, working principle of optical modulators that is one of the optical circuit device is analysed and importance of optical modulators is investigated. Effects of the phase, amplitude and frequency of the transmitted signal on the optical modulators are simulated by OptiSystem 7.0 simulator software.

In the first stage of this thesis optical communication is introduced and history of the optical communication networks is given. In the second section the modal analysis in optical waveguides are studied. In the third section optical modulators and working principle of the modulators are given. And in the fourth section simulation of the modulators has done and performance impacts are analysed. In the last section the results are considered.

Key Words; optic modulator, Mach-Zender, output power at optic modulators, extinction ratio, bias voltage.

1. GİRİŞ

Optik haberleşmenin tarihçesi 1880’li yıllara dayanmakla birlikte o yıllarda dönemin haberleşme tekniklerine göre iletim problemleri yaşanmıştır. Zamanla optik haberleşmedeki iletim problemleri çözülmüş, ancak haberleşme sistemlerine uyum göstermesi uzun bir süreç gerektirmiştir. Bunun nedeni, çekirdek bölgesini çevreleyen kılıf kavramının daha geç oluşmasıdır.

1880 yılında A. Graham Bell, “Photophone” olarak isimlendirdiği optik telefon sisteminin patentini almıştır. Aynı yıllarda, W. Wheeler ise içi kaplanmış ışık borusunu kullanarak ışığı yönlendiren deneyler yapmıştır. 1920’li yıllara geldiği zaman, J. L. Baird İngiltere’de ve W. Hansell Amerika’da içi boş boru veya saydam çubukların içerisinden görüntü veya faks bilgisinin iletilmesi fikrinin patentini almıştır. Bu yıllardan sonra optik haberleşme hızlı bir gelişim göstermiştir ancak o yıllarda optik haberleşmenin en büyük sorunu olan kayıp faktörü hala çözüm bulmamıştır (Keiser, 1983).

1954 yılında A. Heel, fiber kablonun üzerine kırılma indisi daha düşük olan bir cam kaplamanın dış etkenlerden ve diğer fiber kablolardan etkilenmesini azaltacağını belirlemiştir. Böylece fiberlerle ilgili en büyük sorun, ışığın fiber boru içinde yol alırken sinyalin azalması, Heel tarafından çözülerek Amerikalı optik fizikçisi B. O’Brien tarafından da desteklenmiştir. Bu olay toplam yansıma yüzeyini gürültüden korumuş ve fiberler arasındaki çapraz karışmayı önemli derecede azaltmıştır. Daha sonraları fiber optiklerden lazer tedavisinde de yararlanılmıştır. A. L. Schawlow ve C. H. Townes, kızılötesi ve görünür spektrumdaki lazer işlevi ile ilgili çalışma yapmıştır. Görünür spektrumda ilk lazer cihazı yakut maddesinden yapılmıştır (Sharma, 1987).

İlk başarılı optik lazer ise A. Maiman tarafından yapılmıştır. 1950’lerin sonu 1960’ların başında bir RF (Radyo Frekans) jeneratörünün optik eşdeğerini sağlayan lazerin keşfi teknolojiyi optik haberleşmeye yöneltmiştir.

1961 yılında E. Snitzer fiberlerden tek modlu dalga kılavuzu şeklinde ışığı taşımıştır. Bununla birlikte her bir metrede 1 desibel kaybedildiği için sadece insan vücudu üzerinde tıbbi araştırmalar için kullanılabilmiştir. Ancak uzak mesafe haberleşme sistemlerinde kilometre başına 10 veya 20 desibelden fazla kayıp tolere edilemediği için yeterli olmamıştır.

Standart Telekomünikasyon Laboratuvarları’nda, C. K. Kao fiberlerdeki kayıpların silis camın kendisiyle değil, bu cama yapılan katkılarla ilişkili olduğunu bulmuştur (Sharma,

1987). Kao ve İngiliz Postahanesi'nin fiber optik haberleşmesi ile ilgili yaptıkları araştırmaların sonunda, 1970 yılının Eylül ayında 633 nm helyum neon özelliğinde olan tek modlu fiberleri 20 dB/km'nin altında imal ettikleri duyurulmuştur. Bu kablo, bakır kabloya göre 65000 kat daha fazla bilgiyi binlerce kilometre uzaklığa iletebilmiştir.

Corning şirketinin çalışmaları, fiber optik haberleşmesinin gelişmesini sağlayan önemli bir yere sahiptir. Aynı yıllarda, Bell Laboratuvarları ve Ioffe Fizik Enstitüsü'nde bir proje grubu, ilk yarı iletken diyot lazerlerin oda sıcaklığında sürekli dalga yayabilmesini sağlamıştır. Sonraki yıllarda, fabrikasyon metotları ve fiberlerin daha düşük zayıflamaya uğradığı dalga boylarına kayılması ile fiber kayıpları ciddi derecede azalmıştır.

İlerleyen yıllarda A.B.D., İngiltere ve Japonya gibi ülkelerden birçok grup düşük kaybın başarıma olasılığını keşfetmeye başlamışlardır. 1969'da bir Japon firması, çok bileşenli camdan 100 dB/km kayıplı yumuşak geçişli bir fiber yaptıklarını açıklamıştır. 1970'de A.B.D.'de 20 dB/km kayıplı kimyasal buharlaşmayla çökelti metodu ile üretilmiş tek modlu fiberler gerçekleştirilmiştir. 1988'de optik haberleşme uzun mesafeli haberleşme için bir ortam haline gelmiştir. Bir yer altı fiber optik kablo sistemi Amerika ile Avrupa arasında kullanıma girmiştir. Şu anda ise bina içi izole edilmiş ağlardan kıtalar arası devasa sistemlere kadar fiber sistemler mevcuttur (Buck, 1995).

Son otuz yıl boyunca elektrooptik sistemlerde büyük gelişmeler yaşanmıştır. Işık sinyalli haberleşme cihazları artık çoğu uygulamada, telefon donanımlarında ve bilgisayar sistemlerinde kullanılmaktadır. Optik haberleşme devam eden çalışmalarla gelişimini sürdürmektedir.

Optik haberleşmenin gelişmesi, optik ağları ve optik ağlarda kullanılan optik devre elemanlarını önemli kılmıştır. Optik ağlarda, optik doğrultu kuplörü, optik fiber sensör, optik kuvvetlendirici, optik filtre, optik dedektör ve optik modülatör gibi devre elemanları kullanılmaktadır. Bu tezde optik devre elemanlarından optik modülatörler ele alınmıştır.

Optik haberleşme sistemlerinde faz, genlik, frekans ve polarizasyon modülasyonunda kullanılan optik modülatörlerin çoğu katı hal elemanı olarak görev yapar. Işık, elektriksel kontrol işareti tarafından cihazın maddesinin optik özelliklerinin değiştirilmesi ile modüle edilir. Kontrol işareti, maddenin optik özellikleri ile ilişkilendirilecek şekilde elektrooptik, akustooptik ve magnetooptik mekanizmaları aracılığı ile giriş işaretini modüle eder.

Işık huzmesi, optik yoğunluk, faz, polarizasyon, dalga boyu ve spektral dağılım olmak üzere

ışığın beş temel özelliği kullanılarak modüle edilir. Optik taşıyıcı, analog ya da sayısal bilgi işareti kullanılarak modüle edilebilir. Analog modülasyonda, optik kaynaktan yayılan ışık değişimi sürekli iken sayısal modülasyonda, ışık yoğunluğunda ayrıık değişimler söz konusudur. Sayısal modülasyonlu sistemler, analog modülasyonlu sistemlere göre daha düşük işaret / gürültü oranına sahiptir.

Bu tezde, iletilen işaretin faz, genlik ve frekans bilgilerinin, optik mod lat r üzerindeki etkileri incelenmiş ve teorik analizler simülasyon uygulamalarıyla desteklenmiştir.

2. OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA MODAL ANALİZ

2.1 Optik Dalga Kılavuzlarının Özellikleri

Optik haberleşmede kullanılan fiberler, saydam yalıtkandan yapılan, görünür ve kızıl ötesi ışığı uzak mesafelere iletmekle görevli olan dalga kılavuzlarıdır.

Optik dalga kılavuzu analizi yapmak için Maxwell eşitlikleri, maddenin elektriksel özellikleri ve ışığın yansıma ve kırılma kanunları göz önüne alınır. Işığın bir fiber içinde kalabilmesi için kılıf bölgesinin kırılma indisi, çekirdek bölgesinin kırılma indisinden küçük olmalıdır.

2.2 Maddenin Elektriksel Özellikleri

Cam fiberlerde atomlar arasındaki mesafe, 0.1 nm mertebesinde. Bu mesafe, ışığın dalga boyu (1000nm) ile karşılaştırıldığı zaman çok küçüktür. Bu yüzden, dalga kılavuzu analizinde, camın homojen ortam olduğu varsayılmıştır. İnceleme ortamı, serbest yüklerin bulunmadığı, kayıpsız, lineer, izotrop ve homojen ortam olarak kabul edilir. Bu tür bir maddenin elektriksel özellikleri, ϵ (elektriksel geçirgenlik, permittivity), μ (magnetik geçirgenlik, permeability), σ (iletkenlik, conductivity) ile tanımlanır. Maddenin elektrik ve magnetik alanları, süreklilik denklemlerine uyum sağlar.

Ortamın özelliklerini veren bünye denklemleri,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.3)$$

şeklindedir. Kayıpsız dielektrik ortamda,

$$\sigma = 0 \quad [S / m] \quad (2.4)$$

olmak üzere serbest uzayın dielektrik sabiti ve magnetik geçirgenliği,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \quad [F / m] \quad (2.5)$$

ve

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad [H / m] \quad (2.6)$$

değerine sahiptir.

ϵ_r bağıl dielektrik sabiti ve μ_r bağıl magnetik geçirgenlik ise

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad [F / m] \quad (2.7)$$

ve

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 \quad [H / m] \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir.

2.3 Maxwell Denklemleri ve Dalga Kılavuzları için Temel Eşitlikler

Elektromagnetik indüksiyonun temel önermesine göre zamanla değişen magnetik alan elektrik alan oluşturur (Cheng, 1983). Zamanla değişim $\exp(j\omega t)$, kılavuzlanmış elektromagnetik dalganın z yönündeki değişimi ise $\exp(\pm j\beta z)$ biçimindedir; $(+z)$ yönündeki alan bileşenleri,

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad [V / m] \quad (2.9)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad [A / m] \quad (2.10)$$

formundadır. (2.9) ve (2.10) eşitlikleri Ampère Yasası ve Faraday Yasası'nda kullanıldığında zaman,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega \epsilon \vec{E} \quad (2.11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (2.12)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitliklerin vektörel açılımları ile enine alan bileşenleri, boyuna alan bileşenleri cinsinden,

$$E_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

$$E_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.14)$$

$$H_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

$$H_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} + \omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.16)$$

olarak bulunur. Burada κ çekirdek bölgesi özdeğeri,

$$\kappa^2 = k_1^2 - \beta^2 = (n_1 k_0)^2 - \beta^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - \beta^2 \quad (2.17)$$

dir. Propagasyon yönündeki bileşenlerin bulunmasıyla diğer bileşenlerinin de elde edileceği açıktır. Bunun için kaynak bulunmayan homojen ortamlarda geçerli olan Helmholtz denkleminden yararlanılarak,

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + k^2 E_z = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.20)$$

eşitlikleri yazılır (Cherin, 1983).

Laplace operatörü,

$$\nabla_T^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

olmak üzere, (2.19) ve (2.20) eşitlikleri, Laplace operatörü yardımıyla tekrar düzenlenirse,

$$\nabla_T^2 E_z + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla_T^2 H_z + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.23)$$

Helmholtz denklemleri elde edilir.

2.4 Dielektrik-Dielektrik Sınır Koşulları

Dielektrik-dielektrik sınır yüzeyinde elektrik ve magnetik alanın teğetsel bileşenleri, elektrik akı yoğunluğu ve magnetik akı yoğunluğunun ise normal bileşenleri süreklidir;

$$E_{t_1} = E_{t_2} \quad (2.24)$$

$$H_{t_1} = H_{t_2} \quad (2.25)$$

$$D_{n_1} = D_{n_2} \quad (2.26)$$

$$B_{n_1} = B_{n_2} \quad (2.27)$$

2.5 Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Optik Dalga Kılavuzu

Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun propagasyon davranışları optik fiberler ile benzerdir. Bunun yanısıra slab dalga kılavuzu analizi silindirik dalga kılavuzu analizine göre daha basittir. Bu yüzden, optik fiberlerde öncelikle slab dalga kılavuzu yaklaşımı ele alınmıştır.

Şekil 2.1’de, y yönünde sonsuza uzanan düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzu örneği görülmektedir. Çekirdek bölgesinin kırılma indisi n_1 , çekirdeği saran ortamın kırılma indisi n_2 olup tam yansıma kurallarına göre,

$$n_1 > n_2 \quad (2.28)$$

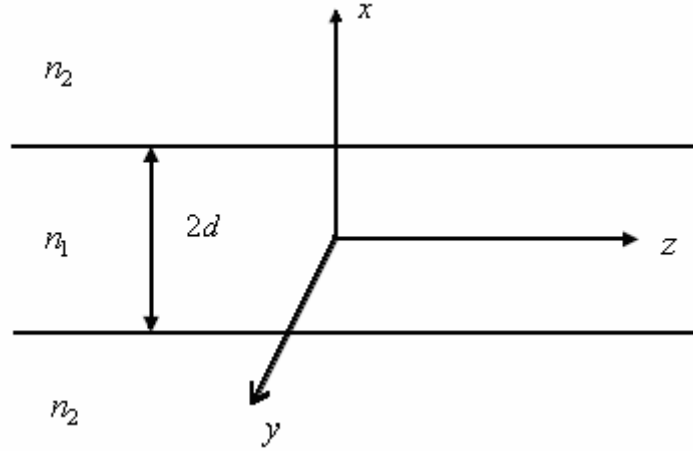
dir.

Propagasyon doğrultusu z yönündedir ve kılavuzun y yönünde sonsuz olduğu varsayılarak işlemler yapılmıştır. y ’nin sonsuz olma durumunda, elektromagnetik özellikler y yönünde değişim göstermemektedir.

Bu durum;

$$\frac{\partial}{\partial y} \equiv 0 \quad (2.29)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 2.1 Simetrik düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu.

z yönünde propagasyon yapan (2.9) ve (2.10) eşitlikleriyle belirtilen elektrik ve magnetik alan ifadelerinin Ampère ve Faraday Yasaları'na uygulanması ile elde edilen (2.13), (2.14), (2.15) ve (2.16) denklem takımı, (2.29) denkliği dikkate alınarak,

$$E_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.30)$$

$$E_y = \frac{j}{\kappa^2} \left(\omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.31)$$

$$H_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.32)$$

$$H_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.33)$$

olarak elde edilir. Böylece düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarındaki enine bileşenler boyuna bileşenler cinsinden ifade edilir. Daha öncede belirtildiği gibi boyuna bileşenler, propagasyon doğrultusundaki bileşenlerken, diğer bileşenler enine bileşenleri oluşturur.

Mod, dalga kılavuzunun geometrik özelliklerine uyan, Maxwell eşitlikleriyle tanımlı ve sınır koşulu problemlerini sağlayan alan konfigürasyonudur. Tezde optik devre elemanlarının daha iyi anlaşılması için, TE ve TM modlarının analizi basitçe ele alınmıştır.

2.6 TE Modları

TE modları için propagasyon doğrultusundaki elektrik alan bileşeni $E_z=0$ 'dır; E_y, H_x ve H_z bileşenleri bulunur. (2.29) kabulü ve gerekli düzenlemeler ile Helmholtz eşitliği,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \kappa^2 E_y = 0 \quad (2.34)$$

şeklinde bulunur. Bulunan E_y alan bileşeni ile

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y \quad (2.35)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.36)$$

bileşenlerine ulaşılır.

Elektrik alan ifadesinin çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesinde farklı özellikler göstermesi nedeniyle (2.34) eşitliğinin çekirdek ve kılıf bölgelerinde çözümleri farklıdır.

2.6.1 Kılavuzlanmış Çift TE Modları

Düzlemsel yapıdaki d yarıçaplı, katmanlı optik dalga kılavuzunda, çekirdek bölgesindeki E_y alan ifadesi (2.34) eşitliğinin çözümü ile bulunur:

$$E_{y_1} = A_1 \cos(\kappa x) \quad (2.37)$$

Magnetik alan bileşenleri,

$$H_{x_1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} A_1 \cos(\kappa x) \quad (2.38)$$

$$H_{z_1} = -\frac{j\kappa}{\omega\mu_0} A_1 \sin(\kappa x) \quad (2.39)$$

olarak bulunur. Çekirdek bölgesini saran kılıf bölgesinde ($|x| \geq d$) ise, özdeğer ifadesi γ olmak üzere eksponansiyel olarak zayıflayan elektrik ve magnetik alan bileşenleri bulunur. Özdeğer,

$$\gamma^2 = \beta^2 - k_2^2 = \beta^2 - (n_2 k_0)^2 = \beta^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_2 \quad (2.40)$$

olarak ifade edilir. Kılıf bölgesindeki alan ifadeleri,

$$E_{y_2} = A_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.41)$$

$$H_{x_2} = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} A_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.42)$$

$$H_{z_2} = \frac{j\gamma}{\omega \mu_0} \left(\frac{-x}{|x|} \right) A_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.43)$$

dir. (2.24) eşitliğine göre dielektrik-dielektrik sınır koşulları ile tam sınırdaki ($x = d$) çekirdek bölgesi ile çekirdek bölgesini saran dış ortamın, bir başka ifadeyle kılıfın elektrik alan bileşenlerinin teğetsel bileşenleri eşit olmalıdır. Bu durumda,

$$A_2 = A_1 \cos(\kappa d) \quad (2.44)$$

dir.

(2.25) eşitliğine göre magnetik alanın teğetsel bileşenleri eşitlenerek,

$$-\frac{j\kappa}{\omega \mu_0} A_1 \sin(\kappa d) = \frac{j\gamma}{\omega \mu_0} \left(\frac{-d}{|d|} \right) A_2 \exp[-\gamma(|d| - d)] \quad (2.45)$$

eşitliği elde edilir.

(2.45) eşitliğinde (2.44) ifadelerinden,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (2.46)$$

karakteristik özdeğer denklemi elde edilir.

2.6.2 Kılavuzlanmış Tek TE Modları

Tek TE modları için de, kılavuzlanmış çift TE modları için çıkarılan benzer eşitlikler elde edilir. Çekirdek bölgesinde $|x| \leq d$ alan ifadeleri,

$$E_{y_1} = B_1 \sin(\kappa x) \quad (2.47)$$

$$H_{x_1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B_1 \sin(\kappa x) \quad (2.48)$$

ve

$$H_{z_1} = \frac{j\kappa}{\omega\mu_0} B_1 \cos(\kappa x) \quad (2.49)$$

dir. Kılıf bölgesinde ($|x| \geq d$) alan ifadeleri,

$$E_{y_2} = B_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.50)$$

$$H_{x_2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.51)$$

ve

$$H_{z_2} = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(\frac{-x}{|x|} \right) B_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.52)$$

dir. Dielektrik-dielektrik sınır koşulları gereğince, $x = d$ 'de, elektrik alanın teğetsel bileşenleri eşitlenir:

$$E_{y_1} = E_{y_2} \quad (2.53)$$

ve buradan

$$B_2 = B_1 \sin(\kappa d) \quad (2.54)$$

bağıntısı elde edilir.

Magnetik alanın teğetsel bileşenleri de dielektrik-dielektrik sınır koşullarında yer alan (2.25) ifadesiyle eşitlenir ve

$$\frac{j\kappa}{\omega\mu_0} B_1 \cos(\kappa d) = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(\frac{-d}{|d|} \right) B_2 \exp[-\gamma(|d| - d)] \quad (2.55)$$

eşitliği elde edilir.

(2.55) eşitliğinde (2.54) eşitliği kullanılarak,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = -\frac{\kappa}{\gamma} \quad (2.56)$$

karakteristik özdeğer denklemi elde edilir.

2.6.3 TE Modları İçin Karakteristik Denklemler

TE modlarının karakteristik denklemi elde edilirken, çekirdek bölgesi ve çekirdek bölgesini saran ortamın özdeğer ifadeleri olan

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.57)$$

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (2.58)$$

eşitliklerinden yararlanılır.

(2.57) ve (2.58) denklemleri d^2 ile çarpılarak düzenlenerek,

$$(\kappa^2 + \gamma^2)d^2 = (n_1^2 - n_2^2)k_0^2 d^2 \quad (2.59)$$

merkezi çember benzetimi elde edilir. Merkezi çember, yarıçapı R olmak üzere κd ve γd eksenleri üzerinden tanımlanır:

$$R = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 d \quad (2.60)$$

(2.46) ve (2.56) eşitlikleri yardımıyla,

$$\gamma d = \kappa d \tan(\kappa d) \quad (2.61)$$

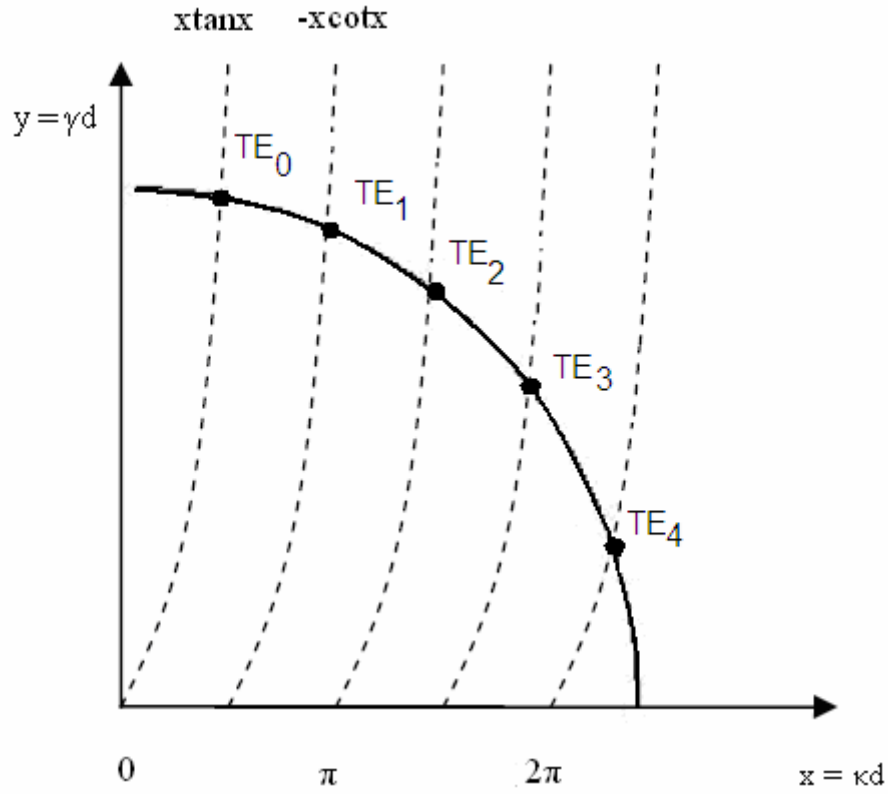
$$\gamma d = -\kappa d \cot(\kappa d) \quad (2.62)$$

eşitlikleri elde edilir ve bu denklemler,

$$Y = X \tan(X) \quad (2.63)$$

$$Y = -X \cot(X) \quad (2.64)$$

formuna dönüştürülerek Şekil 2.2'deki grafik çizilir.



Şekil 2.2 Katmanlı yapıdaki optik dalga kılavuzlarında TE tek ve çift modlarının karakteristik denklemi grafiği (Türkmen, 2005).

Şekil 2.2, kılavuzlanmış TE modlarının propagasyon sabitini bulmak açısından önemlidir. Örneğin, belirtilen d değeriyle κ_0 ve γ_0 değerlerine, ilk kesişim noktasının koordinatlarından birinci çift moduna (TE_0) ulaşılır.

Burada, propagasyon yapan mod sayısı R ile belirlenir. $R < \frac{\pi}{2}$ olması durumunda, bir tane mod (TE_0) iletilir. (2.60) eşitliğinden de görüldüğü gibi, n_1 ve d artarken iletilen mod sayısı artar, n_2 ve çalışma dalga boyu λ_0 artarken iletilen mod sayısı azalır. Optik fiberin yapısına ait parametrelerin değişimi, yayılan mod sayısına etki eder.

2.7 TM Modları

TM modunda propagasyon doğrultusundaki magnetik alan bileşeni $H_z=0$ 'dır; E_x, E_z ve H_y alan bileşenleri mevcuttur. TE modlarının karakteristik denklemi bulunurken izlenen yöntem TM modları için de tekrarlanır. (2.29) kabulü ve gerekli düzenlemeler ile Helmholtz eşitliği,

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \kappa^2 H_y = 0 \quad (2.65)$$

şeklinde bulunur. Bulunan H_y alan bileşeni ile

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_y \quad (2.66)$$

ve

$$E_z = -\frac{j}{\omega \epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.67)$$

bileşenlerine ulaşılır.

(2.65) eşitliğinin çekirdek ve kılıf bölgelerindeki çözümleri farklıdır.

2.7.1 Kılavuzlanmış Çift TM Modları

Çekirdek bölgesindeki ($|x| \leq d$), çift TM modunun H_y alan ifadesi (2.65) eşitliğinin çözümü ile bulunur:

$$H_{y_1} = C_1 \cos(\kappa x) \quad (2.68)$$

Kılıf bölgesinde ($|x| \geq d$),

$$H_{y_2} = C_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.69)$$

dir. Dielektrik-dielektrik sınır koşulları ile

$$\tan(\kappa d) = \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(\frac{\gamma}{\kappa} \right) \quad (2.70)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

2.7.2 Kılavuzlanmış Tek TM Modları

(2.65) denkleminin çekirdek bölgesinde ($|x| \leq d$), TM tek modları için çözümü,

$$H_{y_1} = D_1 \sin(\kappa x) \quad (2.71)$$

dir. Kılıf bölgesinde $(|x| \geq d)$,

$$H_{y_2} = D_2 \exp[-\gamma(|x| - d)] \quad (2.72)$$

dir. Dielektrik-dielektrik sınır koşulları ile

$$\tan(\kappa d) = -\frac{n_2^2}{n_1^2} \left(\frac{\kappa}{\gamma} \right) \quad (2.73)$$

karakteristik denklemi bulunur.

3. OPTİK MODÜLATÖRLER

3.1 Optik Modülatörlere Giriş

Optik modülatörler, optik fiber sistemlerinde faz, genlik, frekans ve polarizasyon modülasyonu gibi değişik fonksiyonları yerine getiren elamanlardır ve büyük bir çoğunluğu katı hal elemanı olarak görev yapar. Kaynak ışık, elektriksel kontrol sinyali tarafından modülatörün maddesinin optik özelliklerinin değiştirilmesi ile modüle edilir. Kontrol sinyali elektrooptik, akustooptik ve magnetooptik mekanizmaları aracılığıyla maddenin özellikleri ile ilişkilendirilir.

Optik modülatörler, kullanılan bilgi sinyalinin tipine göre analog ya da sayısal modülatörler olarak da ikiye ayrılırlar. Analog modülasyonda, optik kaynaktan yayılan ışık değişimi sürekli iken sayısal modülasyonda, ışık yoğunluğunda ayırık değişimler söz konusudur. Sayısal modülasyonlu sistemler, analog modülasyonlu sistemlere göre daha düşük işaret-gürültü oranına sahiptir. Modülasyonda kullanılan analog büyüklükler, yoğunluk, optik faz, polarizasyon ve renk gibi büyüklüklerdir. Sayısal modülasyonda ise, frekans modülasyonu, açma-kapama yoğunluk modülasyonu, Doppler kayması, darbe genişliği ya da gecikme zamanı modülasyonu ve hibrit sistemler teknikleri kullanılır.

Işık hüzmesi, optik yoğunluk, faz, polarizasyon, dalga boyu ve spektral dağılım olmak üzere ışığın beş temel özelliği kullanılarak modüle edilir. İlk üç özelliği kullanan fiber sensörler yoğunluktadır. Bu sensörler, faz modülasyonlu ve yoğunluk modülasyonlu sensörler olarak iki farklı gruba ayrılır.

Bunların dışında optik modülatörler elektriksel kaynak işaretinin faz, genlik veya frekansının modüle edilmesine göre faz modülatörü, genlik modülatörü ve frekans modülatörleri olmak üzere üçe ayrılır. Bu modülatör çeşitlerine ilerleyen bölümlerde detaylı olarak yer verilmiştir.

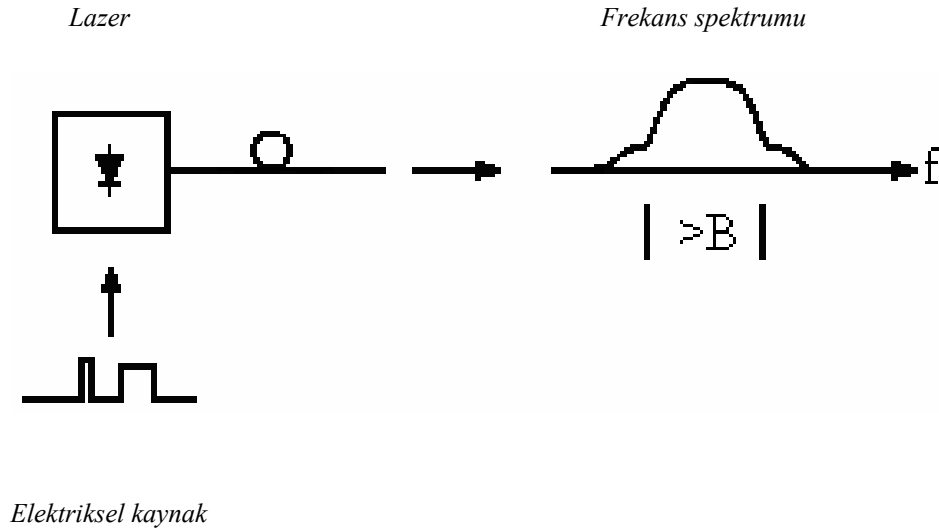
3.2 Modülasyon Teknikleri

Optik işaretler, direkt modülasyon ve harici modülasyon olmak üzere iki alternatif yöntem ile modüle edilirler.

3.2.1 Direkt Modülasyon

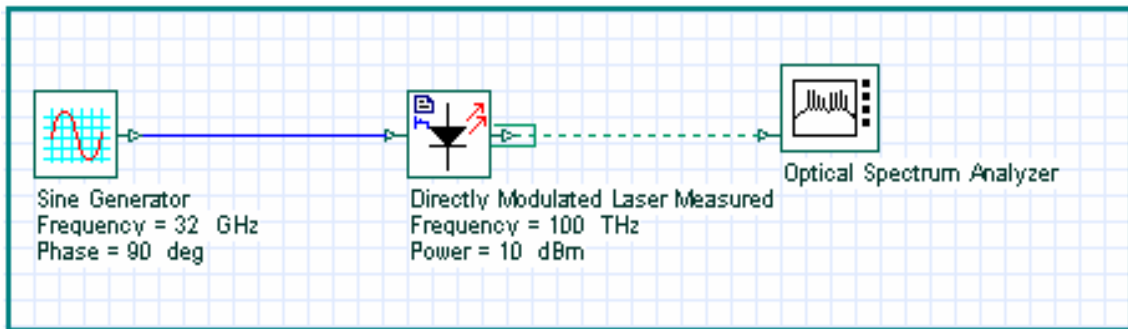
Lazere uygulanan elektriksel işaretin akımı modüle edilerek lazer, *açık / kapalı* durumuna

geçirilir; ancak birçok ışık kaynağı için modülasyon, sadece ışığın genliğini değil, faz ve frekansını da modüle eder. İstenmeyen bu frekans modülasyonu, cıvıltı faktörü (chirp factor) olarak adlandırılır. Direkt modülasyon, oldukça basit ve maliyeti düşük bir yöntemdir ve cıvıltı faktörünün yüksek olması nedeniyle harici modülasyon kadar efektif değildir. Şekil 3.1’de frekans bandı üzerinde cıvıltı etkisi gösterilmiştir (Säckinger, 2005).

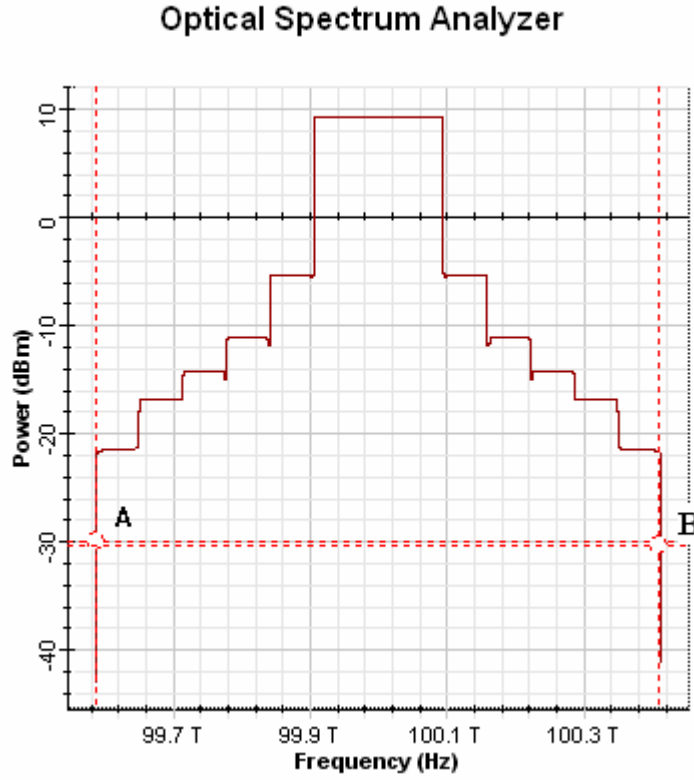


Şekil 3.1 Direkt Modülasyon.

Bu bölümde, Şekil 3.2’de yer alan direkt modülasyon düzeneği, OptiSystem 7.0 simülör yazılımı kullanılarak hazırlanmış ve modüle edilmiş işaret gözlenmiştir. Optik spektrum analizöründe izlenen işaret, Şekil-3.3’te görülmektedir.



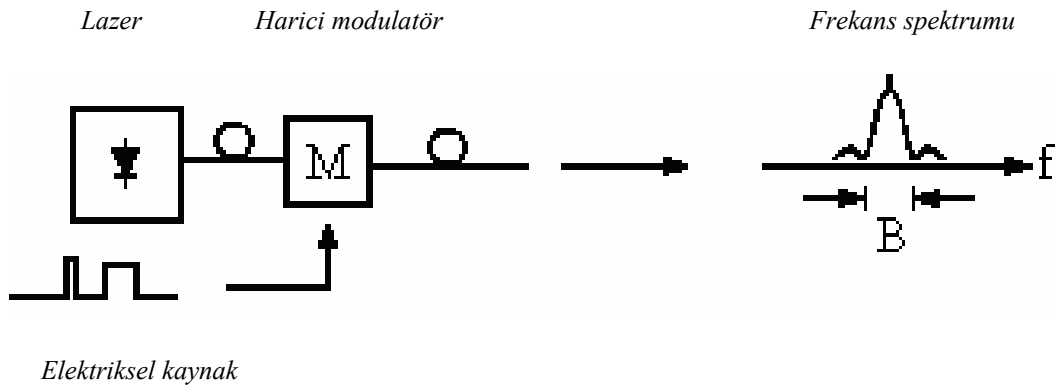
Şekil 3.2 Direkt modülasyon düzeneği.



Şekil 3.3 Direkt modülasyonda modüle edilmiş işaret.

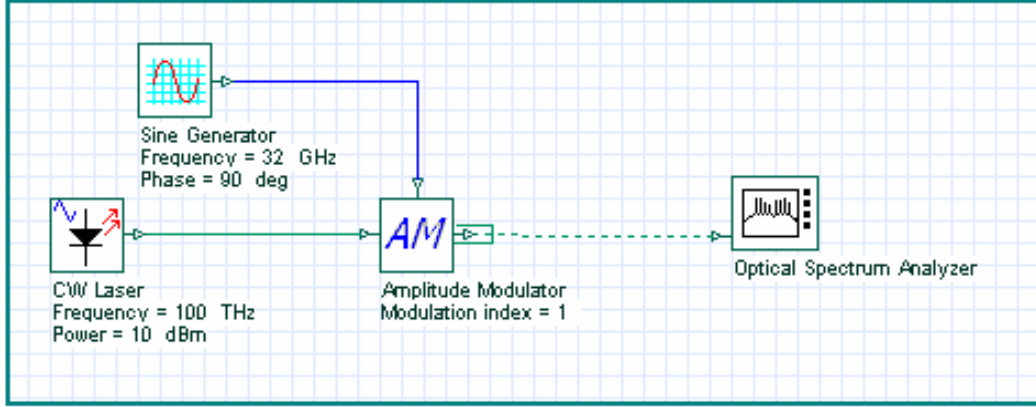
3.2.2 Harici Modülasyon

Giriş işareti, sürekli işaretli (CW, Continuous Wave) lazer ile verilir ve lazer, sürekli olarak açık durumdadır. Optik işaret, harici bir optoelektronik modem sayesinde modüle edilir. Harici modülasyon, direkt modülasyon tekniğine göre daha kompleks yapılı ve yüksek maliyetlidir. Şekil 3.4'te yer alan harici modülasyonda, band genişliğinin dar ve gürültü işaretinin minimum seviyede modüle edilmiş olması, bir başka deyişle cıvıltı faktörünün düşük olması nedeniyle modüle edilmiş işaretin kalitesi yüksektir.

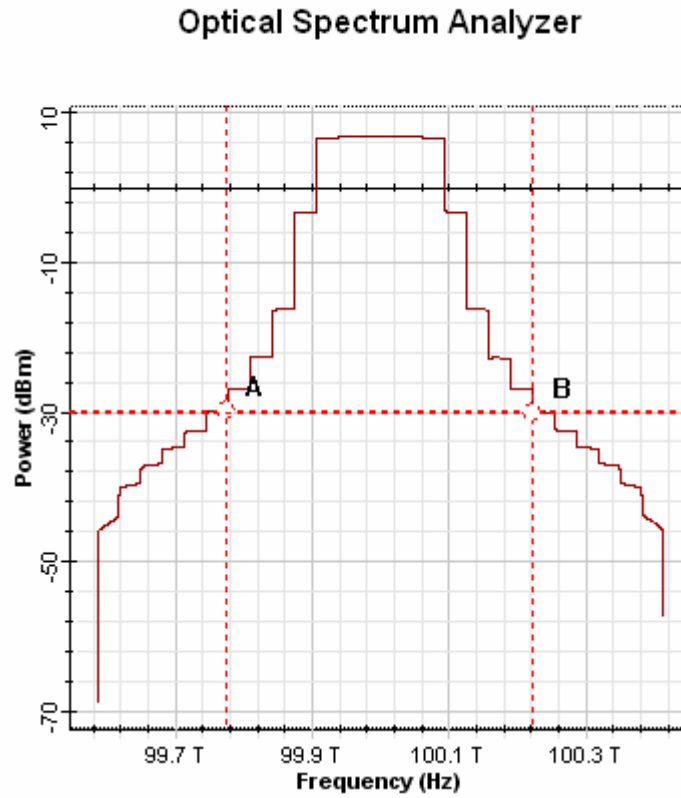


Şekil 3.4 Harici modülasyon.

Bu bölümde, Şekil 3.5'te görülen harici modülasyon düzeneği, OptiSystem 7.0 simülör yazılımı kullanılarak hazırlanmış ve optik spektrum analizöründe izlenen modüle edilmiş işaret, Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5 Harici modülasyon düzeneği.



Şekil 3.6 Harici modülasyonda modüle edilmiş işaret.

3.3 Optik Modölatörlerde Temel Özellikler

3.3.1 Spektral Genişlik

İdeal bir ışık kaynağı ve ideal bir modölatörden oluşan bir düzenekte optik işaretin genliğinin modüle edildiği düşünülürse, işaretin frekansı f ve band genişliği B olmak üzere modölatör çıkış işaretinin frekans spektrumu üzerindeki yerleşimi Şekil 3.4'te gösterildiği üzere, işaretin sağında ve solunda $B/2$ kadar bir band genişliği yer alacak pozisyonda ve sadece genliği artmış durumda olur. Bu band genişliği çoğunlukla kullanıldığı gibi dalgaboyu genişliği ile ifade edilirse $\Delta\lambda$ dalgaboyu, c boşluktaki ışık hızı ve B bant genişliği olmak üzere,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f \approx \frac{\lambda^2}{c} B \quad (3.1)$$

yazılır, ancak pratikte bu ideal koşullar tam olarak sağlanamamakta ve sadece belirli harici modölatör tipleri bu modele yaklaşmaktadır. Bu şekilde frekans bandı üzerinde dar spektruma sahip optik işarete *transform limitli işaret* (transform limited pulse) adı verilir. Pratikte ise bir işaretin genliği modüle edilirken faz ve frekansı da belli oranda değişir. Bu istenmeyen frekans modülasyonuna *cıvıltı (chirp) faktörü* denir. Direkt modölatörler, cıvıltı faktörünün oluşumuna iyi birer örnek teşkil ederler. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi işaretin frekans bandı üzerindeki genişliği, B olan band genişliğinden büyüktür.

Matematiksel olarak cıvıltı faktörü,

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{c} \sqrt{\alpha^2 + 1} \cdot B \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir Burada α cıvıltı parametresidir (Kaminow,1997).

Tüm modölatör tipleri, belli oranda cıvıltı faktörü oluştururlar. Direkt modüle edilmiş lazerlerde cıvıltı faktörünün yaklaşık değeri $\alpha \approx 4$ 'tür. Harici modölatörlerde ise bu değer, $|\alpha| < 1$ aralığında olur; ancak, $|\alpha| < 0.1$ değer aralığı ise ideal durumu yani dönüşüm limitli spektrumu (transform limited spectrum) oluşturur.

3.3.2 Sönümleme Oranı

Sayısal haberleşme sistemlerinde optik linklerin performansının tanımlanmasında en önemli parametrelerden biri, işaretin Optik Modülasyon Genliği (OMA)'dır. OMA direkt olarak bit hata oranına (BER, Bit Error Rate) etki eder. İki seviyeli optik sinyalleşmede, yüksek güç

seviyesi P_1 düşük güç seviyesi P_0 ile gösterilirse edersek OMA matematiksel olarak,

$$OMA = P_1 - P_0 \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir;

Ortalama güç ise basitçe (3.4) eşitliği ile ifade edilir:

$$\bar{P} = \frac{P_0 + P_1}{2} \quad (3.4)$$

Sönümlleme Oranı (ER , Extinction Ratio) yüksek güç seviyesinin düşük güç seviyesine oranıdır. Sönümlleme oranını r_e ile göstermek kaydıyla, OMA, P_1 ve P_0 değerleri r_e ye bağlı olarak;

$$OMA = 2.P_{AVG} \left[\frac{r_e - 1}{r_e + 1} \right] \quad (3.5)$$

formunda ifade edilir. Burada,

$$r_e = \frac{OMA}{P_0} + 1 \quad (3.6)$$

dir. P_1 ve P_0 ,

$$P_1 = P_{AVG} + \frac{1}{2} OMA = 2.P_{AVG} \left[\frac{r_e}{r_e + 1} \right] \quad (3.7)$$

$$P_0 = P_{AVG} - \frac{1}{2} OMA = 2.P_{AVG} \left[\frac{1}{r_e + 1} \right] \quad (3.8)$$

dir.

İdealde, düşük güç seviyesinin 0 olması beklendiği için bu oran sonsuzdur, ancak endüstride, 0 iletilmediği anlarda vericinin gücü tamamen 0 olmadığı için ER faktörünün oluşumu söz konusudur. ER , çoğunlukla $10 \log (ER)$ dönüşümü ile dB biriminde kullanılır. Direkt modüle edilmiş lazerlerde ER değeri, 9 dB ile 14 dB arasında değer alırken, harici modüle edilmiş lazerlerde 15 dB değerini geçer. SONET / SDH'lerde ise ER faktörü, 8.2 dB ile 10 dB arasındadır (Säckinger, 2005).

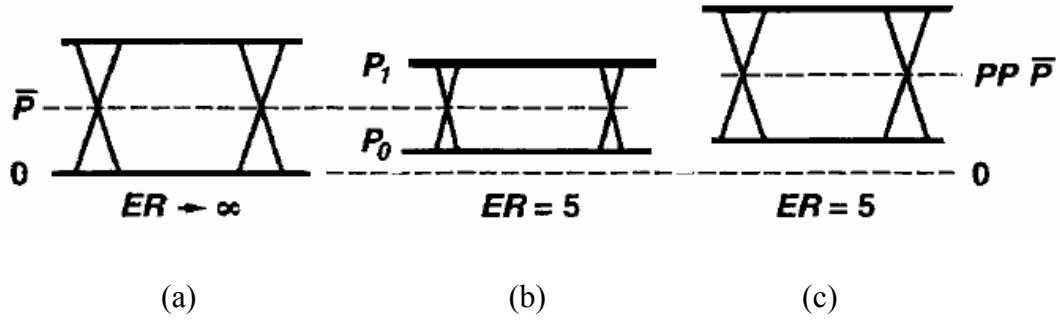
ER 'nin sonsuz olmadığı durumlarda, PP , güç cezası olarak adlandırılan ve

$$PP = \left[\frac{ER+1}{ER-1} \right] \quad (3.9)$$

formunda ifade edilen bir güç kaçağı meydana gelir. Şekil 3.7(a) ve Şekil 3.7(b)'de, ortalama güç,

$$\bar{P} = \frac{P_0 + P_1}{2} \quad (3.10)$$

olarak sabit kaldığı halde ER faktörünün azalmasının orijinal işaretin salınımını azalttığı görülmektedir. Bunun yanısıra amaç, orijinal işaret salınımının korunması ise, Şekil 3.7(c)'de görüldüğü gibi ortalama gücün yüksek tutulması gerekir. Şekil 3.7(b) ve Şekil 3.7(c)'de gösterilen ER faktörü sabit olmasına karşın ortalama güç yükseltilerek orijinal işaret korunur (Säckinger, 2005).



Şekil 3.7 ER faktörü ve güç cezası ilişkilendirilmesi (Säckinger, 2005).

3.4 Modülatör Çeşitleri

3.4.1 Genlik Modülatörü

Bu modelde optik taşıyıcı elektriksel modülasyon işareti ile harici olarak modüle edilir. Optik giriş işaretinin E_{in} olduğu varsayılırsa, çıkış işareti,

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \sqrt{Mod(t)} \quad (3.11)$$

olarak ifade edilir.

MI modülasyon indeksi ve $Modülasyon(t)$, elektriksel giriş işareti olmak üzere $Mod(t)$,

$$Mod(t) = (1 - MI) + MI \cdot Modülasyon(t) \quad (3.12)$$

Burada MI modülasyon indeksi 0 ile 1 aralığında değer alır.

3.4.2 Faz Modülatörü

Bu modelde, elektriksel modülasyon işareti, optik taşıyıcıya belli bir faz ekleyerek taşıyıcının fazını da modüle eder. Optik giriş işaretinin E_{in} olduğu varsayılırsa, çıkış işareti,

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \sqrt{Mod(t)} \exp[j \cdot \Delta\Phi \cdot Modülasyon(t)] \quad (3.13)$$

olur.

Burada E_{out} çıkış optik işareti, $\Delta\Phi$ faz farkı ve $Modülasyon(t)$ elektriksel giriş işaretidir.

3.4.3 Elektrooptik Faz Modülasyonu

Elektrooptik faz modülatöründe, optik faz modülasyonu, kristalin kırılma indisi $\Delta n(t)$ kadar değiştirilerek gerçekleştirilir. Bu değişim, optik yol uzunluğu elastikliğinde değişime neden olur. Faz,

$$\Phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} L \Delta n(t) \quad (3.14)$$

şeklinde yazılır. Burada, L aletin boyu ve λ ise aletin boyundan oldukça küçük olan optik dalga boyudur. Kırılma indisindeki hafif değişimler büyük miktarda faz değişimine neden olur. $L=5\text{mm}$ ve $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 'de işlev gören bir alet için, $\Delta n=1.3 \times 10^{-4}$ kırılma indisi değişikliği ile π radyanlık faz kayması elde edilir (Udd, 1991).

Elektrooptik modülatörlerde, indis değişimi kristal boyunca bir elektrik alan uygulanarak elde edilir. Kristalin elektrooptik kırılma indisi değişimi, uygulanan elektrik alan ile doğrudan orantılıdır. Kırılma indisi değişimi,

$$\Delta n(t) = \frac{n^3 m}{2} E \quad (3.15)$$

dır. Burada, m elektrooptik katsayıdır. Elektrotlar boyunca uygulanan $V(t)$ gerilimi $E=V(t)/dm$

şeklinde ifade edilen düzgün bir alanın oluşmasına neden olur. d_m kristalin kalınlığı olmak üzere,

$$\Phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n^3 m}{2} \frac{L}{d_m} V(t) \quad (3.16)$$

dir.

3.4.4 Frekans Modülatörü

Bu modelde, elektriksel modülasyon işareti, optik taşıyıcı işaretine frekans modülasyonu uygular. Optik giriş işaretinin E_{in} olduğunu varsayarsak çıkıştaki optik işaret,

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \exp \left[j.2\pi \int_0^t \Delta f(modülasyon(t) - 0.5) d\tau \right] \quad (3.17)$$

olarak ifade edilir. Burada E_{out} çıkış optik işareti, Δf faz farkı ve $modülasyon(t)$ elektriksel giriş işaretidir.

3.4.5 EML Modülatörü (Electroabsorption Modulator)

Şekil 3.8’de genel yapısı verilen elektroabsorbe modülatörler (EML), bir p-n jonksiyonu ve jonksiyonlar arasında yer alan aktif yarıiletken bölgeden oluşur.



Şekil 3.8 EML'nin genel yapısı.

Modülatöre uygulanan gerilim, açık-kapalı (on/off) durumları için 1,5 V ile 4 V arasında

değer alır. *ER* faktörü, modülatör içindeki aktif bölgenin sadece absorbe karakteristiğini değil, kırılma indisini de modüle etmesi ve dolayısıyla cıvıltının meydana gelmesi nedeniyle, 11 dB ile 13 dB arasında dinamik olarak değişir. Oluşan cıvıltı, direkt modüle lazerlerdekinden çok daha azdır. Bu modülatörde cıvıltıyı minimum yapmak için 0 - 1 V aralığında bias gerilimi de uygulanabilir.

Modülatör çıkışındaki elektrik alanın, girişteki elektrik alan ifadesiyle olan bağıntısı,

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \sqrt{Mod(t) e^{j \frac{\alpha}{2} \ln[Mod(t)]}} \quad (3.18)$$

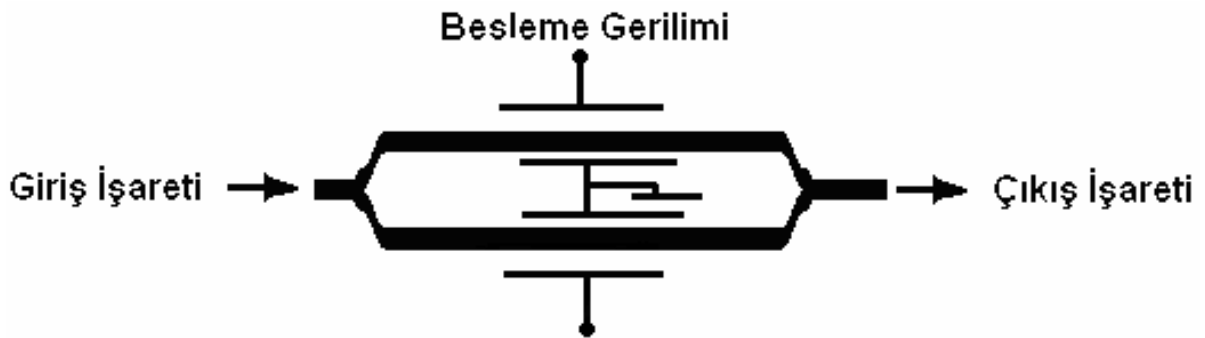
şeklindedir. Burada, *Modülasyon(t)* elektriksel giriş işareti ve *MI*, modülasyon indeksi olmak üzere *Mod(t)*,

$$Mod(t) = (1 - MI) + MI \cdot Modülasyon(t) \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilir (Optiwave,2008).

3.4.6 Mach-Zender Modülatörü

Mach-Zender modülatör, girişteki optik işareti Şekil 3.9’da görüldüğü gibi iki eşit kola ayırır ve modülatör çıkışında, işareti, faz kayması ile tekrar elde eder. İki kol arasındaki faz farkı 0 ise, çıkış işaretinin yoğunluğu maksimum olur, 180 derece ise minimum, bir başka ifadeyle 0 olur.



Şekil 3.9 Mach-Zender modülatörün genel yapısı.

Mach-Zender modülatöründe, çıkış gücü, V_m , dalga kılınuzuna uygulanan giriş gerilimi ve V_π ise anahtarlama gerilimi olmak üzere,

$$P_0 = P_i \left[1 + \cos\left(\pi \frac{V_m}{V_n}\right) \right] \quad (3.20)$$

dir ve modölatörün iki koluna uygulanan gerilime bağı olarak 0 ile $2P_i$ arasında değer alır (DeCusatis, 2007). Modölatörün çıkışındaki güç,

$$E_{out} = E_{in}(t) \cos[\Delta\theta(t)] e^{j\Delta\phi(t)} \quad (3.21)$$

dir. Burada, modölatörün iki kolu arasındaki faz farkı $\Delta\theta(t)$, ER (Extinction Ratio), sönümleme oranını, $Mod(t)$, elektriksel giriş işaretini göstermek üzere,

$$\Delta\theta(t) = \frac{\pi}{2} \{0.5 - ER[Mod(t) - 0.5]\} \quad (3.22)$$

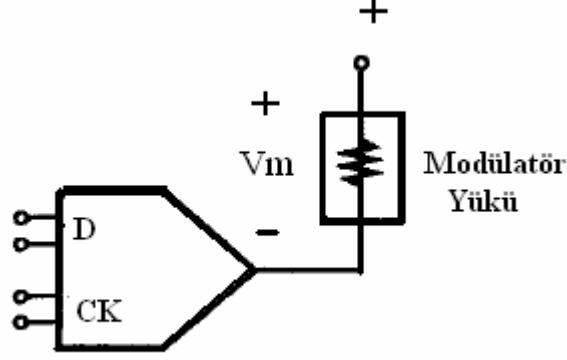
dir. Optik işaretin faz değişimi $\Delta\phi(t)$ ise, SF , simetri faktörü olmak üzere,

$$\Delta\phi(t) = SC \cdot \Delta\theta(t) \frac{1 + SF}{1 - SF} \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir (Säckinger, 2005). Burada, SC , negatif işaret cıvıltı faktörüdür; bu değer, SC aktif ise -1, değilse 1 olarak kabul edilir.

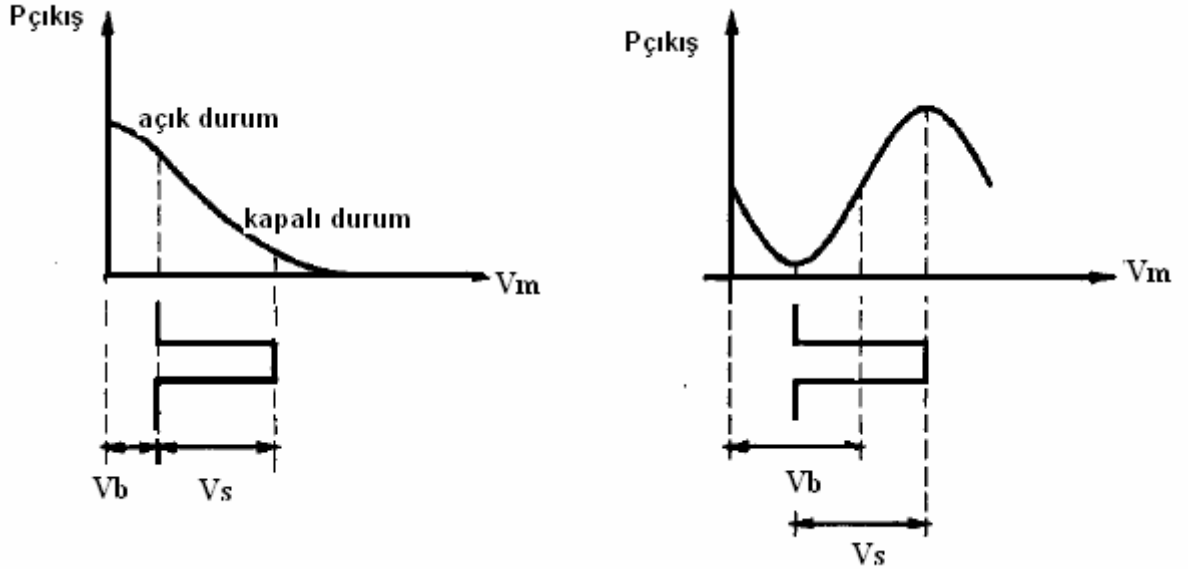
3.5 Modölasyon ve Bias Voltaj Aralığı

Bir modölatör sürücüsünde giriş ve çıkış işareti basitçe Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu gösterimde, D (data) veri girişleri CK (clock) ise zamanlama için saat girişleridir. Modölatör sürücüsü çıkışta modölatör boyunca $V_m(t)$ gerilimini üretir. Şekil 3.10'daki giriş ve çıkışlara ek olarak modölatör gerilim seviyesini kontrol altında tutan girişler, darbe-genlik bozulmalarını kompanze eden girişler ve bunları tamamlayıcı çıkışlar mevcuttur.



Şekil 3.10 Tek sonlu modülatör sürücüsü.

Modülasyon gerilimi V_s , modülatör sürücüsünün açık-kapalı (on-off state) olduğu durumlarda sağladığı gerilim farkıdır. Bu aynı zamanda Şekil 3.11’de gösterildiği gibi modülatördeki gerilim salınımidir. Bias gerilimi V_b ise; EML modülatörlerde, modülatör sürücüsünün açık olduğu durumda (on state) modülatöre sağladığı gerilimdir. Mach-Zender modülatörlerde ise durum biraz daha farklıdır, V_b sürücü tarafından sağlanan ortalama gerilimdir. Şekil 3.11’de EML ve Mach-Zender modülatörler için V_m , V_s , V_b ve çıkış gücü ilişkisi yer almaktadır.



(a) EML modülatör karakteristiği.

(b) Mach-Zender Modülatör karakteristiği.

Şekil 3.11 Modülatör ve bias gerilimi ilişkisi.

Bir EML modölatörde kabul edilebilir bir sönümleme oranı (ER) için gerilim salınımı modölatörün anahtarlama gerilimine eşit veya büyük olmalıdır. Bias gerilimi modölatörlerde cıvıltı (chirp) faktörünü minimum hale getirmek için kullanılır. Modölatörün p-n jonksiyonuna negatif yönde uygulanan dengeli bir bias gerilimi band genişliğini daraltarak cıvıltı etkisini azaltır. Bias gerilimi, çoğunlukla 0-1 V aralığında küçük bir değerdir. Mach-Zender modölatörlerde ise ideal bias gerilimi, anahtarlama gerilim eğrisinin ortasında olmalıdır; çoğunlukla bu orta noktada bias gerilimi üreten otomatik bias denetleyicisi kullanılır.

Mach-Zender ve EML modölatör sürücöleri için modölasyon geriliminin tipik değerleri,

EML sürücö : $V_s = 0,2...3V$

Mach-Zender sürücö: $V_s = 0,5...5V$

dir. Mach-Zender ve EML modölatör sürücöleri için bias geriliminin tipik değerleri,

EML sürücö : $V_b = 0,2...3V$

Mach-Zender sürücö : $V_b = 0,5...5V$

dir.

3.6 Işık Kaynakları

Işık kaynağının temel görevi, elektriksel enerjiyi ışık enerjisine dönöştürmektir. Başka bir deyişle, ışık kaynakları optik fiber sensörlere ışık sağlamak için kullanılır (Udd, 1991). Yarıiletken temelli optik kaynaklar, boyut ve fiyat açısından avantajlar sunar. Yaygın olarak kullanılan ve ışık yayan diyot (LED / Light Emitting Diode) ve uyarılmış ışığı salınım ile çoğaltan diyot (LASER / Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Diode) olmak üzere iki tip yarıiletken ışık kaynağı vardır.

Soğurma, kendiliğinden ışıma ve uyarılmış ışıma, ışık kaynaklarının temelini oluşturan mekanizmalardır.

3.6.1 Soğurma ve Işıma

Kuantum teorisine göre, atomlar farklı enerji seviyelerinde bulunur ve ışık soğurma ve ışıma ile bir enerji seviyesinden diğerine geçiş yapar. Bu seviyelerin enerjileri, artan bir şekilde e_1 , e_2 , e_3 e_n olarak ifade edilir (Dakin ve Culshaw, 1988). Bu enerji seviyeleri arasında;

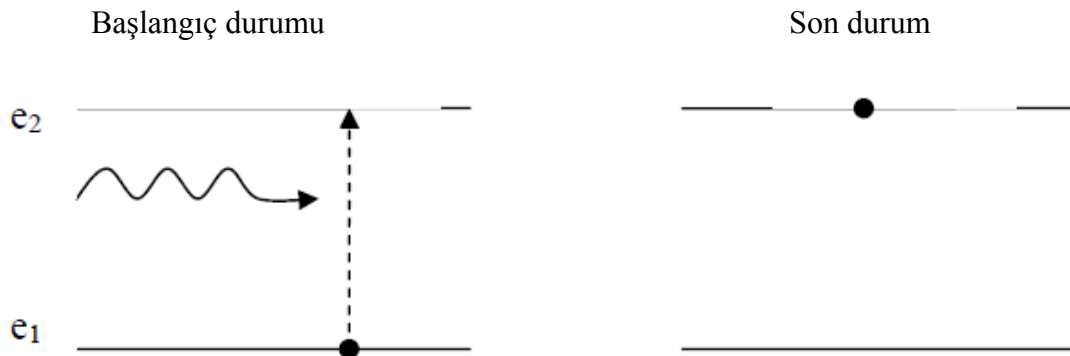
$$\frac{e_i}{e_j} = \exp\left(-\frac{e_i - e_j}{\tilde{k}T}\right) \quad (3.24)$$

şeklinde bir ilişki vardır. Burada $\tilde{k} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. $j > i$ olmak üzere enerji seviyeleri arasındaki fark,

$$h.f_{ij} = e_i - e_j \quad (3.25)$$

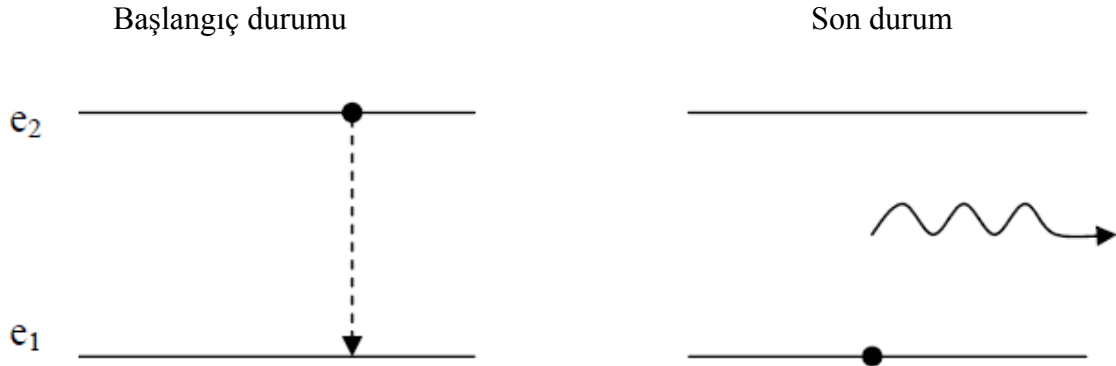
şeklinde ifade edilir. Burada h değeri Planck sabiti, f_{ij} ise enerji seviyeleri arasındaki frekans farkını ifade eder.

Şekil 3.12’de görüldüğü gibi, yayılan bir foton enerjisini bir alt enerji seviyesinde bulunan elektrona bırakır ve böylece onu daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarır. Bu olaya soğurma (absorption) adı verilir.



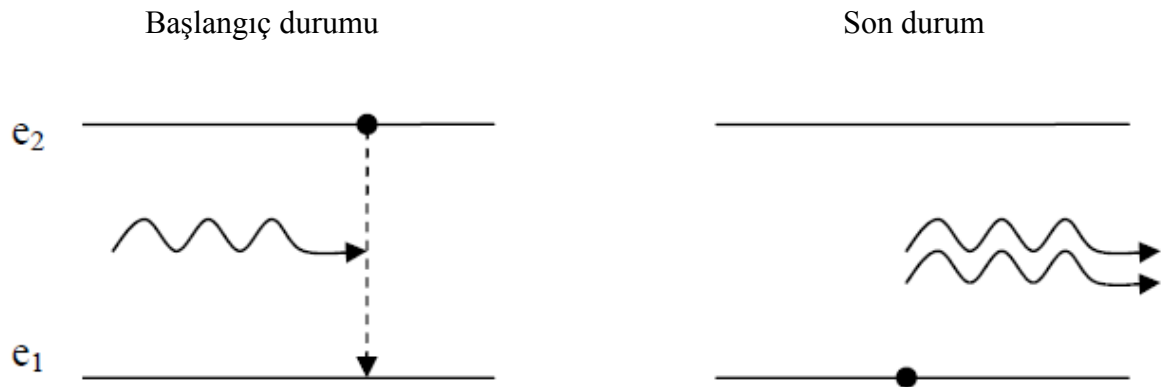
Şekil 3.12 Soğurma (emme) olayı.

Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, uyarılmış bir atomun, her hangi bir dış etki olmaksızın bir foton yayarak bir alt enerji seviyesine geçiş yapmasına kendiliğinden ışıma (kendiliğinden emisyon) denir.



Şekil 3.13 Kendiliğinden ışıma (spontaneous emission) olayı.

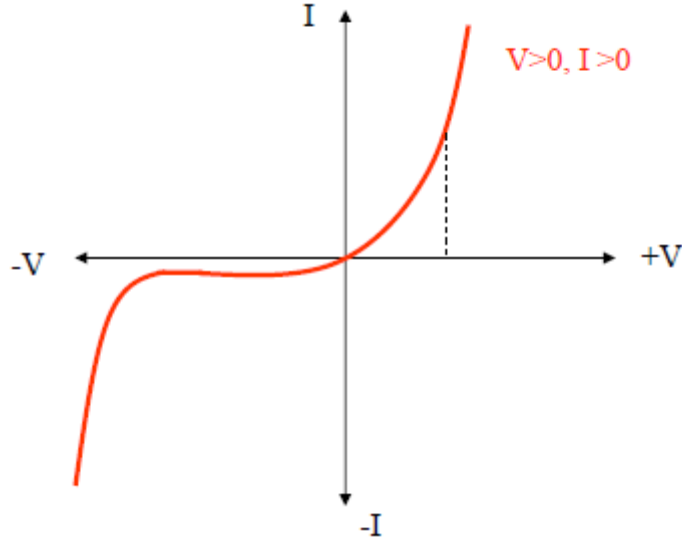
Şekil 3.14'te görüldüğü gibi e_2 enerji seviyesinde bulunan bir atomun üzerine elektromagnetik dalga gönderildiğinde, bir alt enerji seviyesine geçmesi durumunda ayrıca bir foton daha yayar. Bu olay uyarılmış ışıma (uyarılmış emisyon) olarak adlandırılır.



Şekil 3.14 Uyarılmış ışıma (stimulated emission) olayı.

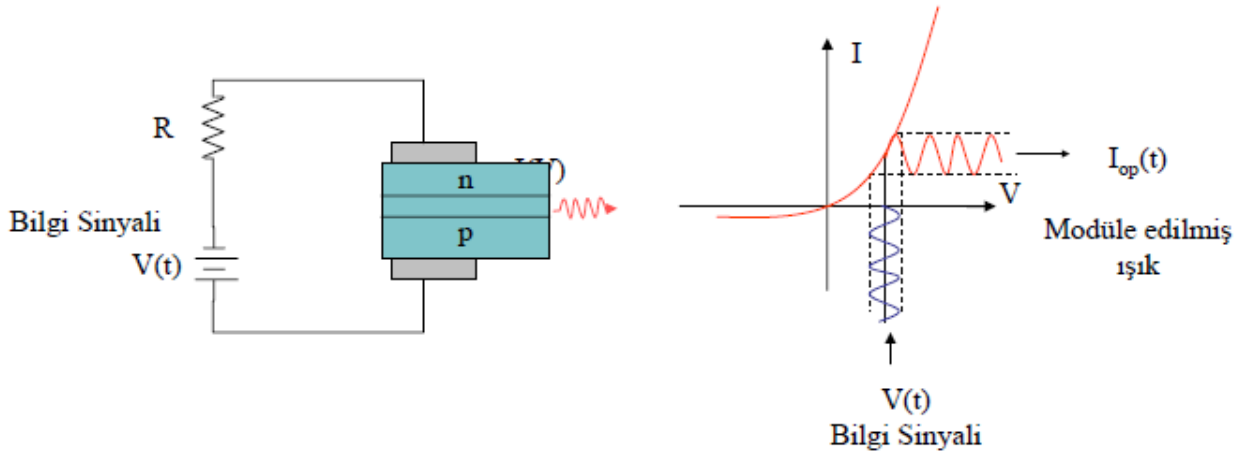
3.6.2 Işık Yayan Diyot (LED)

Işık yayan diyotlar, kendiliğinden ışıma mekanizmasını kullanan p-n eklem diyodudur. Uygun bir p-n eklemi, şekil 3.15'te gösterildiği üzere, I-V eğrisinin I. bölgesinde çalıştırılırsa, eklem tüketim bölgesinde elektron ve delikler belli bir eşik geriliminin üstünde eklem bölgesinde birleşerek dalgaboyu band aralığına eşit ışık yayabilir.



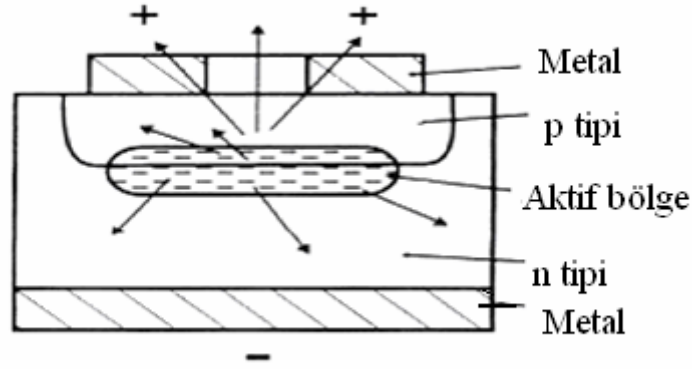
Şekil 3.15 LED'lerin akım-gerilim eğrisi (I-V eğrisi).

Diyotlar, akım-gerilim eğrisinin doğrusal olduğu aralıkta ışık modülatörü olarak kullanılabilir. Bu aralıkta gerilimin değişimi ile LED ışık şiddeti doğrusal olarak değişebilir. Şekil 3.16'da LED modülatörlerin karakteristiği yeralmaktadır.

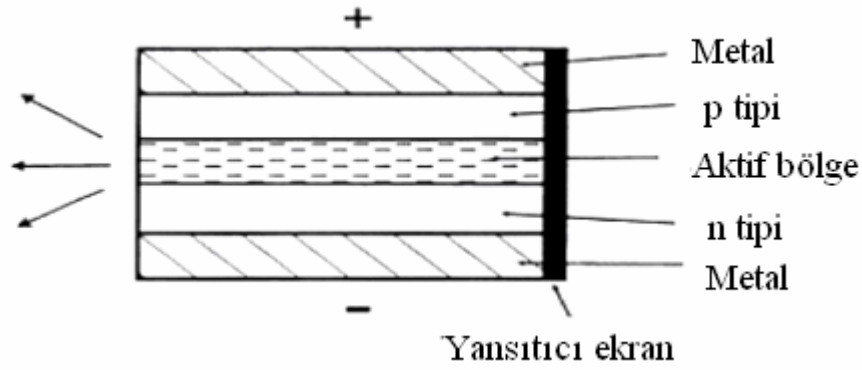


Şekil 3.16 LED modülatörlerin karakteristiği.

Çoğunlukla yakın kızılötesi ve görünür bölgede çalışan LED'ler, çok az ısı üreten ve az güç gerektiren katı hal elemanlarıdır ve genellikle çok modlu optik fiber kullanan sensör yapılarında kullanılır. Işık üretmek için bozulan maddelere bağımlılığı olmadığı için LED'ler uzun ömürlüdür. Şekil 3.17'de yüzey emisyonlu LED ve Şekil 3.18'de kenar emisyonlu LED yapısı görülmektedir.



Şekil 3.17 Yüzey emisyonlu LED.



Şekil 3.18 Kenar emisyonlu LED.

3.6.3 Lazer Diyot

Lazer diyotlar, belli bir eşik akımının altında LED'ler gibi davranan elamanlardır. Lazer kaynağı olarak kullanılan malzemenin ve yapısını oluşturan atomların en son yörüngelerindeki elektronlarının dışarıdan enerjilendirilerek (pumped) bir üst yörüngeye çıkması sağlanır. Verilen enerji kesildiği zaman elektron, bir alt yörüngeye düşerek tekrar kararlı konumuna geçer ve bu sırada kazanmış olduğu enerjiyi foton şeklinde yayar. Yayılan bu enerji, lazer kaynağının iki tarafında bulunan yansıtıcı aynalar vasıtası ile kendi ortamında döndürülür. Bu işlem elektronların tekrar tekrar uyarılması ile devam eder. Böylece eş fazda şiddeti çok artarak uyarılmış ve o atomun frekans ve buna bağlı olarak renk karakteristiklerini taşıyan güçlü bir ışınım, bir başka ifadeyle foton demeti elde edilir. Tek dalga boyunda yoğunlaştırılarak yönlendirilmiş lazer ışığı bir ayna yardımı ile açığa çıkar.

Lazer diyotlar, yarı iletken malzemelerin arasına yerleştirilmiş farklı bir yarıiletken malzemedir. Lazer diyotların yüksek yoğunluklu ışık yayma, ışığı iyi bir şekilde

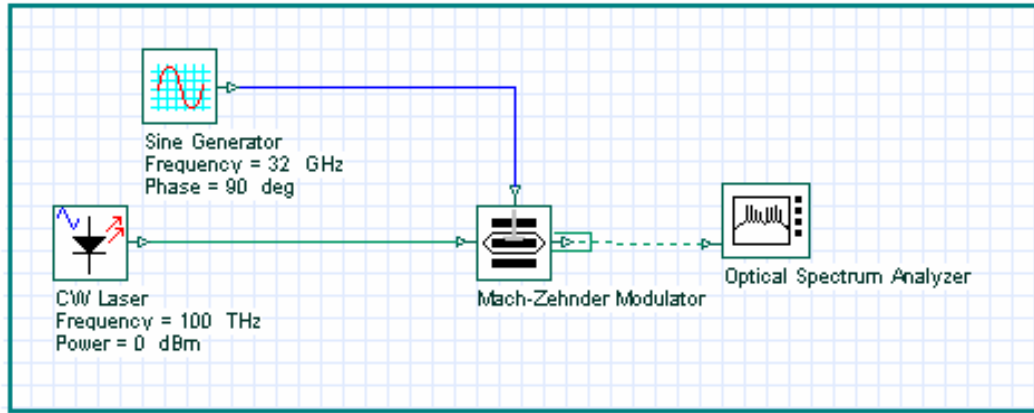
odaklayabilme, yüksek modülasyon genişliğine sahip olma ve eş fazlı radyasyon özelliğinin bulunması gibi LED'lere göre üstünlükleri vardır ancak LED'ler, daha uzun ömürlü, daha ucuz ve ısıya karşı daha az duyarlıdır.

4. OPTİK MODÜLATÖR SİMÜLASYONU VE ANALİZİ

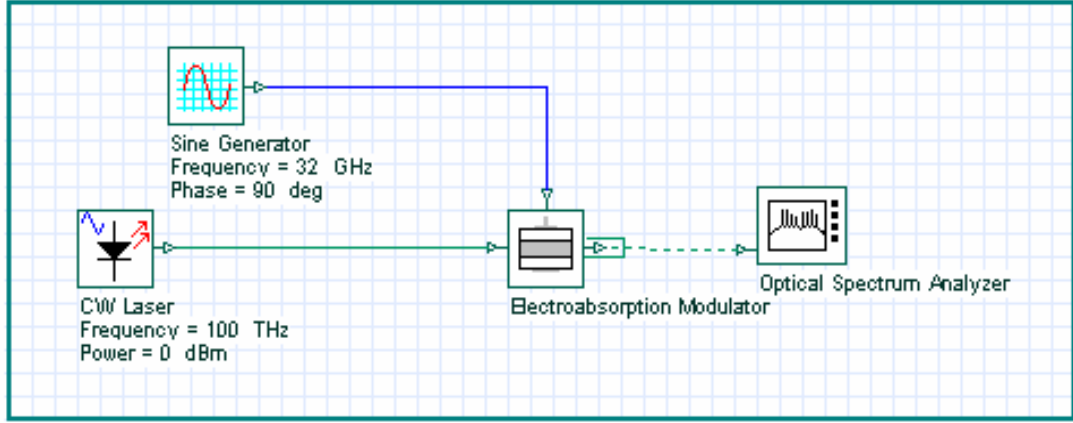
Bu bölümde, OptiSytem 7.0 simülasyon yazılımı kullanılarak endüstride yaygın olarak kullanılan optik modülatörlerden Mach-Zender ve EML modülatörlerinin performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve gürültü işaretinin modülatör performansına etkisi analiz edilmiştir. Bunun yanısıra modülatör performansı üzerinde etkili olan cıvıltı faktörünün *ER* faktörü, ortalama güç ve bias gerilimine bağlı değişimi incelenmiştir. Endüstrideki kullanım şekli ile ışık kaynağı ile modülatör arasına 50 km uzunluğundaki optik fiber eklenerek yol kaybı hesabı ve yol boyunca gürültü işareti propagasyonu değerlendirilmiştir.

4.1 Mach-Zender ve EML Modülatörlerinin Performans Karşılaştırması

Bu bölümde yer alan iki simülasyonda da kaynak işareti olarak sürekli işaretli (Continuous Wave,CW) lazer kullanılmış ve giriş işaretinin frekansı, gücü ve modülatörün besleme kaynağı Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de de görüldüğü üzere sabit tutulmuştur. Böylelikle tek değişken olan modülatör tipinin değişmesinin çıkış işaretine etkisi modülatör çıkışında kullanılan spektrum analizörü aracılığı ile incelenmiştir.



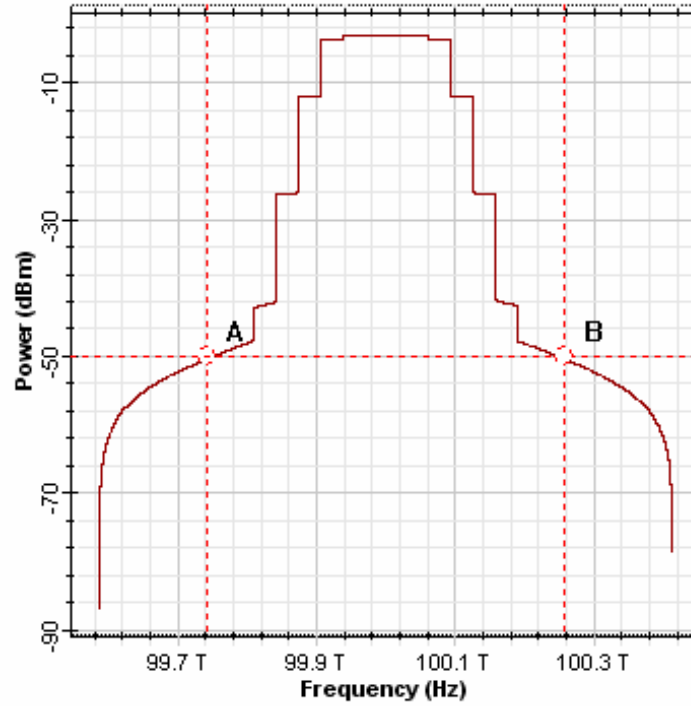
Şekil 4.1 Mach-Zender tasarımı.



Şekil 4.2 EML tasarımı.

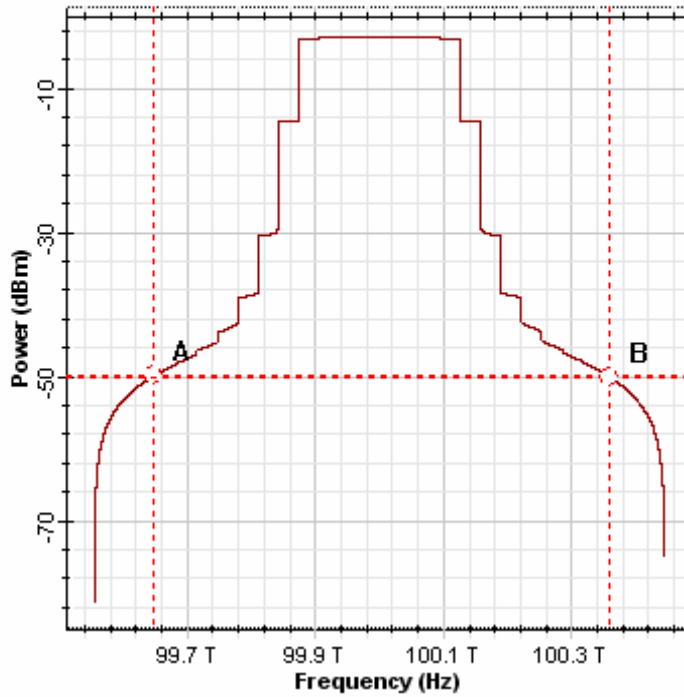
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de bulunan tasarımların çıkış işareti, diğer bir deyişle spektrum analizöründeki görüntüsü ise Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te verilmiştir.

Optical Spectrum Analyzer



Şekil 4.3 Mach-Zender modülörün çıkış gücü.

Optical Spectrum Analyzer



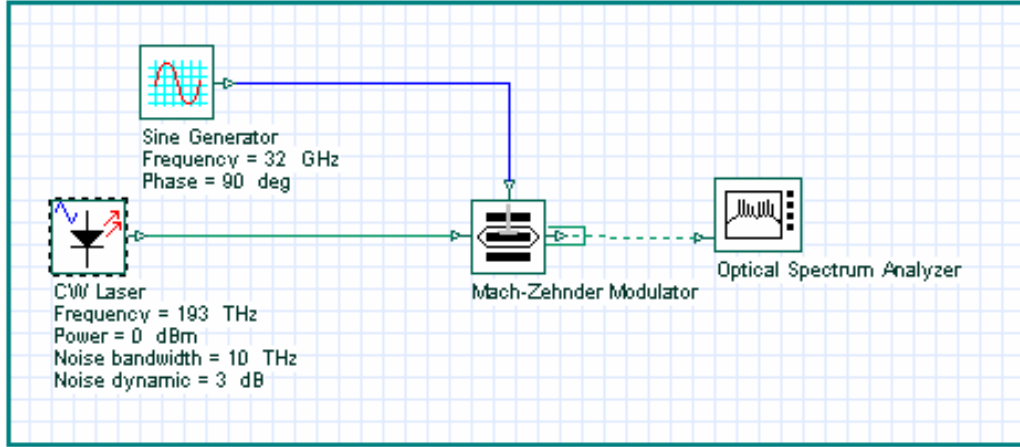
Şekil 4.4 EML modülatörün çıkış gücü.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te çıkış işaretinin gücünde ciddi bir değişim olmamakla beraber işaretin frekans bandı üzerindeki genişliğinin, band genişliğinin EML modülatöründe daha fazla olduğu gözlenmektedir. Her iki simülasyonda da çıkış gücünün -50 dBm olduğu noktaların frekans bandı üzerindeki izdüşümü alınarak bu saptama yapılmıştır. EML modülatörü çıkışında, işaretin frekans bandı üzerindeki yeri 99.64 THz ile 100.36 THz arasında olup band genişliği 0.72 THz iken, Mach-Zender modülatörü çıkışında işaretinin frekans bandı üzerindeki yeri 99.74 THz ile 100.26 THz arasında olup işaretin band genişliği 0,52 THz dir. Sonuç olarak cıvıltı faktörünün etkisinin, EML modülatöründe daha fazla olduğu izlenmiş ve bu durumun, EML'yi ideal modülatör karakteristiğinden uzaklaştırdığı belirlenmiştir.

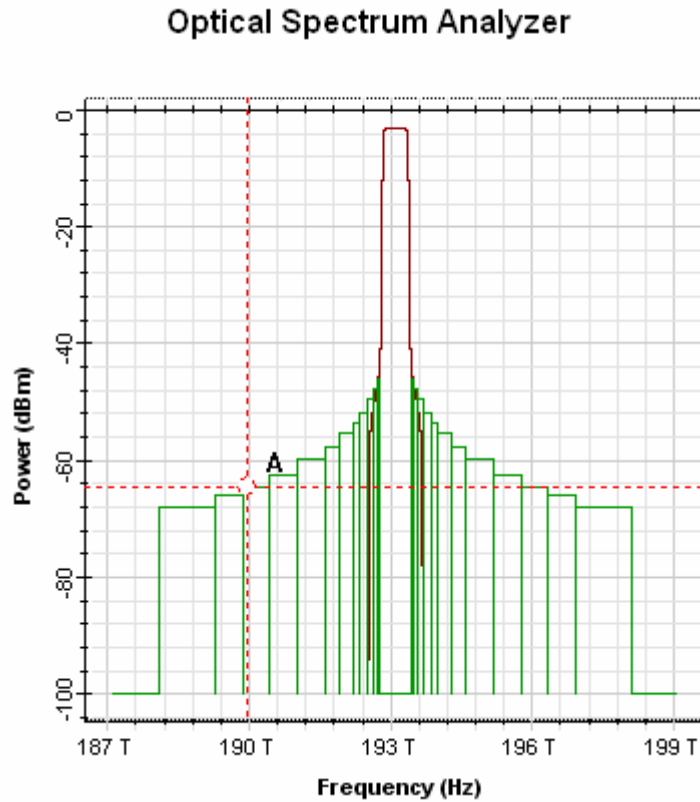
4.2 Mach-Zender ve EML Modülatörlerinde Gürültü Analizi

Bu bölümde, 4.1 bölümünde yer alan tasarımlara ek olarak giriş işaretinde belli oranda gürültü eklenerek Mach-Zender ve EML modülatör karakteristikleri incelenmiştir. Şekil 4.5'te bulunan düzenekte Mach-Zender modülatörünün giriş işaretine 10 THz frekanslı gürültü

işareti eklenmiş ve çıkış işaretindeki gürültü gücü incelenmiştir. Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi, 190 THz frekanslı giriş işareti için optik spektrum analizöründe izlenen çıkış gücünün -64 dBm olduğu saptanmıştır.



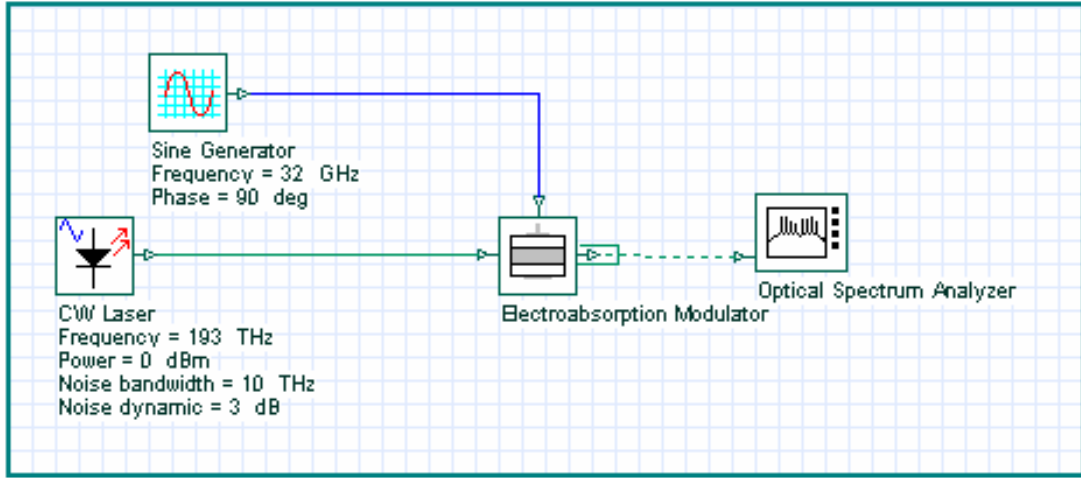
Şekil 4.5 Mach-Zender modülatöründe gürültünün etkisinin incelendiği düzenek.



Şekil 4.6 Mach-Zender modülatöründe gürültü karakteristiği.

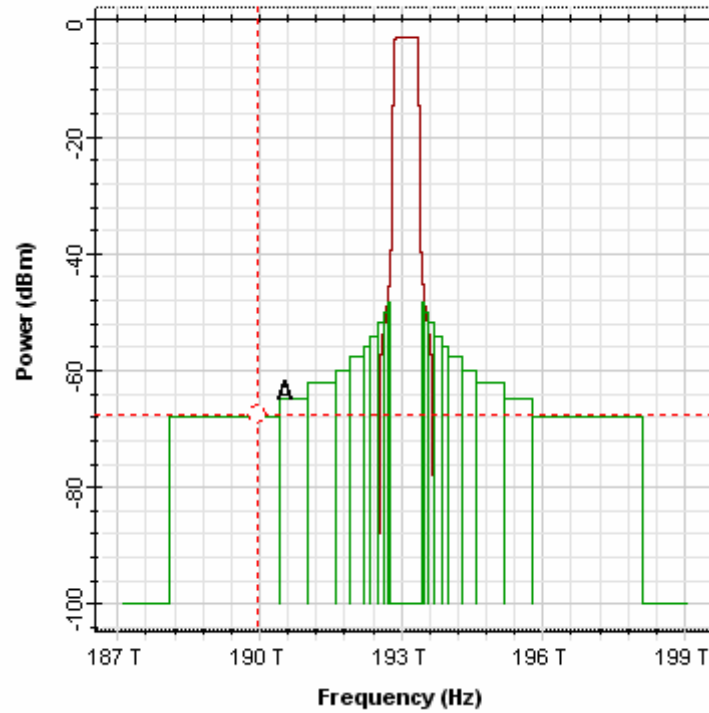
Şekil 4.7'de yer alan düzenekte EML modülatörüne 193 THz frekanslı giriş işareti ve 10 THz frekanslı gürültü işareti uygulanmış olup çıkış işaretindeki gürültü gücü incelenmiştir. Şekil

4.8’de görüldüğü gibi, 190 THz frekanslı giriş işareti için optik spektrum analizöründe izlenen çıkış gücünün, -68 dBm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7 EML’de gürültünün etkisinin incelendiği düzenek.

Optical Spectrum Analyzer



Şekil 4.8 EML’de gürültü karakteristiği.

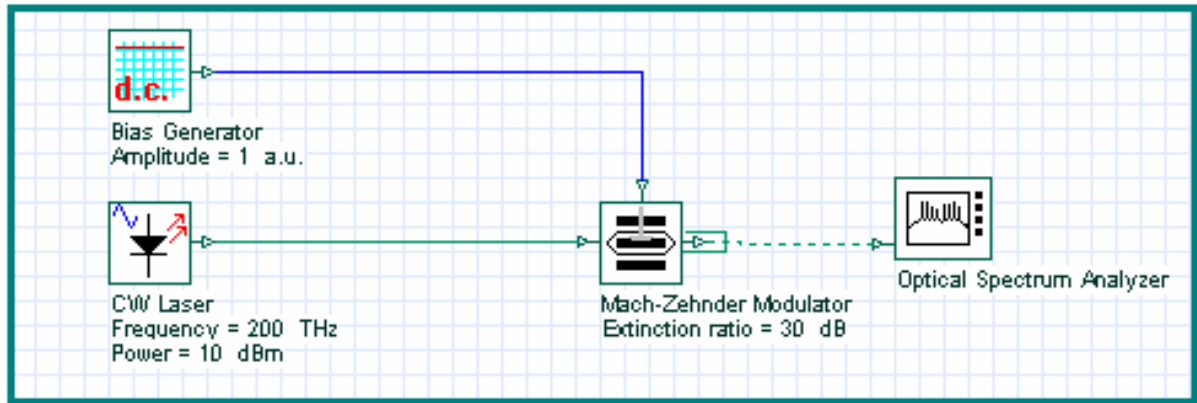
Şekil 4.5 ve Şekil 4.7’de yer alan düzeneklerde giriş işaretinin gürültülü olması durumunda,

Mach-Zender modülatörü ve EML’nin çıkış işareti incelenmiştir. Her iki modülatörde, 193

THz frekanslı giriş işaretine 10 THz frekanslı gürültü işareti eklenmiş ve çıkış işaretindeki gürültü gücünün, Mach-Zender modülatöründe daha fazla olduğu görülmüştür. 190 THz'deki gücün, Mach-Zender modülatöründe -64 dBm, EML'de ise -68 dBm olduğu izlenmiştir. Giriş işaretinde gürültü olması durumunda Mach-Zender modülatörünün çıkışındaki gürültünün daha fazla olması bu modülatörlerin ideal gürültüsüz ortamlar için daha elverişli olduğunu göstermektedir.

4.3 Optik Modülatörlerde Sönümlenme Etkisi Analizi

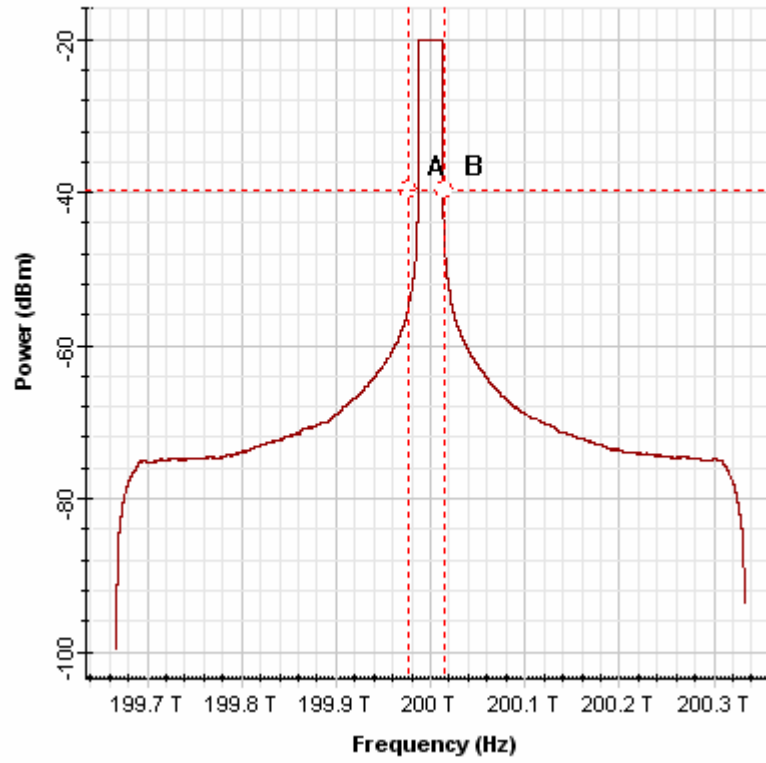
Bu simülasyonlarda 3. bölümde teorik analizleri verilen *ER* faktörünü irdelemek için OptiSystem 7.0 simülatör yazılımı kullanılarak farklı *ER* değerine sahip olan Mach-Zender modülatörünün çıkış gücü karakteristikleri değerlendirilmiştir. Mach-Zender modülatörü girişinde, 10 dBm güce sahip olan ve 200 THz frekansında çalışan standart bir sürekli işaretli lazer kullanılmıştır. Şekil 4.9'da 30 dB'lik *ER* faktörüne sahip olan düzenek hazırlanarak düzeneğin çıkış gücünün karakteristiği optik spektrum analizöründe gözlenmiş ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.11'de ise diğer parametreler sabit tutulmak koşuluyla *ER* faktörü 5 dB olan düzenek hazırlanarak düzeneğin çıkış gücü karakteristiği optik spektrum analizöründe izlenmiştir. Çıkış gücünün frekansa göre değişimi Şekil 4.12'de görülmektedir.



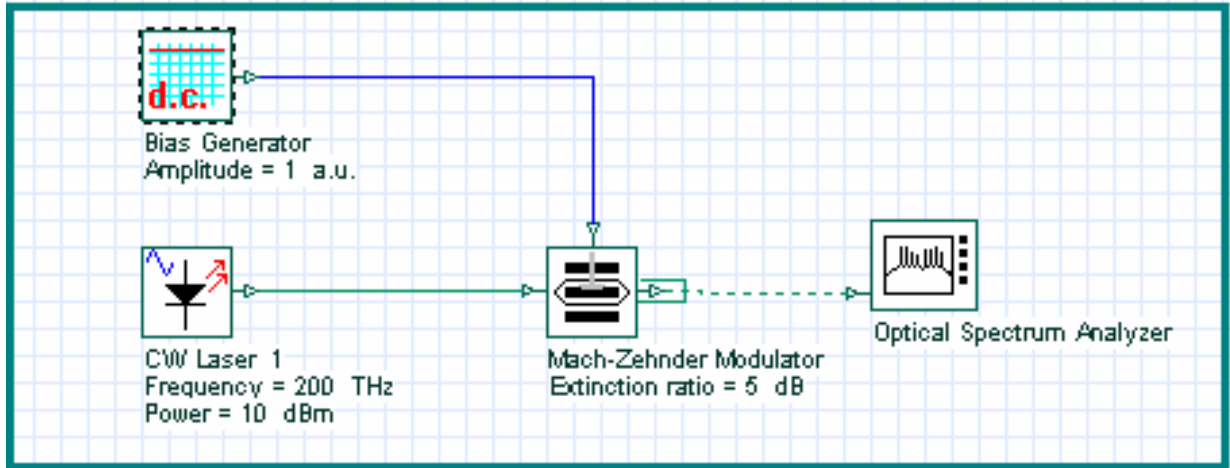
Şekil 4.9 *ER* faktörü 30 dB olan düzenek.

Şekli 4.9'da yeralan spektrum analizörünün çıktısı, Şekil 4.10'da verilmiş ve işaretin frekans bandı üzerindeki genişliğini doğru gözlemlemek adına gücün -40 dBm olduğu yerdeki A ve B noktaları işaretlenmiştir.

Optical Spectrum Analyzer

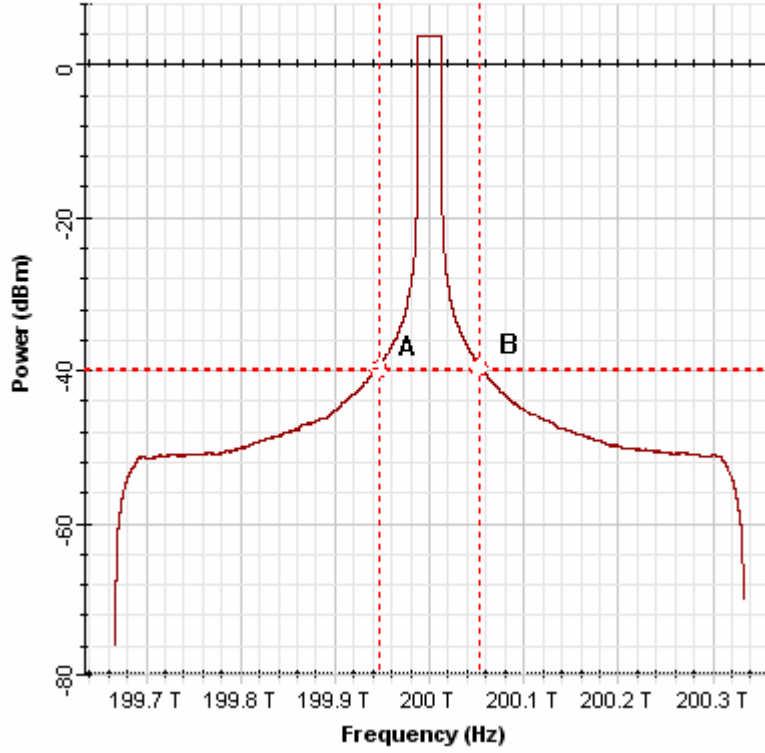


Şekil 4.10 *ER* faktörü 30 dB olan düzeneğin çıkış gücü.



Şekil 4.11 *ER* faktörü 5 dB olan düzenek.

Optical Spectrum Analyzer



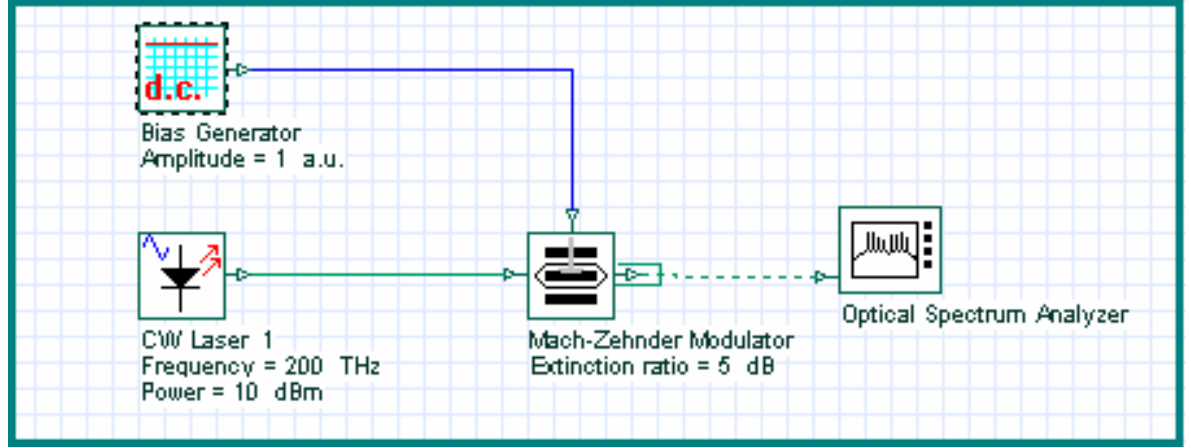
Şekil 4.12 ER faktörü 5 dB olan düzeneğin çıkış gücü.

Bu bölümdeki simülasyonlarda, optik haberleşmenin temel elemanları arasında yer alan ve endüstride yaygın olarak kullanılan Mach-Zender modülatörü üzerinde ER faktörü etkisi analiz edilmiştir. Şekil 4.12’de çıkış gücünün -40 dBm olduğu noktada çıkış işaretinin frekans bandı üzerindeki yeri 199.95 THz ile 200.05 THz arasında olup band genişliği 0.1 THz iken, Şekil 4.11’de çıkış gücünün -40 dBm olduğu noktada çıkış işaretinin frekans bandı üzerindeki yeri 199.98 THz ile 200.02 THz arasında olup band genişliğinin 0.4 THz olduğu saptanmıştır. OptiSystem 7.0 simülatör yazılımı ile hazırlanan düzeneklerde ideal koşullarda sonsuz olan ER ’nin değerinin artması durumunda, orijinal işaretin daha iyi korunduğu ve cıvıltı faktörünün minimum hale getirildiği sonucu elde edilmiştir ve bu düzenek için ER faktörünün 5 dB’den 30 dB’ye çıkarılmasının frekans bandında % 60’a varan bir kazanç sağladığı gözlenmiştir. Daha verimli modülatörler için ER faktörünün olabildiğince yüksek tutulması gerektiği belirlenmiştir (Tarı ve Ünverdi, 2010).

4.4 Optik Modülatörlerde Ortalama Gücün Çıkış İşaretine Etkisi

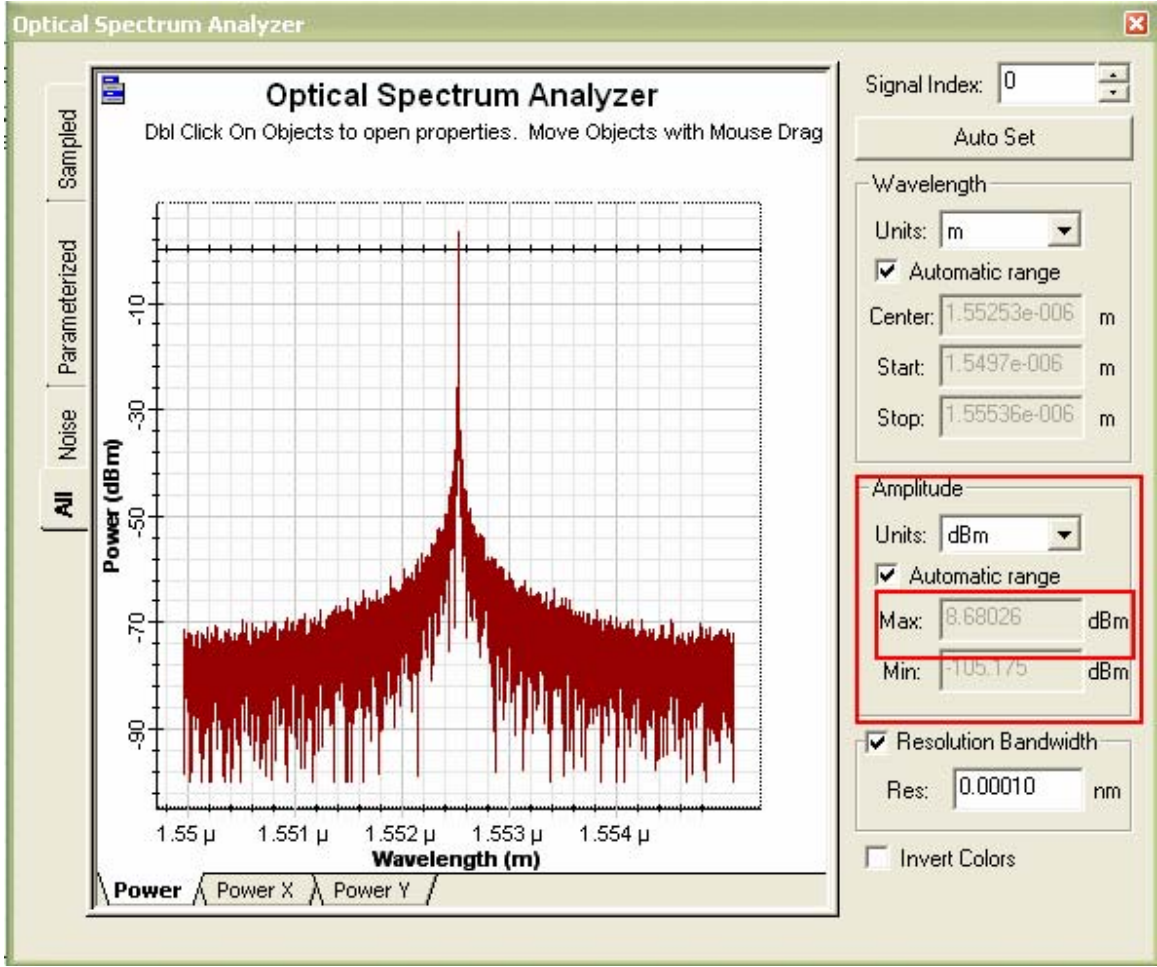
Bu bölümdeki tasarımlarda, ER faktörü sabit tutularak ortalama güç artışının orijinal işaretin

salınımına etkisi incelenmiştir. Ortalama gücün etkisini görmek amacıyla Şekil 4.13'te yer alan ve giriş gücü 10 dBm olan düzenek simüle edilmiş ve düzeneğin çıkış karakteristiği Şekil 4.14'te verilmiştir.



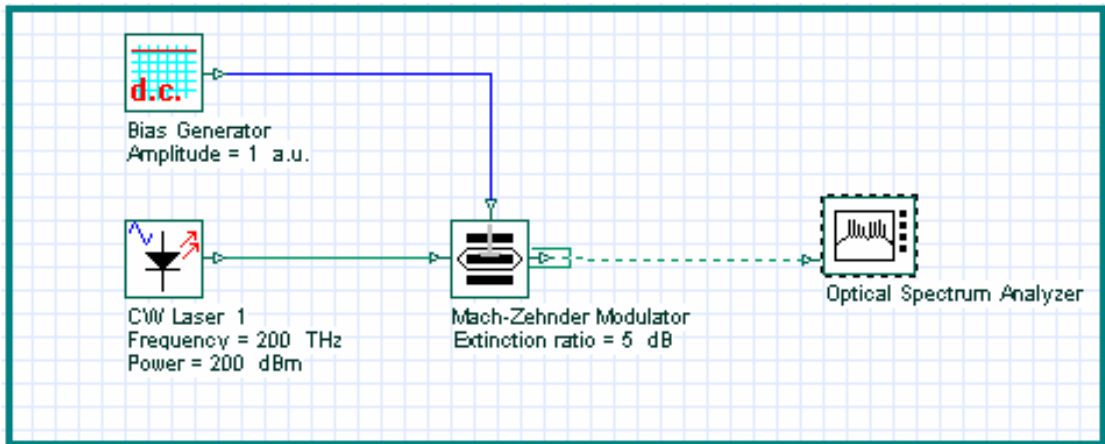
Şekil 4.13 *ER* faktörü 5 dB ve giriş gücü 10 dBm olan düzenek.

Şekil 4.14'te işaretin genliğinin maksimum ve minimum olduğu değerleri 8.68 dBm ve -105.17 dBm olduğu görülmektedir. Genliğin maksimum ve minimum noktaları arasındaki fark 113.85 dBm'dir.



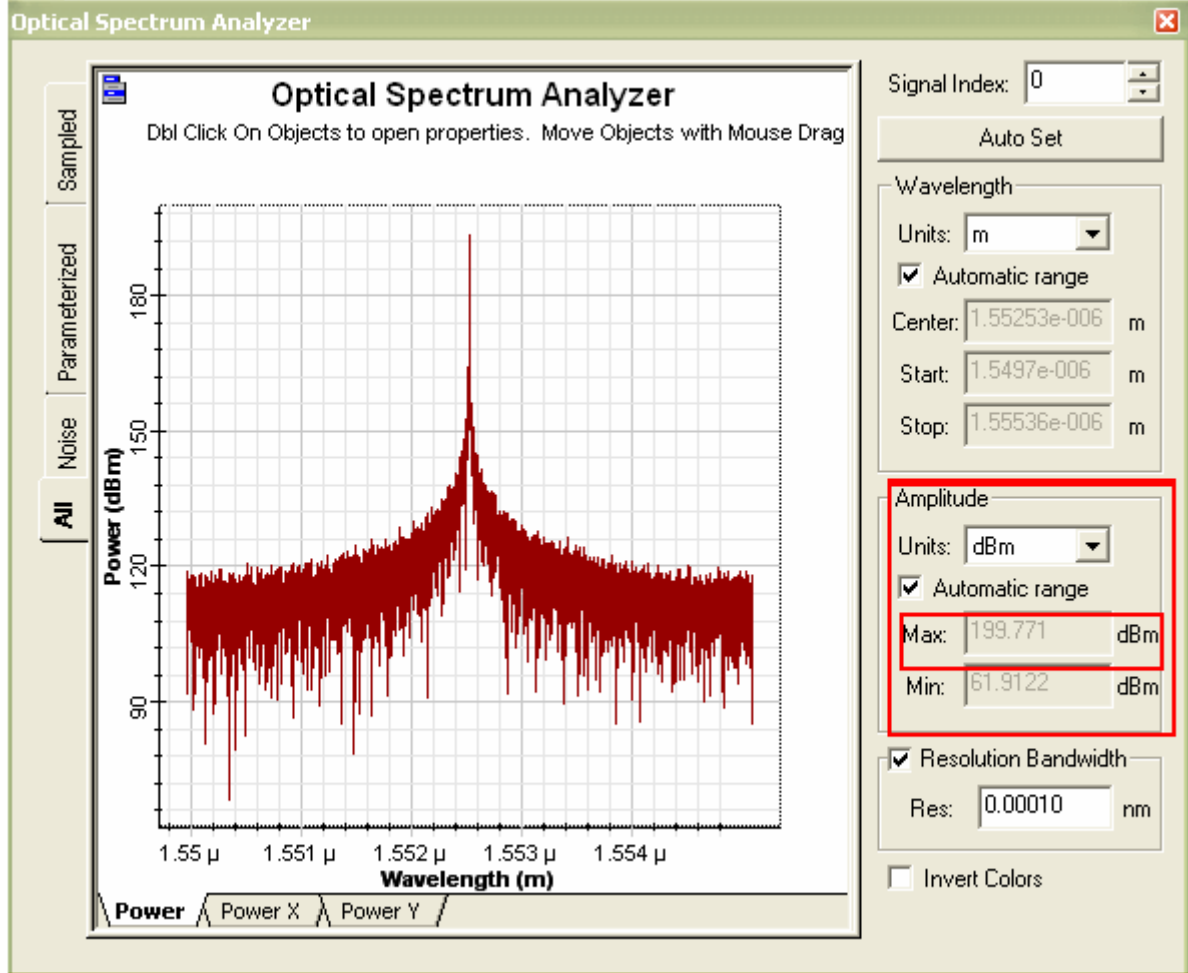
Şekil 4.14 *ER* faktörü 5 dB ve giriş gücü 10 dBm olan düzeneğin çıkış karakteristiği.

Şekil 4.15'te yer alan düzeneğe ise *ER* faktörü 5dB olarak kalmak koşuluyla giriş gücü 200 dBm'e çıkarılmıştır.



Şekil 4.15 *ER* faktörü 5 dB ve giriş gücü 200 dBm olan düzeneğin.

Şekil 4.15 düzeneğinin Şekil 4.16’da verilen spektrum analizörü çıktısında işaret genliğinin maksimum ve minimum olduğu değerlerin, 199.77 dBm ve 61.91 dBm olduğu görülmektedir. Genliğin maksimum ve minimum noktaları arasındaki fark 137.86 dBm’dir.

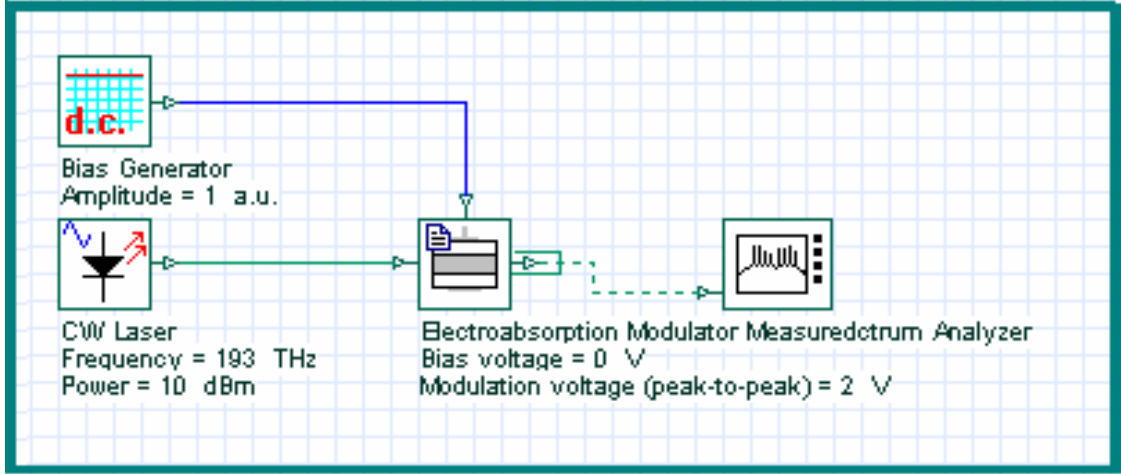


Şekil 4.16 *ER* faktörü 5 dB ve giriş gücü 200 dBm olan düzeneğin çıkış karakteristiği.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.16 gözönüne alındığında, işaretin maksimum ve minimum genlik değerleri arasındaki farkın, giriş gücünün 10 dBm olduğu düzeneğe 113.85 dBm iken, giriş gücünün 200 dBm olduğu düzeneğe işaret genliğinin 137.86 dBm’e çıktığı görülmektedir (Tarı ve Ünverdi, 2010). Orijinal işaret salınıminin, giriş gücünün 200 dBm olduğu düzeneğe daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Bu durumun 3. Bölümde açıklanan ve teorik olarak verilen Şekil 3.7 (b) ve Şekil 3.7 (c) ile örtüştüğü gözlemlenmiş ve giriş gücü etkisinin büyüklüğü sayısal verilerle desteklenmiştir.

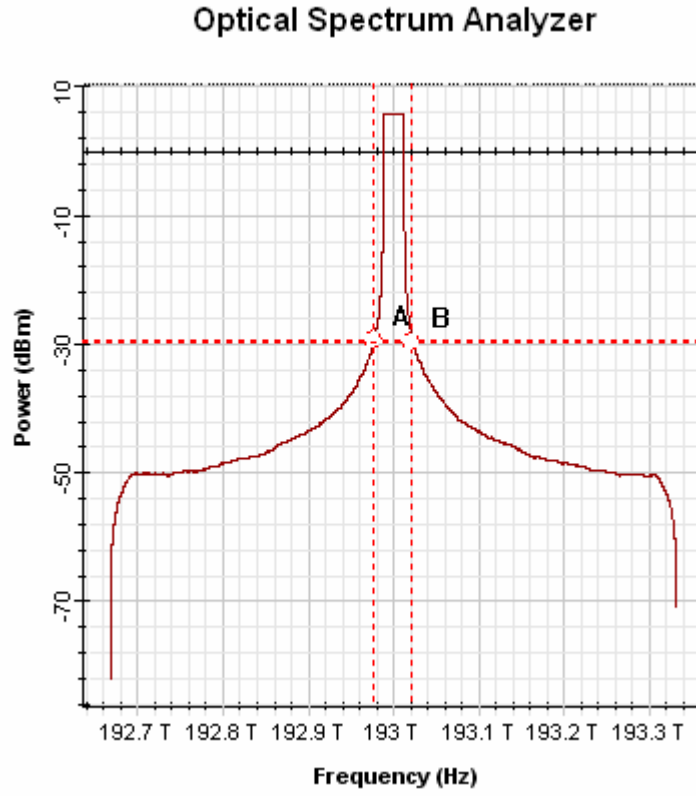
4.5 Optik Mod lat rlerde Bias Gerilimi Analizi

Bias gerilimi mod lat rlerdeki *cıvıltı* (*chirp*) faktörünü minimum hale getirmek için kullanılır. Bu bölümde EML modülatörüne giriş gücü sabit kalmak kaydıyla, 0 V ve 1 V'luk negatif bias gerilimi uygulanarak her iki durum için band genişliği ölçülmüş ve mod lat r çıkışındaki cıvıltı etkisinin bias gerilimin 1 V olduğu durum için azaldığı izlenmiştir.



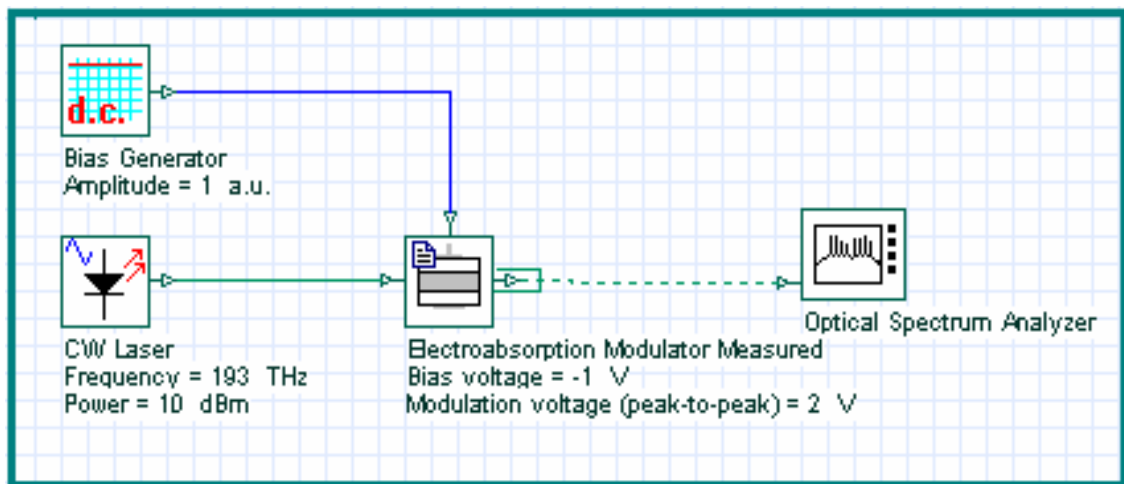
Şekil 4.17 Bias geriliminin 0 V olarak uygulandığı düzenek.

Şekil 4.17'deki düzenekte kullanılan spektrum analizörünün çıktısı,  ekil 4.18'de görülmektedir.



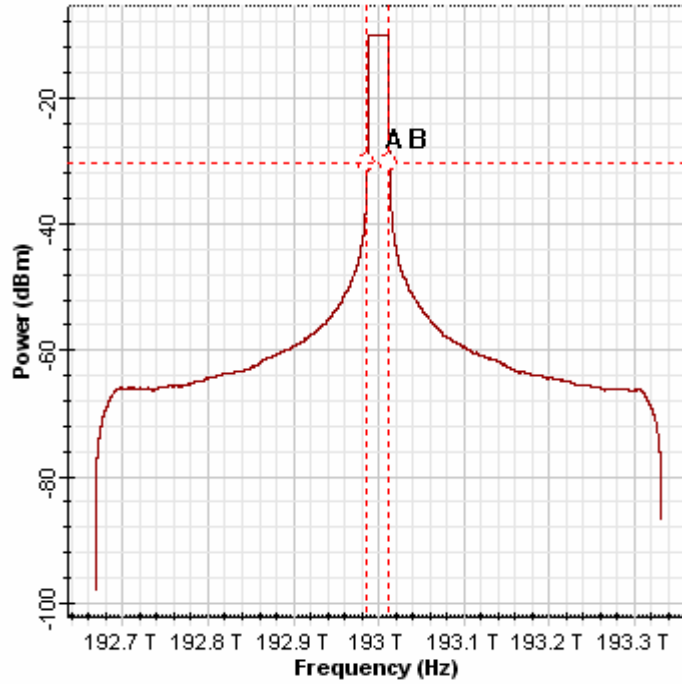
Şekil 4.18 Bias geriliminin 0 V olarak uygulandığı düzeneğin çıkış işareti.

Şekil 4.19 düzeneğinde ise tüm parametreler sabit kalmak koşuluyla -1 V'luk bir bias gerilimi uygulanmış ve düzeneğin çıkış işaretinin karakteristiği, Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.19 Bias geriliminin -1 V olarak uygulandığı düzeneğ.

Optical Spectrum Analyzer

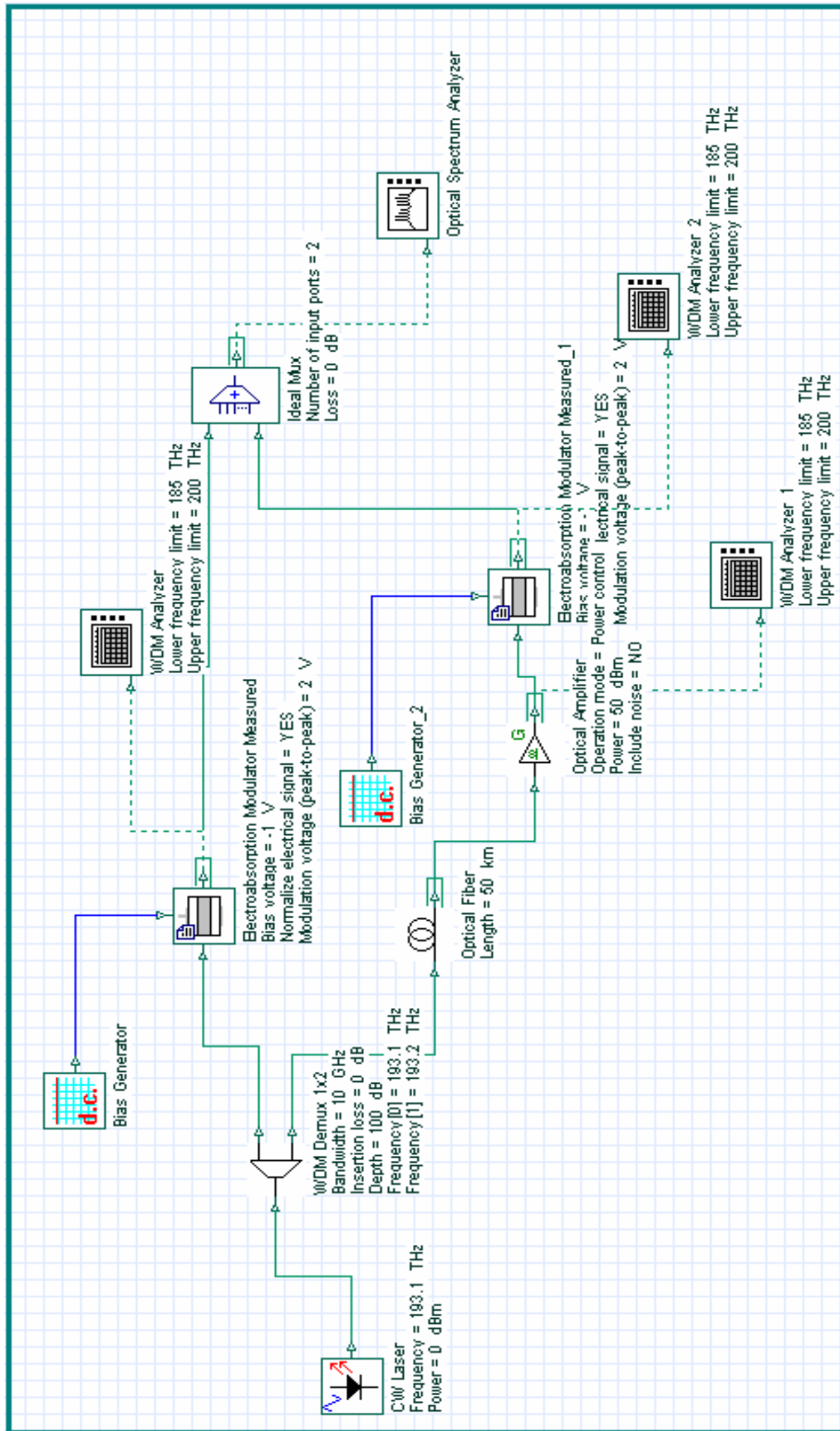


Şekil 4.20 Bias geriliminin 1 V olarak uygulandığı düzeneğin çıkış işareti.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.20’de elde edilen çıkış işaretleri karşılaştırıldığında, optik modülatörlerde iletişim kalitesini düşüren faktörlerden biri olan cıvıltı faktörünün etkisinin, modülatöre uygulanan negatif 1 V luk bias gerilimi ile %50 oranında azaldığı görülmektedir. Band genişliği 0.04 THz’den 0.02 THz’e düşerek önemli bir katkı sağlanmıştır (Tarı ve Ünverdi, 2010).

4.6 Optik Haberleşme Ağlarında Yol Kaybı Analizi

Endüstride optik ağlar çok farklı şekillerde tasarlanmakta ve zaman zaman kaynak ile alıcı arasına çok uzun mesafeler yer almaktadır. Yol boyunca optik fiber kullanılması, alıcı tarafta elde edilen işarete belli oranda zayıflamaya yol açmaktadır. Bu çalışmada her bir modülatör parametresinin çıkış gücüne etkisi değil bir bütün olarak endüstride karşımıza çıkabilecek şekliyle bir optik devre tasarlanmıştır ve analiz edilmiştir. Şekil 4.21’de verilen düzenek, 2 kanallı bir optik ağdan oluşup, kanallardan birinde optik giriş işareti kayıpsız ortamda direk modülatöre girerken, diğer kanalda giriş işareti 50 km’lik bir optik fiber ve oluşan kaybını kompanze etmek üzere eklenen 50 dBm gücünde optik yükselteçten geçirildikten sonra modülatörden geçirilmiştir.



Şekil 4.21 Yol kaybı etkisinin incelendiği düzenek.

Şekil 4.21’de yeralan düzenekte kayıplı ve kayıpsız kanalda yeralan modülatör çıkış işaretleri WDM analizörü aracılığıyla hesaplanmış olup Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te verilmiştir.



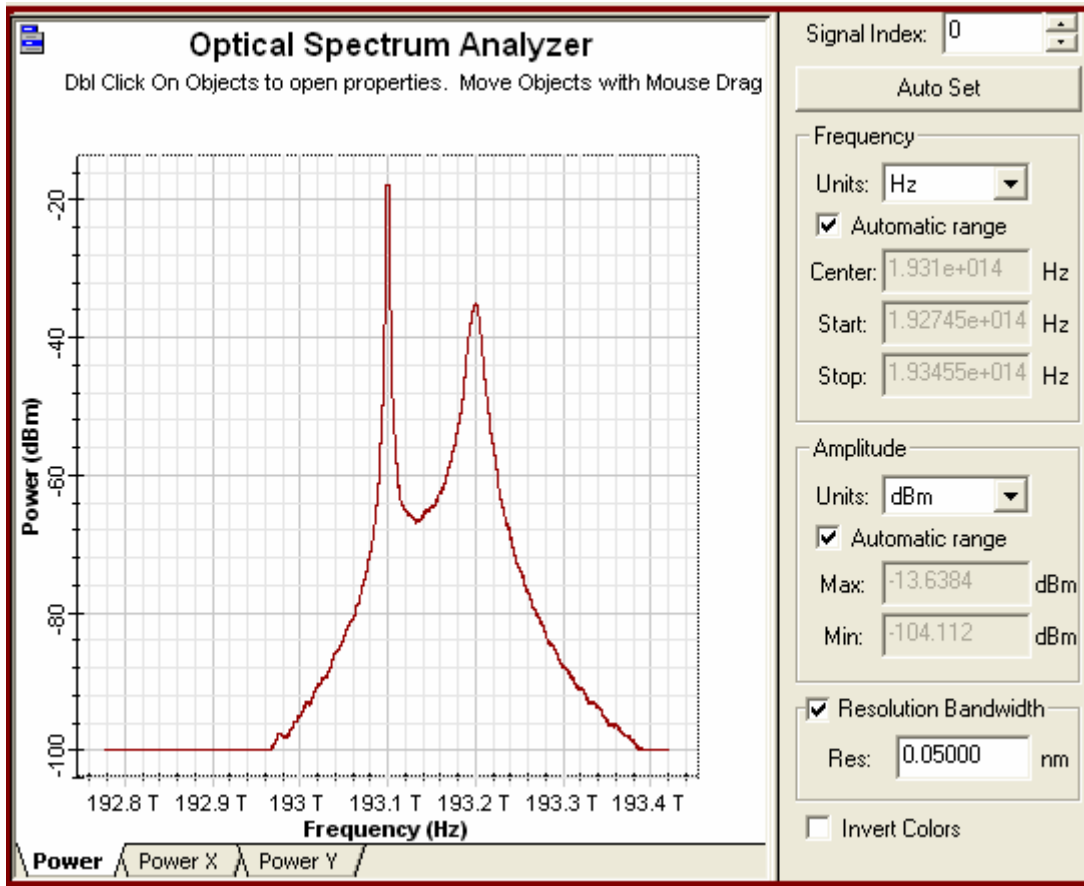
Şekil 4.22 Kayıpsız kanalda modülatör çıkış işareti.



Şekil 4.23 Kayıplı kanalda modülatör çıkış işareti.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 karşılaştırıldığında, çıkış işaretinin gücünün -20.01 dBm değerindeyken, kayıplı ortamda -27.88 dBm değerine düştüğü gözlenmiştir. Bu sonuç, işaret gücünde %35'lere varan bir kaybı ifade etmektedir. Aynı şekilde gürültü işareti

incelendiğinde, çıkış işaretinin gücünün, kayıpsız ortamda -100 dBm iken, yol kaybının olduğu kanalda -61.65 dBm değerine yükseldiği görülmüş ve optik işaret gürültü oranının (OSNR, Optical Signal to Noise Ratio) kayıplı ortamda 79.98 dB'den 33.77 dB'ye düştüğü izlenmiştir. Bütün bu analizler, pratik koşullarda diğer bir ifadeyle kayıplı ortamda gürültü işaretinin optimizasyonunu daha da önemli kılmaktadır. Modülatörler, orijinal işaretle birlikte istenmeyen gürültü işaretini de belli oranda modüle ederek cıvıltı faktörüne neden olurlar. Üçüncü bölümde teorik detayları verilen cıvıltı faktörünün orijinal işarete etkisi bu bölümde yer alan simülasyonlarla somutlanmıştır. Sonuç olarak bu düzenekteki iki işaret ideal çoğullayıcı(multiplexer) aracılığı ile aynı kanala sokulup çıkış işaretinin spektrum analizöründeki görüntüsü Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24 Kayıplı ve kayıpsız ortam optik işaretlerinin modülatör çıkış karakteristiği.

Şekil 4.24'te görülen 193.1 THz'deki birinci işaret kayıpsız kanalda yer alan işaretin modülatör çıkış görüntüsünü ve 193.2 THz'de yeralan ikinci işaret ise kayıplı kanalda yer alan optik işaretin modülatör çıkış karakteristiğini göstermektedir. Şekil 4.24'te görüldüğü gibi 193.1 THz'de üretilen kayıpsız işaretin frekans spektrumu üzerindeki genişliği, 193.2 THz'deki kayıplı yoldan geçen işaretin frekans spektrumu üzerindeki yerinden oldukça dardır.

Orijinal işaret cıvıtlı faktörünün etkisi minimum hale getirilerek korunmuştur.

5. SONUÇLAR

Optik haberleşme ağlarının gün geçtikçe yaygın olarak kullanılması optik devre elemanlarının önemini arttırmış ve bu konuda detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmuştur. Bu tezde, optik devre elemanları arasında yer alan optik modülatörler incelenmiş, çalışma prensibi ve performans kriterleri teorik olarak irdelendikten sonra OptiSystem 7.0 simülatör yazılımı ile yapılan uygulamalarda bu performans kriterlerinin etkileri gözlenmiştir.

Optik modülatörlerde orijinal işaretin korunmasında en önemli etkenlerden biri olan cıvıltı faktörünün etkisi, endüstride yaygın olarak kullanılmakta olan EML ve Mach-Zender modülatörleri üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Mach-Zender modülatör çıkışında işaretin band genişliği üzerindeki yeri 0,52 THz iken, EML modülatörde ideal modülatör karakteristiğinden daha uzak olup 0,72 THz şeklinde oluşmuştur. Ancak iki modülatördede çıkış gücünde önemli bir değişim gözlenmemiş olup cıvıltı faktörünün öncelikli olmadığı durumlarda her iki modülatöründe kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, optik modülatör parameterelerinden *ER* sönümlleme faktörü ve ortalama gücün etkileri incelenmiştir. *ER* faktörü idealde sonsuzdur ve *ER* değeri arttıkça modülatör çıkış işaretinin orijinal işarete yaklaştığı gözlenmiştir. *ER* artış oranının modülatör çıkış işaretine etkisini ölçmek amacıyla *ER* değerinin 5 dB ve 30 dB olduğu 2 farklı modülatör düzeneği kurulup *ER* faktörünün 30 dB'ye çıkarılması frekans bandı üzerinde %60'a varan bir kazanç sağlamıştır. Ortalama gücün orijinal işaret salınımına etkisini analiz etmek için *ER* faktörü sabit tutularak ortalama güç 10 dBm ve 200 dBm olan iki farklı düzenek kurulmuştur. İşaretin genliği giriş gücünün 10 dBm olduğu düzende 113.85 dBm iken, giriş gücünün 200 dBm olduğu düzende genliğin 137.86 dBm'e arttığı izlenmiştir ve orijinal işaret salınımının giriş gücü 200 dBm olduğu düzende daha iyi korunduğu görülmüştür.

Optik modülatörlerin performansına etki eden bir diğer parametere ise bias gerilimidir. Modülatörlerde iletişim kalitesini düşüren faktörlerden biri olan cıvıltı faktörünün etkisinin modülatöre uygulanan negatif 1V'luk bias gerilimi ile % 50 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Modülatörlerin bir optik ağ içerisindeki yeri ve endüstrideki kullanım şekli analiz edilmiştir. İki kanallı bir optik ağın kanallarından birinde kaynak işaret 50 km'lik bir optik fiberden sonra, 50 dBm'lik bir optik yükselteçten geçirilerek optik modülatöre uygulanmıştır. Diğer kanalda ise kaynak işaret direkt modülatörden geçirilerek çıkışa verilmiştir. Bu uygulamada, modülatörün ideal ortamda ve endüstrideki kullanım şekli karşılaştırılarak kayıp analizi

yapılmıştır. Kayıplı ortamdaki OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) oranı 79.98 dB iken, kayıpsız ortamda 33.7 dB olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Cheng, D.K., (1983), Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Cherin, A.H., (1983), “An Introduction to Optical Fibers”, McGraw Hill, New York.
- DeCusatis, C., (2007), “Fiber Optic Data Communication : Technological Trends and Advances”, Academic Press, Amsterdam.
- Kaminow, I.P., (1997) ”Optical Fiber Telecommunications” Academic Press, San Diego.
- Keiser, G.,(2000), “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill, Boston.
- Optiwave, (2008), OptiSystem Component Library.
- Sadiku, M. N. O., (2002), “Optical and Wireless Communications”, CRC Press, New York.
- Säckinger, E., (2005), “Broadband Circuits for Optical Fiber Communication”, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2005.
- Sharma, N., (1987), “Fiber Optics in Communications”, McGraw-Hill, New York.
- Tarı, E. ve Ünverdi, N. Ö., 2010, “Optik Modülatörlerde Performans Analizi”, Kocaeli Üniversitesi, İleri Teknolojiler Çalıştayı, Kocaeli.
- Tarı, E. ve Ünverdi, N. Ö., 2010, “Optik Modülatörlerde Bias Gerilimi Etkisi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fotonik 2010, İstanbul.
- Tarı, E. ve Ünverdi, N. Ö., 2010, “Optik Modülatörlerde Sönümlenme Etkisi”, Dicle Üniversitesi, Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu (BMYS 2010), Diyarbakır.
- Türkmen, Ö., 2005, “Optik Dalga Kılavuzlarında Propagasyon Özelliklerinin İncelenmesi ve Optik Kuplör ile Optik Sensör Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Udd, E., (1991), “Fiber Optic Sensors : An Introduction for Engineers and Scientist”, Wiley, New York.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 11.06.1982

Doğum yeri Diyarbakır

Ortaokul 1993-1997 Diyarbakır Anadolu Lisesi

Lise 1997-2000 Cumhuriyet Fen Lisesi

Lisans 2000-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurum(lar)

2004-2006 Nortel Networks - Netaş Ltd Şti.

2006-Devam ediyor Avea İletişim Hizmetleri A.Ş