

R
373
172



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici...

Yüksek Lisans Tezi

barış altın

Ref
EHM
168
2009

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİLERİN
MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Barış ALTINER

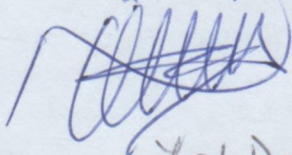
FBE Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı Haberleşme Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

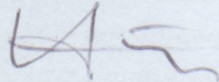
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ

Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ

Prof. Dr. Osman N. Ucar



Yrd. Doç. Dr. Soner ÖZCAN



İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

172

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK KUVVETLENDİRİCİ	2
2.1 Erbiyum Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendiricinin Tanımı	2
2.2 Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendiricilerin Tarihçesi	2
3. ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİNİN TEMELLERİ	4
3.1 Üç Seviyeli Sistemlerde Kuvvetlendirme Temelleri	4
3.1.1 Üç Seviyeli Sistemin Eşdeğer Denklemleri	4
3.1.2 Örtüşme Faktörü	10
3.2 Üç Seviyeli Sistemin İki Seviyeli Sisteme İndirgenmesi	13
3.2.1 İki Seviyeli Sistem Yaklaşımının Geçerliliği	13
3.2.2 Genelleştirilmiş Eşdeğer Denklemler	14
3.3 Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Salım	16
4. KUVVETLENDİRİCİ MODELLEME VE TASARIMI	17
4.1 Temel Kuvvetlendirici Ölçüm Teknikleri	17
4.1.1 Kazanç Ölçümleri	17
4.1.2 WDM Sistemler İçin Kazanç Ölçümü	24
5. ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİ SİMÜLASYONU VE OPTİMİZASYONU	25
5.1 Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendiricinin Gürültü ve Kazanç Spektrumu Simülasyonu	25
5.2 Dalga boyu Bölmeli Çoğullamalılı Sistemler İçin Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici Kazancının Optimizasyonu	29
5.3 Uyarılmış Seviyedeki Soğrulmanın Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendiricinin Performansına Etkisi	32
5.4 EDFA Üzerindeki Erbiyum İyon Etkileşiminin Simülasyonu	39
5.4.1 Homojen Uyarılma Etkisi (Homogeneous Upconversion Effect - HUC)	39
5.4.2 Homojen Olmayan Eş Uyarılmış Bastırma (Inhomogeneous Pair-Induced Quenching - PIQ)	43
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	46

KAYNAKLAR.....	47
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	48
---------------	----

SİMGE LİSTESİ

A_{eff}	Pompalama şiddetinin efektif alanı
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
Er^{+3}	Erbiyum +3 iyonu
G	Kazanç
h	Planck sabiti
I_p	Pompalama şiddeti
I_{th}	Eşik pompalama şiddeti
$I^{(n)}$	Normalize enine mod şiddet profili
$I(r, \phi)$	Işık yoğunluğu
N	Seviye yoğunluğu
$n(r, \phi)$	Belirli bir nokta için erbiyum iyonlarının yoğunluğu
n_{sp}	Evirtim parametresi
n_t	Erbiyum iyon konsantrasyonu
P^{0}_{ASE}	Kuvvetlendirilmiş kendiliğinden salım gücü
P_i	İndis i 'ye ilişkin pompa gücü
P_{th}	Eşik pompalama şiddetinin gücü
r	Fiber ekseninden olan uzaklık
Γ	Örtüşme faktörü
Γ_{21}	2. seviye ile 1. seviye arasındaki iyon geçiş oranı
Γ_{32}	3. seviye ile 2. seviye arasındaki iyon geçiş oranı
S_i	İndis i 'ye ilişkin sinyal
τ_2	2. seviyenin ömrü
τ_{up}	Homojen uyarılma etkisi ömür süresi
U_c	Uyarılma katsayısı
ν	Sinyal sıklığı
ϕ	Azimutal açı
φ_p	Pompalama akısı
σ_p	Pompalama kesiti
φ_s	Sinyal akısı
σ_s	Sinyal kesiti
φ_{th}	Eşik değer için pompalama akısı
$\sigma^{(a)}$	Kesit soğurması
$\alpha^{(a)}$	Toplam sinyal soğurma katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

ASE	Amplified Spontaneous Emission
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
ESA	Excited State Absorption
DF	Dispersion Fiber
DSF	Dispersion Shifted Fiber
HUC	Homogeneous Upconversion Effect
NA	Numerical Aperture
NF	Noise Figure
OSA	Optical Spectrum Analyzer
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
PIQ	Pair-Induced Quenching
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDE	Time Domain Extinction
WDM	Wavelength Division Multiplexing

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1	Erbiyum katkılı fiber için üç seviyeli sistem modeli.	5
Şekil 3.2	Üç seviyeli sistem için kesirsel yoğunluk evirtimi $(N_2 - N_1)/N$	9
Şekil 3.3	Fiberin x eksenini boyunca r uzunluğunda enine optik mod profili.	10
Şekil 3.4	İki katmanlı sistemde enerji seviyeleri.	13
Şekil 4.1	Kuvvetlendirici giriş ve çıkış spektrumu.	18
Şekil 4.2	n_{sp} dönüşüm parametreleri için kuvvetlendirici kazancına (G) karşılık 1nm bant genişliğindeki spontane gürültü gücü (P_{ASE}).	19
Şekil 4.3	OSA ile belirli bir uzunluktaki erbiyum katkılı fiber sinyal kazanç ölçümünde deneysel kurulumu.	20
Şekil 4.4	Ayarlanabilen sinyal kazancı kullanılarak belirli bir uzunluktaki erbiyum katkılı fiberin sinyal kazancının ölçümü için hazırlanan deney kurulumu.	22
Şekil 4.5	10 m uzaktan pompalanmış OTDR kullanılarak kazanç ölçüm kurulumu.	23
Şekil 5.1	Projede yaratılan üç farklı tasarım.	26
Şekil 5.2	Fiber kesitleri için soğurma ve salım değerleri.	27
Şekil 5.3	980 nm lazer diyot ile pompalanan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici karakterizasyonu.	27
Şekil 5.4	Sinyal dalga boyuna bağlı olarak kazanç eğrisi.	28
Şekil 5.5	Giriş sinyal gücüne karşılık kuvvetlendirilmiş sinyal.	28
Şekil 5.6	Giriş sinyalinin gücüne karşın gürültü.	29
Şekil 5.7	Kazancı optimize edilmiş erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici proje şeması.	30
Şekil 5.8	Optimizasyonu yapılmamış kuvvetlendiricinin çıkış sinyali ve gürültü spektrumu.	31
Şekil 5.9	Optimize edilmiş kuvvetlendiricinin çıkış sinyali ve gürültü spektrumu.	31
Şekil 5.10	Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici performans analizinin sistem şeması.	32
Şekil 5.11	Uyarılmış durumdaki soğrulmanın saçılımdan çıkarılmış durumdaki kazanç sabitinin dalga boyuna bağlı değişimi.	34
Şekil 5.12	Uyarılmış durumdaki soğrulmanın saçılımdan çıkarılmamış durumdaki kazanç sabitinin dalga boyuna bağlı değişimi.	35
Şekil 5.13	Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 1. giriş sinyal gücü için kazanç ve gürültünün spektrumu.	37
Şekil 5.14	Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 2. giriş sinyal gücü için kazanç ve gürültünün spektrumu.	38
Şekil 5.15	Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 3. giriş sinyal gücü için kazanç ve gürültünün spektrumu.	38
Şekil 5.16	Homojen uyarılma etkisinin simüle edildiği sistem şeması.	40
Şekil 5.17	İyon etkileşiminin ayarlanabildiği yazılımın iyileştirme arayüzü.	41
Şekil 5.18	1550 nm'de farklı uyarılma ömür süreleri için sinyal kazançları	42
Şekil 5.19	k ve m_k değerlerinin ayarlanabildiği yazılımın iyileştirme arayüzü.	43
Şekil 5.20	Homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisinin simüle edildiği sistem şeması.	44
Şekil 5.21	Demet sayısının fonksiyonu olarak pompa gücüne karşın 1530 nm'deki kuvvetlendirici kazançları	45

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1 Üç değişik sinyal için 47 adet kanaldaki dalga boyu ve giriş güçleri.....	36

ÖNSÖZ

Gerek tez çalışmam sırasında, gerekse lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca ilgi ve hoşgörü gösteren ve aynı zamanda çalışmalarım sırasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ'ye ve beni bugünlere getiren sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Barış ALTINER

28/08/2009

ÖZET

Bu tezin amacı, günümüzde uzak mesafe haberleşmesinde sıkça kullanılan fiber optik hatların iletim mesafesini artırmak için, erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiricilerin kazanç ve gürültü karakteristiğinin simülasyonu ile dalga boyu bölmeli çoğullamalı sistemler için erbiyum katkılı kuvvetlendiricilerin (Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA) kazancını optimize etmektir. Kazanç optimizasyonu yapıldıktan sonra uyarılmış durumdaki erbiyum iyonlarının sayesinde daha fazla soğrulan ışığın, kuvvetlendiricinin kuvvetlendirme performansını nasıl etkilediğini gösteren bir simülasyon çalışması sunulmuştur. Son aşamada ise, EDFA içerisinde yer alan erbiyum iyonlarının birbiriyle olan etkileşiminin kazancı nasıl etkilediği gösterilmiştir.

Tezin Birinci Bölümü'nde, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA) hakkında temel bilgiler verildikten sonra İkinci Bölüm'de, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerin tanımı, tarihçesi, uzak mesafe haberleşmedeki kullanım alanları ve tercih nedenleri hakkında bilgiler verilerek konuya giriş yapılmıştır.

Üçüncü Bölüm'de, EDFA hakkında ayrıntılı bilgiler verildikten sonra EDFA'nın tasarım, simülasyon ve optimizasyon aşamalarında kullanılacak olan eşdeğer denklemler belirlenmiştir.

Dördüncü Bölüm'de, kuvvetlendiriciler ana nitelikleri açısından simülasyon ve tasarım için ayrıntılı olarak incelendikten sonra çeşitli uygulamalardaki kuvvetlendirici tasarım sorunları açıklanmıştır.

Beşinci Bölüm'de erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici (EDFA) tasarımında önemli rol oynayan kazanç ve gürültü karakteristiğinin modellenmesi birinci simülasyon olarak, dalga boyu bölmeli çoğullamalı ağlar için OptiSystem 7.0 simülasyon ve optimizasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci simülasyonda, dalga boyu bölmeli çoğullamalı sistem için tasarlanan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin kazanç optimizasyonu yapılmıştır. Üçüncü simülasyonda, uyarılmış durumdaki erbiyum iyonlarının sayesinde soğrulan ışığın kuvvetlendiricinin performansını nasıl etkilediğini gösteren bir çalışma yapılmıştır. Son simülasyonda ise, erbiyum iyonlarının birbiriyle olan etkileşiminin kazanca olan etkisi incelenmiştir.

Altıncı Bölüm'de ise yapılan simülasyon ve optimizasyon çalışmalarının sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler : EDFA, Simülasyon, Optimizasyon, OptiSystem

ABSTRACT

The aim of this thesis is to optimize gain and noise characterization of erbium doped fiber amplifier (EDFA) to increase the fiber link of the transmission distance for today's Wavelength Division Multiplexing (WDM) systems. Following the gain optimization, absorbed light with the excited state erbium ions that how to affect the amplifier's performance is represented as a simulation study. At the final stage, erbium ion's interaction with one another that how to affect the amplifier's gain is indicated as a simulation.

In the first stage of the this thesis, after the EDFA is introduced, in the second stage, basic information about EDFA definition, history, usage areas and preference reasons are given as a beginning of the issue.

In the third section, after the EDFA is detailed, rate equations which are used at the design and simulation process is calculated.

In the fourth section, after the EDFA is investigated in a viewpoint of the main characterization of EDFA, amplifier design problems are explained for various applications.

In the fifth section, gain and noise characterization determination and modelling which are so important to design an amplifier is realized for WDM systems with OptiSystem 7.0 simulation software as a first simulation. In the second simulation, EDFA gain is optimized for WDM systems. Also in the third simulation, absorbed light with the excited state erbium ions support which is how to effect the amplifier's performance is represented as a simulation study. In final simulation erbium ions interaction issue is investigated and simulated to obtain the optimal gain.

In the sixth section, simulation and optimization study results have been done that are considered.

Keywords : EDFA, Simulation, Optimization, OptiSystem

1. GİRİŞ

Fiber optik iletişim sistemlerinde, iletim mesafesini sınırlayan en önemli faktör, fiber kayıplarıdır. Bu kayıpların dengelenmesinde, yüksek kazanç, düşük gürültü, yüksek bant genişliği ve yüksek çıkış gücü karakteristiği nedenleriyle optik kuvvetlendiriciler tercih edilmektedir.

Optik kuvvetlendiriciler uyarılmış yayınımla ışığı yükseltirler. Geri beslemesi olmayan bir lazer mekanizması ile gelen sinyalin frekansına ve dalga boyuna bağlı olarak optik bir kazanç sağlarlar. Dolayısıyla kazanç ve tasarım parametrelerinde gerçekleştirilecek olan optimizasyonların optik sinyalin uzak mesafelere gönderilebilmesi açısından büyük bir önemi vardır. Erbium katkılı fiber kuvvetlendiricinin tasarım sürecinde yer alan bu parametrelerin kuvvetlendiricinin kazanç ve gürültü spektrumunu önemli derecede etkiler. Bu yüzden, tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken bu parametreler, kazanç ve gürültü spektrumunun başarımlar seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olmasını gerektirir.

Bu tezde, erbiyum katkılı optik fiber kuvvetlendiricilerin parametreleri üzerinde yapılmış olan tasarım, simülasyon ve optimizasyon çalışmaları için Optisystem 7.0 simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Yazılımın tasarım parametrelerini kontrol etme açısından sağladığı esneklik sayesinde gerçekleştirilen simülasyon ve optimizasyonlar pratik ortama uygun olarak yapılmıştır.

2. ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK KUVVETLENDİRİCİ

Bu bölümde erbiyum katkılı optik fiber kuvvetlendiricilerin tanımı ile birlikte kullanım alanları, tercih nedenleri ve tarihçesi ayrıntılı bir biçimde ele alınmıştır.

2.1 Erbiyum Katkılı Fiber Optik Kuvvetlendiricinin Tanımı

Erbium katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier), silikon fiberlerin zayıflamasının minimum olduğu 1550 nm dalga boyu civarında 40-50 nm aralıkta çalışabilen ve ticari olarak da tercih edilen optik yükselteçlerdir. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler, günümüz itibariyle dünyaya yayılmış fiber optik ağların gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. Fiber kuvvetlendiricilerin ortaya çıkışı, gelecekte önemli bir yere sahip olacak kılavuzlanmış dalga ile çalışan cihazların üretimini ve geliştirilmesini tetiklemekle birlikte iletim kapasitesinin devamlı olarak artmasında önemli rol oynamaktadır.

2.2 Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendiricilerin Tarihçesi

1980'lerdeki tipik uygulamalarda iletim için ilk defa fiber optik bileşenler kullanılmaya başlandı. Kabloya giriş yapacak olan sinyal daima elektronik olmakla birlikte alıcı tarafta tekrar elektronik sinyale dönüştürülmek zorundaydı. Sinyal uzak mesafelere yayıldığında zayıfladığı için, elektronik tekrarlayıcılar bulunduğu noktadan zayıflatılmış sinyali alarak sinyali tekrar ürettiyordu. Bu yüzden 1980'lerin sonlarındaki erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerin gelişimine kadar optik olarak kuvvetlendirme teknikleri bulunmamaktaydı.

İlk defa erbiyum katkılı tek modlu fiber kuvvetlendirici, 1.5 μm sinyallerini kuvvetlendirmek için 1987 yılında Southampton Üniversitesi ve AT&T Bell laboratuvarlarında aynı anda geliştirildi. Erbiyum iyonunun ilk defa kullanılması ile 1.5 μm 'deki modern fiber optik iletim sistemlerinin iletim kapasiteleri artırılmış oldu. Her iki kurumun yapmış olduğu uygulamalarda yüksek sinyal kazançları elde edildi.

Günümüz erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricileri, tek modlu fiberi standart hale getirmek için birleştirilmiştir ve lazer osilasyonu engellemek için fiber yalıtıcılar birleştirilme noktalarının ardına yerleştirilmiştir.

Önceden bahsedilen fiber kuvvetlendirici uygulamalarında büyük ebatlı lazer pompaları kullanıldı, fakat bu pompaların getirdiği en büyük zorluk ise lazer bir diyot ile pompalanmış verimli bir erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici uygulamasıydı. Bu ise 1989'da M. Nakazawa ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirildi. Bu devrimin ardından E. Snitzer'in uygulamasından sonra $1.53 \mu\text{m}$ ve $1.55 \mu\text{m}$ bölgesi içinde erbiyum kuvvetlendirmesi için $1.48 \mu\text{m}$ uygun bir pompalama dalga boyuydu. M. Nakazawa, yüksek güçteki $1.48 \mu\text{m}$ lazer diyot pompasını daha önceden geliştirdiği raman kuvvetlendiricilerinde kullandı. Bu uygulama kuvvetlendiricilerin sistem tasarımı açısından bir devrim yarattı. Yarıiletken kuvvetlendiriciler ile optik kuvvetlendirmenin keşfi, optik olarak kuvvetlendirilmiş iletim sistemlerindeki sinyal ve gürültüyü anlamada önemli bir ön bilgi sağladı.

1989'ların başlangıcında, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler, yüksek kapasitedeki yeni jenerasyon denizaltı ve karasal fiber optik bağlantılar ve ağlar için katalizör rolü oynadı. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirinin (EDFA) optik iletim hattındaki testi, ilk defa 1989 yılında gerçekleştirildi. Bundan birkaç yıl sonra ticari kuvvetlendiriciler satıldı ve bazı önemli telekomünikasyon firmaları ise bu kuvvetlendiricilerin kurulumuna başladı. 1996 yılı ile birlikte artık deniz altı bağlantılarda erbiyum katkılı fiberler kullanılmaya başlandı. Bu fiberler yaklaşık olarak normal kablo iletimine göre on kat daha fazla veri taşıyabilecek seviyedeydi. Erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendirici ile ilgili yapılan bu çalışmalar fiber optik iletim için optik iyon katkılama çalışmalarını da güçlendirdi.

Son zamanlardaki gelişmelerle birlikte, optik kuvvetlendiriciler günümüzün ihtiyacı olan yüksek kapasitede veri ve ses iletimi uygulamaları için yeni bir çözüm getirdi.

3. ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİNİN TEMELLERİ

Bu bölümde, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricilerde kazanç modellemesi için gerekli olan prensipler gözden geçirilip geliştirilmiştir. Bu prensipler, kuvvetlendiricilerin kazanç ve gürültü modellemesi için temellendirilecektir.

Kazanç süreci, bağlantılı atomsal yoğunluk ve ışık akısının yayılım denklemlerinden oluşmaktadır. $1.5 \mu\text{m}$ 'deki erbiyum katkılı fiber için uygun olan üç seviyeli sistem incelenmiştir ve üç seviyeli sistemin belirli varsayımlar altında eşdeğer iki seviyeli sisteme nasıl indirildiği ispatlanmıştır.

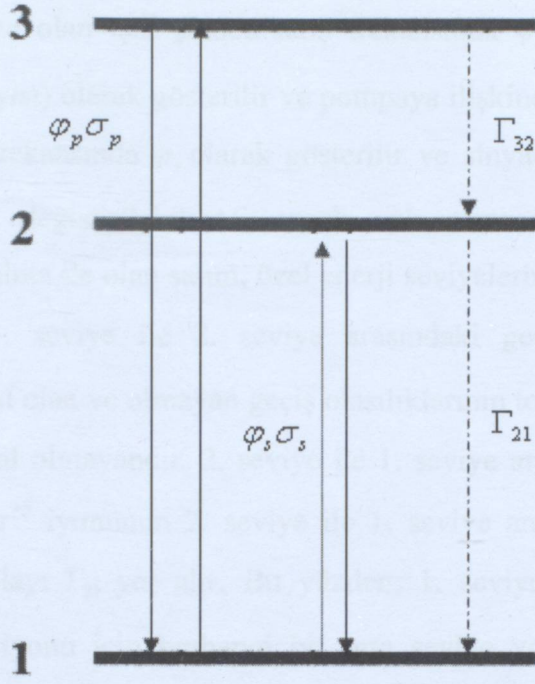
Kesit soğurma ve salımının önemi, verilen iki adet geçiş dalga boyu arasında var olan farkı belirlenmiştir. Erbiyum iyon dağılımı ve ışık şiddetinin enine profili arasında meydana gelen geometrik örtüşme parametresi kavramından detaylandırılmıştır. Kuvvetlendirme işleminin bütün yönleri açısından kuvvetlendirilip uyarılmış salımın önemi açıklanmıştır. Son kısımda ise, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici analitik olarak modellenmiştir.

3.1 Üç Seviyeli Sistemlerde Kuvvetlendirme Temelleri

3.1.1 Üç Seviyeli Sistemin Eşdeğer Denklemleri

Çoğu erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici incelemesi, salt olarak üç seviyeli atomik modelin veya sistemin eldesi ile mümkün olur [1]. Kuvvetlendiricilerin en önemli özellikleri bu basit modelden belirli varsayımlar altında elde edilebilir.

1. seviye ile 3. seviye arasındaki geçiş oranları, bu geçiş seviyelerindeki yoğunlukları ve pompalama akısı ϕ_p ile pompalama kesiti σ_p için oransaldır. 1. seviye ile 2. seviye arasındaki geçiş oranları, bu geçiş seviyelerindeki yoğunlukları ve sinyal akısı ϕ_s ile sinyal kesiti σ_s için oransaldır. Kendiliğinden meydana gelen iyon geçiş oranları Γ_{32} ve Γ_{21} şeklinde verilebilir.



Şekil 3.1 Erbiyum katkılı fiber için üç seviyeli sistem modeli.

Yukarıda bahsedilen parametrelerle birlikte üç seviyeli sistem Şekil 3.1’de belirtildiği gibi düşünülebilir. Toprak seviyesi 1. seviye ile, enerjinin pompalandığı 3. seviye ile, ortadaki seviye ise 2. seviye ile temsil edilmiştir. Verimli bir kuvvetlendirici olduğu düşünülürse 2. seviye genelde uzun bir ömüre sahiptir ve bazen yarı kararlıdır. 2. seviye kuvvetlendirme geçişinin üst seviyesi olmakla birlikte 1. seviye ise alt seviyesidir. Seviyelerin yoğunlukları N_1 , N_2 ve N_3 olarak belirtilmiştir. Bahsedilen üç seviyeli bu sistem, kuvvetlendirme işlemine bağlı olarak Er^{+3} iyonlarının enerji seviye yapısını temsil etmektedir. Kuvvetlendirme işlemini başlatabilmek için, 1. seviye ve 2. seviye arasında yoğunluk evirtimi gerekmektedir, çünkü 1. seviye toprak seviyesindedir. Yoğunluk evirtimini için toplam erbiyum iyon yoğunluğunun en az yarısı 2. seviyeye uyarılmalıdır. Bu durum, kuvvetlendirme işlemi için eşik pompalama gücünü artırır ve aynı zamanda üç seviyeli lazer ve kuvvetlendirme sistemlerinin en zor kısmı olarak bilinir.

Özel bir avantaj olarak, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici içinde meydana gelen ışık alanlarının çok küçük boyutlara hapsedilmiş olması önemlidir. Düşük seviyelerdeki pompalama ışık şiddeti yüksek seviyelere eriştiğinden, uzak mesafelere iletimi ve yoğunluk evirtimi gerçekleştirilebilir. Öncelikle göz önünde bulundurulması gereken problem tek boyuttur. Enine boyutlar içinde ve fiberin verimli bir kesitinde, pompa ve sinyal şiddeti ile erbiyum iyonlarının dağılımının olabildiğince sabit olduğu varsayılır.

1. seviyeden 3. seviyeye olan ışık şiddeti akış frekansında φ_p (birim alan başına birim zamanda düşen foton sayısı) olarak gösterilir ve pompaya ilişkindir. 1. seviyeden 2. seviyeye olan ışık şiddeti akış frekansında φ_s olarak gösterilir ve sinyal alanına ilişkindir. Her bir seviyedeki yoğunluğun değiştirilebilmesi ancak ışık alanından fotonların soğrulması, kendiliğinden veya uyarılma ile olan salım, özel enerji seviyelerinden kaçan bazı enerjiler ile mümkün olmaktadır. 3. seviye ile 2. seviye arasındaki geçiş olasılığı Γ_{32} şeklinde belirtilebilir. Bu ışımsal olan ve olmayan geçiş olasılıklarının toplamıdır. Çoğu durumda ve pratikte genelde ışımsal olmayandır. 2. seviye ile 1. seviye arasındaki geçiş olasılığı Γ_{21} şeklinde belirtilebilir. Er^{+3} iyonunun 2. seviye ile 1. seviye arasındaki geçişi durumunda, ışımsal geçişinden dolayı Γ_{21} yer alır. Bu yüzden, 1. seviye ile 2. seviye arasında 2. seviyeye uyarılan Er^{+3} iyonu için herhangi bir orta seviye yoktur. Bu nedenle, τ_2 , 2. seviyenin ömrü olmakla birlikte 2. seviye ile 1. seviye arasındaki geçiş olasılığı,

$$\Gamma_{21} = \frac{1}{\tau_2} \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır.

1. seviyeden 3. seviyeye geçiş arasındaki soğurma kesiti σ_p , 2. seviyeden 1. seviyeye salım kesiti σ_s olarak gösterilebilir. Zaman geçtikçe soğurma ve salım kesitleri, bozulmamış olan seviyeler arasındaki geçiş olarak farzedilir. Bu sebeple pratik açıdan erbiyum iyon seviyeleri, soğurma ve salım kesitleri farklı olan durumlardan oluştuğu söylenebilir. Bu seviyeler ısı yoğunluk dağılımını da içermektedir.

Seviyeler arasındaki yoğunluk değişimi için eşdeğer denklemler,

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (3.3)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 + (N_1 - N_3)\phi_p\sigma_p + (N_2 - N_1)\phi_s\sigma_s \quad (3.4)$$

formundadır. Kararlı durumda, zaman türevlerinin hepsi sıfır olacaktır:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0. \quad (3.5)$$

Toplam yoğunluk N ise,

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (3.6)$$

dür. N_3 yoğunluğu,

$$N_3 = \frac{1}{1 + (\Gamma_{32}/\phi_p\sigma_p)} N_1 \quad (3.7)$$

dir. Γ_{32} , 3. seviyedeki efektif pompalama oranına göre karşılaştırıldığında büyük bir değere sahiptir, $\phi_p\sigma_p$, N_3 sıfıra yaklaştığı için yoğunluk genelde 1. ve 2. seviyededir. (3.7) eşitliği (3.3) eşitliğinde kullanılarak,

$$N_2 = \frac{(\phi_p\sigma_p/\Gamma_{32}) + \phi_s\sigma_s}{\Gamma_{21} + \phi_s\sigma_s} N_1 \quad (3.8)$$

eşitliği elde edilir.

(3.6) eşitliğinden faydalanılarak N_1 ve N_2 yoğunlukları türetilabilir ve yoğunluk evirtimi olan $N_2 - N_1$,

$$N_2 - N_1 = \frac{\varphi_p \sigma_p - \Gamma_{21}}{\Gamma_{21} + 2\varphi_s \sigma_s + \varphi_p \sigma_p} N \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Yoğunluk evirtimi, 2. seviyeden 1. seviyeye geçiş kazancı için, $N_2 \geq N_1$ 'dir. Eşik değeri olarak ise $N_2 = N_1$ 'dir ve pompalama akısı φ_{th} ,

$$\varphi_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{1}{\tau_2 \sigma_p} \quad (3.10)$$

ifadesi ile elde edilir.

Sinyal şiddetinin değerinin küçük olması durumunda, sönüm süresi Γ_{32} , pompalama alanının neden olduğu geçiş oranıyla karşılaştığında çok büyüktür, yoğunluk evirtimi,

$$\frac{N_2 - N_1}{N} = \frac{\phi_p' - 1}{\phi_p' + 1} \quad (3.11)$$

olarak verilir. Burada,

$$\phi_p' = \frac{\phi_p}{\phi_{th}} \quad (3.12)$$

dir. (3.11) eşitliği ile Şekil 3.2'deki gibi kesirsel yoğunluk evirtimi çizilebilir [1]. Pompalama eşiğinin altında evirtim negatif, pompalama eşiğinin üzerinde ise pozitiftir. Evirtim negatif olduğunda, sinyal dalga boyunda soğurma geçişleri salım geçişlerinden daha fazladır ve sinyal negatif kazanç ve kayıpları görür. Tersine, evirtim pozitif olduğunda, sinyal pozitif kazançları görür.

Pompalama şiddeti yani birim zaman ve birim alanda toplanan enerji,

$$I_p = h \nu_p \phi_p \quad (3.13)$$

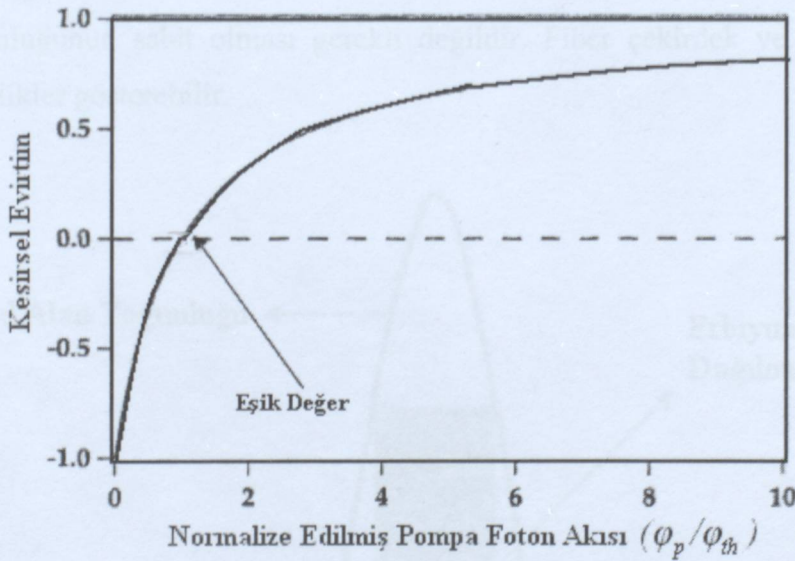
denklemleri ile verilebilir. Burada, h , planck sabiti ve ν_p , pompalama frekansıdır.

Eşik pompalama şiddeti,

$$I_{th} = \frac{h\nu_p \Gamma_{21}}{\sigma_p} = \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau_2} \quad (3.14)$$

dir. Yüksek σ_p değerleri, soğrulan bir pompalama fotonunun yüksek olasılığını eşik değere ulaştırabilmek için soğurma nedeniyle gerekli olan pompalama fotonlarının sayısını yeterli seviyeye düşürür. Ek olarak, uzun τ_2 süreleri, 2. seviyede enerjinin daha uzun süre kalmasını sağlar. Sonuç olarak, 2. seviyede birim zamanda enerji tutabilmek için daha az pompalama fotonları gerekmektedir. Düşük pompalama eşik değerleri için olan durumlar aşağıdaki gibidir:

- Kesitlerdeki yüksek derecede soğurma,
- Yarı kararlı seviyede yüksek ömür süresi.

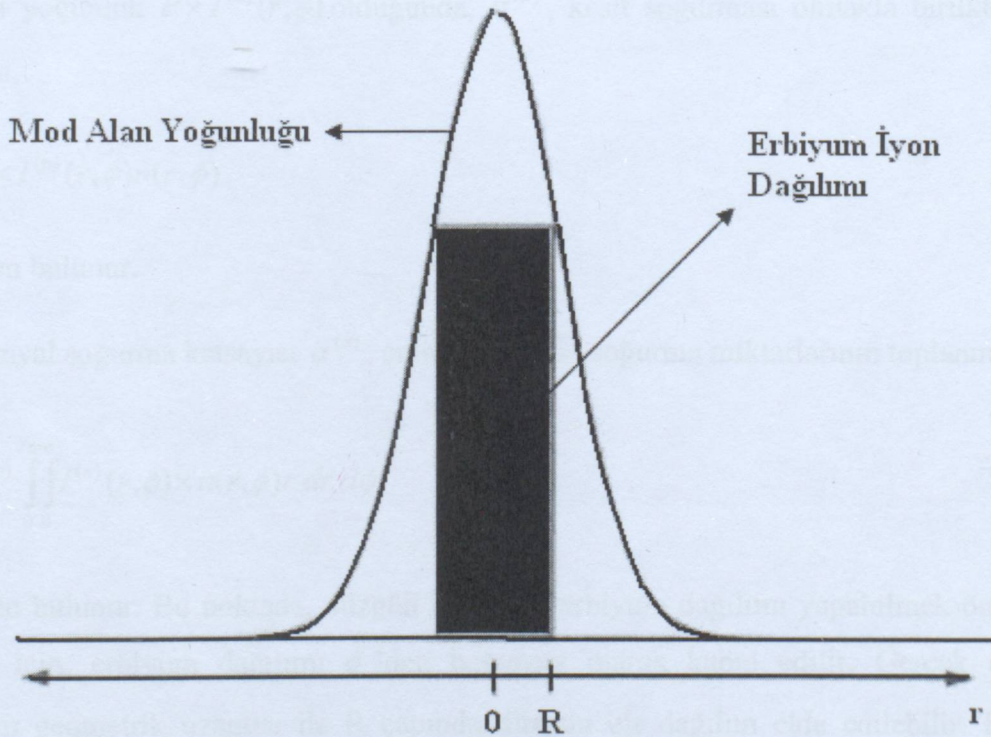


Şekil 3.2 Üç seviyeli sistem için kesirsel yoğunluk evirtimi $(N_2 - N_1)/N$.

Erbiyum için ömür süresi silikon tabakada yaklaşık 10 ms gibi çok büyük değerlerde olduğu için durum özellikle τ_2 açısından uygundur. Erbiyum iyon sabitleri için bazı tipik değerleri kullanarak I_{th} belirlenir. Pompalama dalga boyu 980 nm, $\sigma_p = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$, $\tau_2 = 10 \text{ ms}$ olarak kabul edildiğinde $I_{th} \sim 10 \text{ kW/cm}^2$ hesaplanır. Pompalama şiddetinin efektif alan ($A_{eff} = 5 \mu\text{m}^2$) boyunca uniform olarak dağıldığı düşünülerek, eşik güç değeri $P_{th} = I_{th} \times A_{eff} \sim 0.5 \text{ mW}$ olarak bulunur.

3.1.2 Örtüşme Faktörü

Fiber kuvvetlendiricinin basit tek boyutlu modelinin olduğunu farketmek büyük önem taşımaktadır, optik modun enine yüzeyi ve enine erbiyum iyonlarının dağılımı ile örtüşmesi son derece önemlidir. Genelde, bu faktör literatürde örtüşme faktörü olarak bilinir [2]. Optik modun bazı kısımları erbiyum iyon dağılımı ile örtüşerek Er^{+3} geçişlerinin soğurma ve salımını uyaracaktır. Tüm optik modun kazanç veya kaybı, bu etkileşim ile değişecektir. Bu durum sabit erbiyum yoğunluğu, verilen bir alan için silindirik fiberin geometrisi esas alınarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Örnek olarak, basamak indisli fiberde, fiber çekirdeğine erbiyum katkılanırsa, optik modun bazı kısımları kılıfın dışına genişleyecektir. Sadece optik modun çekirdek kısmı içerisinde yer alan bölümü Er^{+3} iyonlarının etkisini hissedecektir. Bu bir avantaj olarak kullanılabilir. Erbiyum sadece fiber çekirdeğinin tam ortasına katkılanmasıyla, erbiyum iyonları sadece optik mod'un çok yüksek şiddetli olan kısmını görecektir ve pompa maksimum sayıda Er^{+3} iyonlarını daha kolay evirecektir [3]. Genelde, erbiyum yoğunluğunun sabit olması gerekli değildir. Fiber çekirdek ve kılıf bölgelerinde önemli değişiklikler gösterebilir.



Şekil 3.3 Fiberin x eksenine boyunda r uzunluğunda enine optik mod profili.

Profil, düzgün erbiyum iyon dağılımı ile örtüşmektedir. Şekil 3.3'teki gibi çekirdek çapı R ile erbiyum düzgün dağılımlıdır ve mod çekirdeğin çapının dışına taşmıştır.

Verilen bir fiber modunda, ışık yoğunluğu $I(r,\phi)$, pompa, sinyal veya ASE (Amplified Spontaneous Emission – Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Salım) sinyali için, enine pozisyonun (r,ϕ) fonksiyonu olarak, r fiber ekseninden olan uzaklık ve ϕ azimutal açı olarak

$$I(r,\phi) = P \times I^{(n)}(r,\phi) \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $I^{(n)}(r,\phi)$ ise normalize enine mod şiddet profili olarak,

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\infty I^{(n)}(r,\phi) r dr d\phi = 1 \quad (3.16)$$

dir.

P , modda yer alan toplam güçtür. $I^{(n)}(r,\phi)$ ters alanın boyutlarına sahiptir. Her noktada (r,ϕ) , erbiyum iyonlarının yoğunluğu $n(r,\phi)$ olarak yazılabilir. (r,ϕ) 'daki erbiyum iyonlarının üzerindeki yoğunluk $P \times I^{(n)}(r,\phi)$ olduğunda, $\sigma^{(a)}$, kesit soğurması olmakla birlikte sinyal soğrulması,

$$\sigma^{(a)} = P \times I^{(n)}(r,\phi) n(r,\phi) \quad (3.17)$$

eşitliğinden bulunur.

Toplam sinyal soğurma katsayısı $\alpha^{(a)}$, enine boyuttaki soğurma miktarlarının toplanması ile

$$\alpha^{(a)} = \sigma^{(a)} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty I^{(n)}(r,\phi) \times n(r,\phi) r dr d\phi \quad (3.18)$$

eşitliğinden bulunur. Bu noktada, düzgün bir enine erbiyum dağılımı yapabilmek önemlidir. Bu amaç için, erbiyum dağılımı ϕ 'den bağımsız olarak kabul edilir. Gerçek erbiyum dağılımının geometrik uzantısı ile R çapında düzgün bir dağılım elde edilebilir. Erbiyum iyonlarını içeren alan integrali alarak, $r=0$ noktasında $n(0)$ erbiyum yoğunluğu referans alınarak düzgün dağılımın çapı R hesaplanabilir.

$$\pi R^2 = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{n(r)}{n(0)} r dr \quad (3.19)$$

$$R = \left(2 \int_0^{\infty} \frac{n(r)}{n(0)} r dr \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$

πR^2 , efektif kesit alanıdır. Ortamalama yoğunluk N , toplam erbiyum iyonlarının dönüşümü ile,

$$\pi R^2 N = 2\pi \int_0^{\infty} n(r) r dr \quad (3.21)$$

$$N = \frac{2 \int_0^{\infty} n(r) r dr}{R^2} \quad (3.22)$$

olarak elde edilir.

N 'nin ortalama erbiyum iyon yoğunluğu olarak düşünüldüğünde, soğrulma katsayısı,

$$\alpha^{(a)} = N \times \sigma^{(a)} \times 2\pi \int_0^{\infty} I^{(n)}(r) [n(r)/N] r dr = N \sigma^{(a)} \Gamma \quad (3.23)$$

dır. Γ örtüşme faktörü olarak düşünüldüğünde,

$$\Gamma = 2\pi \int_0^{\infty} I^{(n)}(r) [n(r)/N] r dr \quad (3.24)$$

Standart durumda, gerçek erbiyum iyon dağılımı $r=0$ ve $r=R$ arasında sabit olarak düşünülebilir ve

$$\Gamma = 2\pi \int_0^R I^{(n)}(r) [n(r)/N] r dr \quad (3.25)$$

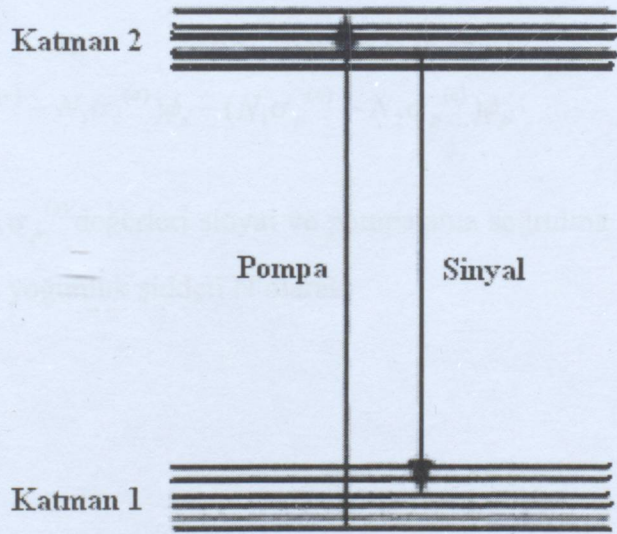
olarak modifiye edilir.

3.2 Üç Seviyeli Sistemin İki Seviyeli Sisteme İndirgenmesi

3.2.1 İki Seviyeli Sistem Yaklaşımının Geçerliliği

Erbiyum iyonlarının enerji seviyeleri birbirinden ayrılmış seviyelerden oluşmaktadır. 3. pompalama seviyesinin 2. seviyeden farklı olan bir katmanlı yapıya sahip olduğu varsayılır. Pratik bütün uygulamalarda, 3. seviyedeki yoğunluk 0'dır ve eşdeğer denklemler sadece 1. seviye ve 2. seviye için geçerli olacaktır. 1. seviyeden 3. seviyeye olan pompa soğurma alanının değeri 3. seviyede hesaba katılabilir. Örnek pompalama dalga boyları $0,98 \mu m$, $0,80 \mu m$ ve $0,54 \mu m$ 'dir.

Belirli pompalama konfigürasyonlarında, aynı katmana ait olan kuvvetlendirici seviyesinin ve pompalama seviyesinin üstün yer alan 3. seviye 2. seviye ile benzer kabul edilebilir.



Şekil 3.4 İki katmanlı sistemde enerji seviyeleri.

Özel bir durum olarak, $1,48 \mu m$ 'deki pompalama dalga boyu Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu durumda, 3. seviyenin yoğunluğunun 0'a eşit olması gerekli değildir. Genelde, verilen bir katmanda ısı iyon dengesi kurulmuştur ve katmanın ömür süresi ile karşılaştırıldığında ısı iyon denge süresi çok küçüktür [4]. Bu nedenle, 3. seviye pompalama, en alttaki katmandan olan enerji ayırımına bağlı olmakla birlikte bazen sonlu ısı yoğunluğa sahiptir. Pompalama frekansındaki uyarılmış salım sinyal frekansına yaklaşır ve miktarı ışık alanının etkileşim gücüne bağlıdır.

Bütün sistemin davranışı, soğrulma ve salım kesitleri olarak temsil edilir. Soğrulma ve salım kesitleri ısı yoğunluk dağılımını içerir. Örneğin, 3. seviye en alt katmandan üstte olduğu zaman, toprak seviyesindeki katmanın altında salım kesiti çok küçük olur ve bu frekansta uyarılan salımın düşük olasılığının olduğunu gösterir. Bu frekanstaki soğrulma kesiti büyüktür, çünkü toprak seviyesindeki katmanın yoğunluğu alt katmana yakın olur ve 3. seviyeye geçişleri serbest bırakır.

3.2.2 Genelleştirilmiş Eşdeğer Denklemler

Üç seviyeli sistemi iki seviyeli sisteme indirgemek için, 1. ve 2. katmanların toplam yoğunlukları,

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + (N_1 + \sigma_s^{(a)} - N_2\sigma_s^{(e)})\phi_s - (N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)})\phi_p \quad (3.26a)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 + (N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)})\phi_s - (N_1\sigma_p^{(a)} - N_2\sigma_p^{(e)})\phi_p \quad (3.26b)$$

olur. $\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)}, \sigma_p^{(a)}, \sigma_p^{(e)}$ değerleri sinyal ve pompalama soğrulma ve salım kesitleri olarak verilebilir [4]. Toplam yoğunluk şiddeti N olarak,

$$N = N_1 + N_2 \quad (3.27)$$

dir ve

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dN_2}{dt} \quad (3.28)$$

İlişkisi vardır.

(3.26a) ve (3.26b) eşitliklerinin yardımıyla, N_2 , sinyal ve pompalama şiddetine bağımlı olarak, N_1 değeri ise $N - N_2$ 'den hesaplanabilir.

Pompalama şiddeti $N_2(z)$, fiberin z eksenı boyunca pompalama alanı ve sinyal alanının fonksiyonu olarak,

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^{(a)}}{h\nu_s} I_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^{(a)}}{h\nu_p} I_p(z)}{\frac{\tau(\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)})}{h\nu_s} I_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)})}{h\nu_p} I_p(z) + 1} N \quad (3.29)$$

verilir. Genelde, N değeri z 'den bağımsız varsayılabılır. Pompalama ve sinyal yayılım denklemleri ise,

$$\frac{dI_p(z)}{dz} = (N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)}) I_p(z) \quad (3.30a)$$

$$\frac{dI_s(z)}{dz} = (N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)}) I_s(z) \quad (3.30b)$$

dir. 2. seviyeden uyarılan salım, alanın genişlemesine katkıda bulunur, 1. seviyeden soğrulma ise alan kaybına neden olur. Fiberin kuvvetlendirme özelliklerinin simülasyonunu yapabilmek için, her bir alan için yoğunluk ve yayılım denklemlerinin hesaplanması gerekir. Yoğunluk evirtimi durumunda, $N_2 - N_1 > 0$, sinyal alanının varlığıyla, eşik değerden daha büyük bir değerde pompaya uygulanır.

$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{(\sigma_p^{(a)} - \sigma_p^{(e)}) \tau_2} \quad (3.31)$$

Sinyal dalga boyunda, pompalama eşik değeri sinyal kazancına karşılık gelir ve

$$I_{th} = \frac{h\nu_p}{\tau_2} \left(\frac{1}{\sigma_p^{(a)} \left(\frac{\sigma_s^{(e)}}{\sigma_s^{(a)}} \right) - \sigma_p^{(e)}} \right) \quad (3.32)$$

olarak bulunur.

İncelenen denklemler çoklu sinyaller ve pompalar için genelleştirilebilir. Her bir sinyal S_i ve her bir pompa ise P_i ile simgelenilerek,

$$N_2(z) = \frac{\sum_{S_i} \frac{\tau \sigma_{S_i}^{(a)}}{h\nu_{S_i}} I_{S_i}(z) + \sum_{P_i} \frac{\tau \sigma_{P_i}^{(a)}}{h\nu_{P_i}} I_{P_i}(z)}{\sum_{S_i} \frac{\tau(\sigma_{S_i}^{(a)} + \sigma_{S_i}^{(e)})}{h\nu_{S_i}} I_{S_i}(z) + \sum_{P_i} \frac{\tau(\sigma_{P_i}^{(a)} + \sigma_{P_i}^{(e)})}{h\nu_{P_i}} I_{P_i}(z) + 1} N \quad (3.33)$$

eşitliğine ulaşılır.

Alan yayılım denklemleri, (3.30a) ve (3.30b)'de verilen denklemlerle belirli kesitler için benzerdir. Çoklu sinyale sahip olan denklemler hesaplama için kullanılabilir. Örnek ASE (Amplified Spontaneous Emission, Kendiliğinden Kuvvetlendirilmiş Salım)'nin spektral dağılımında ve WDM bir sistemde kullanılan çoklu sinyal kanallarının kuvvetlendirilmesinde bu denklemler büyük önem taşımaktadır.

3.3 Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Salım

Bütün uyarılmış iyonlar kendiliğinden üst seviyeden başlayarak toprak seviyesine doğru fotonu yayar. Bu olay ile kendiliğinden yayılan foton, fiber boyunca kuvvetlendirilebilir ve uyarılan iyonlardan daha fazla fotonun yayılımı sağlanır. Herhangi bir frekansta meydana gelen bu parazitik işlem kuvvetlendiricinin kazancını düşürür. Sinyal fotonları ile uyarılan bu fotonlar ortamdan çıkar. Bu işlem, literatürde, kuvvetlendirilmiş kendiliğinden salım olarak isimlendirilir. Kuvvetlendiriciden elde edilebilecek toplam kazanç miktarını sınırlamaktadır.

Fiberin çıkışındaki kuvvetlendirilmiş kendiliğinden salımı hesaplanabilmesi, fiberde verilen bir noktada olan kendiliğinden salım gücünün ilk başta belirlenmesi gerekir. Bu güç, eşdeğer gürültü gücü olarak da isimlendirilir. Verilen bir ν frekansında, bağımsız iki polarizasyonda tek enine mod fiber için kuvvetlendirilmiş kendiliğinden salım,

$$P^0_{ASE} = 2h\nu\Delta\nu \quad (3.34)$$

olarak bulunur.

4. KUVVETLENDİRİCİ MODELLEME VE TASARIMI

Bu bölümde, kuvvetlendiriciler ana nitelikleri açısından simülasyon ve tasarım içim ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu nitelikler, belirli kuvvetlendirici sistem tasarımında kullanılan girdilerdir. Öncelikle burada kuvvetlendiricilerin kazanç, gürültü, ve dönüşüm etkinlikleri ile ilgili büyüklükler el alınmış ve daha sonra çeşitli uygulamalardaki kuvvetlendirici tasarım sorunları irdelenmiştir.

4.1 Temel Kuvvetlendirici Ölçüm Teknikleri

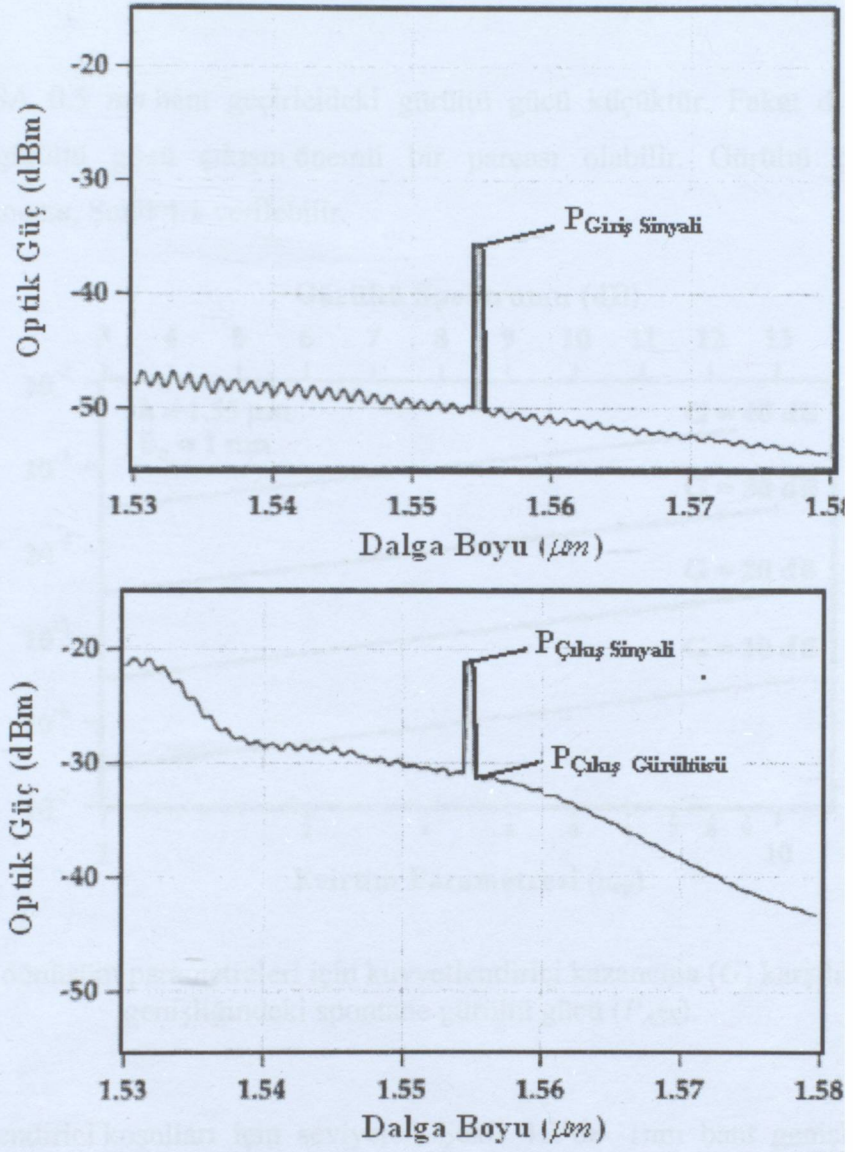
4.1.1 Kazanç Ölçümleri

Bir kuvvetlendiricinin kazancı giriş sinyal seviyesi ile çıkış sinyal seviyesinin oranı kısaca dB olarak ifade edilir.

$$\text{Kazanç(dB)} = 10 \log_{10} (P_{\text{çıkış sinyali}} / P_{\text{giriş sinyali}}) \quad (4.1)$$

Bir optik kuvvetlendiricinin kuvvetlendirici çıkış sinyaline eşlik eden kazanç ölçümü, polarizasyona bağımlı etkenler ve kendiliğinden kuvvetlendirilmiş salım (ASE, Amplified Spontaneous Emission) ile ilişkilidir. Örneğin, giriş sinyaline ait dalga boyu bağımlı optik güç ile erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin yükseltilmiş çıkışı arasındaki kazanç Şekil 4.1’de gösterildiği gibi 14 dB’dir.

Çıkıştaki gürültüyü farklılaştırmak için iki genel metot kullanılır. Bunlardan birincisinde Şekil 4.1’deki gibi çıkış bir optik spektrum analizörü tarafından filtre edilir. İkincisinde, faz-duyarlı dedektör tarafından giriş sinyali düzenlenir ve çıkış sinyal seviyesi denetlenir.



Şekil 4.1 Kuvvetlendirici giriş ve çıkış spektrumu [1].

OSA (Optical Spectrum Analyzer, Optik Spektrum Analizörü) metoduna bir Şekil 4.1’de verilen yükselticinin kazancının bulunması verilebilir:

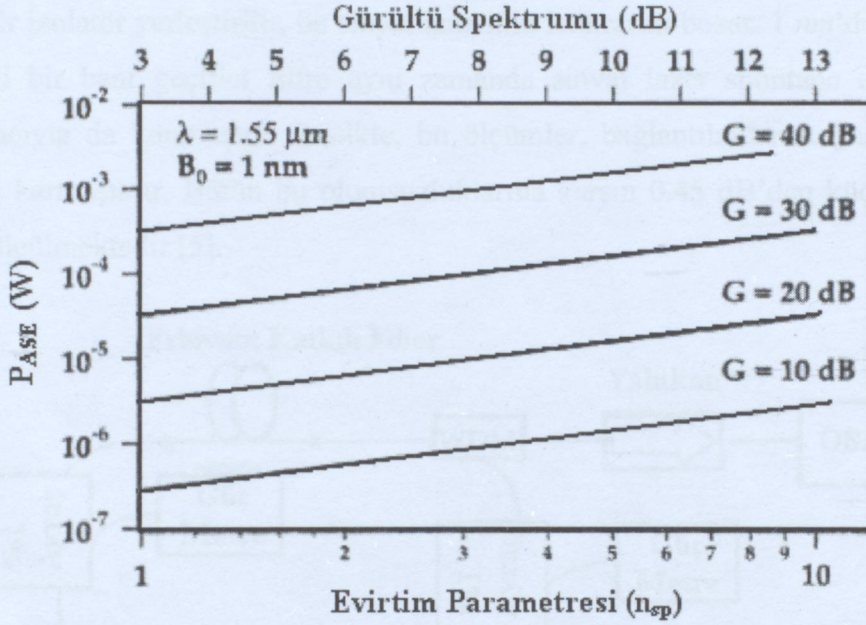
$$\text{Kazanç(dB)} = 10 \log_{10} \left[\frac{(P_{\text{Çıkış Sinyali}} + P_{\text{Çıkış Gürültüsü}}) - (P_{\text{Çıkış Gürültüsü}})}{P_{\text{Giriş Sinyali}}} \right]$$

$$= 10 \log \frac{0.8 \mu W - 0.76 \mu W}{0.27 \mu W}$$

$$= 14.34 \text{ dB}$$

dir.

Bu örnekte, OSA 0.5 nm bant geçiricideki gürültü gücü küçüktür. Fakat diğer yükseltici modellerinde gürültü gücü çıkışın önemli bir parçası olabilir. Gürültü gücü, örnekle açıklanacak olunursa, Şekil 4.1 verilebilir.



Şekil 4.2 n_{sp} dönüşüm parametreleri için kuvvetlendirici kazancına (G) karşılık 1nm bant genişliğindeki spontane gürültü gücü (P_{ASE}).

Çeşitli kuvvetlendirici koşulları için seviyeler, Şekil 4.2'de 1nm bant genişliğinde sinyal dalga boyunda merkezlenen 10, 20, 30 ve 40 dB kuvvetlendirici kazançları ve dönüşüm parametreleri n_{sp} için 1 ve 10 arasındaki toplam gürültü gücünü P_{ASE} izlemektedir. Sinyal dalga boyundaki gürültü gücü, bant genişliği B_0 ; sinyal sıklığı ν , h Plank sabiti, ve G sinyal sıklığındaki kuvvetlendirici kazancı olmak üzere,

$$P_{ASE} = 2n_{sp}(G-1)h\nu B_0 \quad (4.3)$$

dir ve dB olarak gürültü figürü,

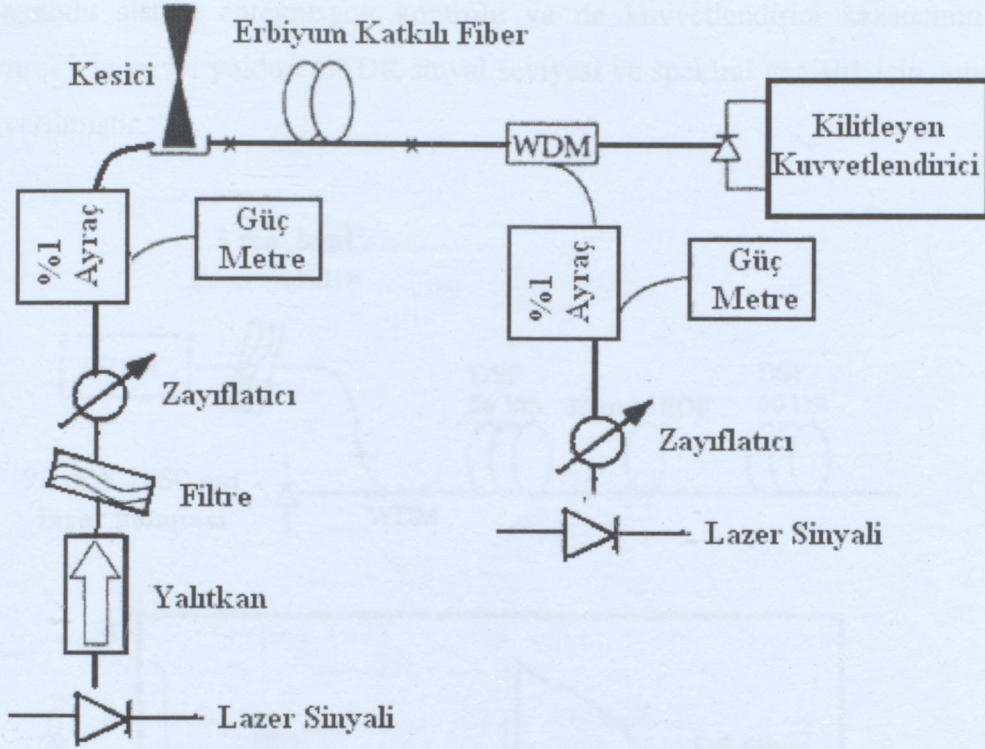
$$NF = 10 \cdot \log_{10}(2 \cdot n_{sp}) \quad (4.4)$$

olarak tanımlanmaktadır ve yüksek kazançlı kuvvetlendiricilerde geçerlidir.

Modülasyon frekansı erbiyum iyonunun yavaş kazanç dinamiklerinden kaçınmak amacıyla birkaç *KHz*'den daha yüksek olmalıdır, çünkü bunlar zamanında gelen sinyal esnasında ortalama yükseltici dönüşümünü değiştirebilir. Bu yöntemin otomatikleştirilmiş bir ön gösterimi, ayarlanabilir bir sinyal lazerini 50 *KHz*'de modüle etmek ve çıkan sinyali ölçüm kesinliği ± 0.4 *dB* ile tanımlanmış bir spektrum analizörü ile denetlemektir.

Her iki metotta da bitiş tepkilerinden kaçınmak için dikkatli olunmalıdır; bunlar, kazancı düşürebilir ve gürültüyü arttırabilirler. Aşırı bir örnek olarak ise, lazer ışığı yaymak konusunda istikrarsızlığa neden olabildikleri verilebilir. Bu bitişe, izolatörler veya açılı fiber uçlar genelde yükseltici giriş ve çıkışına yerleştirilir ve geri dönüş tepkilerini ileri üretici sinyalinden 50 *dB* aşağıya çekerler.

Kazançla ilgili hassas ölçümler, dedektörün polarizasyona bağlı hassasiyetine gereksinim duyar. Optik spektrum analizörleri için, bu hassasiyet 0.05 *dB* düzeyindedir, ticari optik güçmetrelerde ise bu hassasiyet, 0.1 *dB*'ye kadar yükselebilmektedir. Bu hassasiyeti düşürmek için bir yöntem sinyali spontane emisyonu dönüştürerek depolarize etmektir. Bu teknik polarizasyona bağlı kayıpları 0.001 *dB* belirsizliğe kadar düşürebilmektedir. Alternatif olarak, dedektörlerde minimum polarizasyon hassasiyeti seçilebilir veya polarizasyonun durumu her ölçümden önce maksimum okuma şeklinde değiştirilebilir. Denetleme ile ilgili başka bir konu da fiberlerden gelen erbiyum katkılı fiberlerin özelliği olan yüksek sayısal açıklık (NA, Numerical Aperture) içeren optik güçtür.

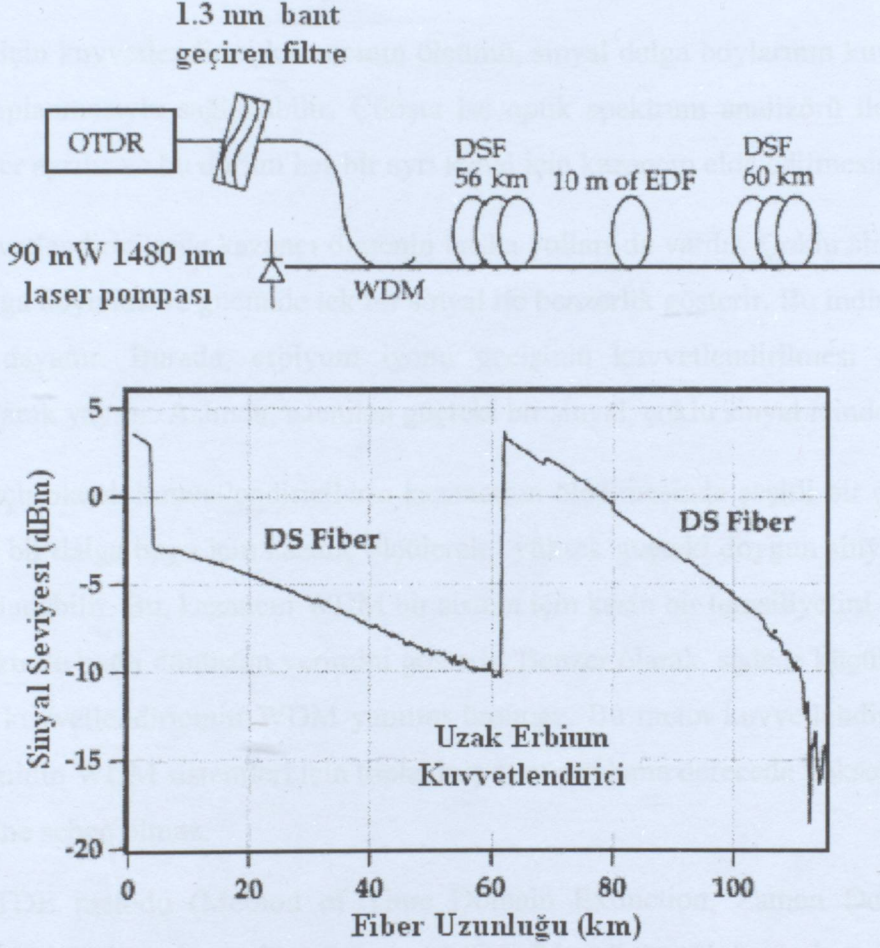


Şekil 4.4 Ayarlanabilen sinyal kazancı kullanılarak belirli bir uzunluktaki erbiyum katkılı fiberin sinyal kazancının ölçümü için hazırlanan deney kurulumu.

Güçmetre üreticileri, daha fazla sayısal açıklığa sahip olan fiber düzenlemek için optik eksenini ayarlanmış lensler yaparlar. Tercih edilen çözüm, yüksek (0.3) sayısal açıklığa sahip olan erbiyum katkılı fiberlerle daha düşük (0.2) sayısal açıklığa sahip olan fiber tiplerini birbirine eklemektir.

Erbiyum katkılı fiberin uzunluğu boyunca kazanç ölçümü yapılırken performansının da yüksek olması istenebilir. Küçük bir etki alanı üzerinden gücün sıkıştırılması ile birkaç metre uzunluğundaki kuvvetlendirici fiberlerin uzunlukları boyunca analizi yapılır. Alçak kazanç için ya da iç izolatör kullanmayan dağıtılmış kuvvetlendiriciler için, bir optik zaman domen yansıtıcı ölçer, OTDR'da (Optik Zaman Domeni Yansıtıcı Ölçer, Optical Time Domain Reflectometer) zincir uzunluğu boyunca sinyal seviyesi veya kazanç ölçmede kullanılabilir. Birçok kuvvetlendirici içeren zincirler de bu teknikte gözlenebilirler; uzaktan pompalanan kuvvetlendiriciler için de bu durum geçerlidir. Geriden yayılan ASE (Kuvvetlendirilmiş Kendiliğinden Salım, Amplified Spontaneous Emission) gücünü azaltmak için 1 nm'den 3 nm'ye bir bant geçirici filtre, kuvvetlendirici ile OTDR'nin girişi arasına konmalıdır. Kurulum ve deney sonucu Şekil 4.5'te görülmektedir.

OTDR metodu sistem entegrasyon kontrolu ya da kuvvetlendirici kazancının niteliksel ölçümlemesi için en iyi yoldur. OTDR sinyal seviyesi ve spektral genişlik için, sınırlı kontrol bilgileri verilmiştir.



Şekil 4.5 10 m uzaktan pompalanmış OTDR kullanılarak kazanç ölçüm kurulumu.

4.1.2 WDM Sistemler İçin Kazanç Ölçümü

Günümüzde iletim sistemleri, kuvvetlendirme kapasitesini yükseltmek için çoklu dalga boyuna sahip işaretleri kullanırlar. Bu uygulama için kuvvetlendiricilerin tasarım ve testleri sinyali küçük dalga boyu aralıklarına ayırtırmayı gerektirmektedir.

Her sinyal için kuvvetlendirici kazancının ölçümü, sinyal dalga boylarının kuvvetlendiricinin girişinde toplanmasıyla sağlanabilir. Çıkışta ise optik spektrum analizörü ile Şekil 4.3'teki gibi sinyaller ayrılır ve bu durum her bir ayrı kanal için kazancın elde edilmesine izin verir.

WDM kuvvetlendiricilerde kazancı ölmenin başka yolları da vardır. Çoklu sinyal kaynakları, özel bir dalga boyunda ve gücünde tek bir sinyal ile benzerlik gösterir. Bu indirgenmiş kaynak metoduna dayanır. Burada, erbiyum iyonu geçişinin kuvvetlendirilmesi ağırlıklı olarak homojen olarak yayılır. Aslında, istenilen güçteki bir sinyal, çoklu sinyal içinde yer alır.

WDM amaçlı olarak kuvvetlendiricilerin kazancının ölçülmesinde çeşitli bir çok tuzak nokta vardır. Her bir dalga boyu için kazanç ölçülerek, yüksek güçteki doygun sinyal spektral bant içinde ayarlanabilir. Bu, kazancın WDM bir sistem için kesin bir temsiliyetini sağlamaz, fakat sadece spektrale bağlı dönüşüm verimini gösterir. Benzer olarak, sadece küçük bir sinyal ucu kullanmak kuvvetlendiricinin WDM yanıtını üretmez. Bu metot kuvvetlendiricinin erbiyum iyon evirtiminin WDM sistemleri için toplanmış aynı ortalama derecede yüksek sinyal gücüne eşitlenmesine sebep olmaz.

Özellikle TDE metodu (Method of Time Domain Extinction, Zaman Domeni Bastırma Metodu), WDM sistemlerde kazanç ve gürültü faktörünün ölçümünde uygulanabilir bir yöntemdir. Bu metotta, ASE'nin düzelme zamanında sinyal kesildiğinde işareti, kuvvetlendirilmiş kendiliğinden salım (ASE, Amplified Spontaneous Emission) sinyalinden ayırmak için kullanılır. Optik spektrum analizörüne girilen 25 KHz'de kare dalga ile modüle edilmiş bir işaret çıkış ASE'sini hemen ölçebilmek için bastırılır. Bu yöntemde çekici olan, sinyalin dalga boyunda olan ASE'yi, sinyal tarafını araya sokmadan ölçebilme yeteneğidir. Geniş bant kaynak, örneklenen gürültü ve uygun zamandaki sinyallerin bir araya toplanması ile hızlı olarak değişen spektral-bağımlı ve gürültü ölçümleri yapılabilir.

5. ERBİYUM KATKILI FİBER KUVVETLENDİRİCİ SİMÜLASYONU VE OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, erbiyum katkılı fiber tasarımı açısından kazanç ve gürültünün optimizasyonu dalga boyu bölmeli çoğullamalı ağlar için OptiSystem 7.0 simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk simülasyonda erbiyum katkılı fiberin temel kavramları olan gürültü, kazanç spektrum simülasyonu gerçekleştirildikten sonra ikinci simülasyonda tasarım parametreleri verilen bir EDFA'da kazanç optimizasyonu yapılmıştır. Üçüncü simülasyonda, uyarılmış durumdaki erbiyum iyonlarının kuvvetlendiricinin kazancını nasıl etkilediği gösterilmiştir. Son simülasyonda ise iyon etkileşimlerinin kazanç etkisi simüle edilmiştir.

5.1 Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendiricinin Gürültü ve Kazanç Spektrumu Simülasyonu

Simülasyonda, erbiyum katkılı fiber için kazanç spektrumu ve doyumu ile kuvvetlendirici gürültüsü kavramları için üç tasarım projesi yer almaktadır. Bu tasarım projeleri kazanç spektrumu ve bant genişliği, kazanç doyumu ve kuvvetlendirici gürültüsünü karakterize etmektedir.

Simülasyonda, kuvvetlendirici performansı, kuvvetlendiricinin giriş parametreleri için karakterize edilmiştir. Güç seviyesi düşük giriş sinyali gücü ($\sim -30 \text{ dBm}$) ve doyuma ulaşmış giriş sinyal gücü ($\sim 0 \text{ dBm}$) ile kuvvetlendiricinin performansını hesaplamak için tasarım projeleri ele alınmıştır.

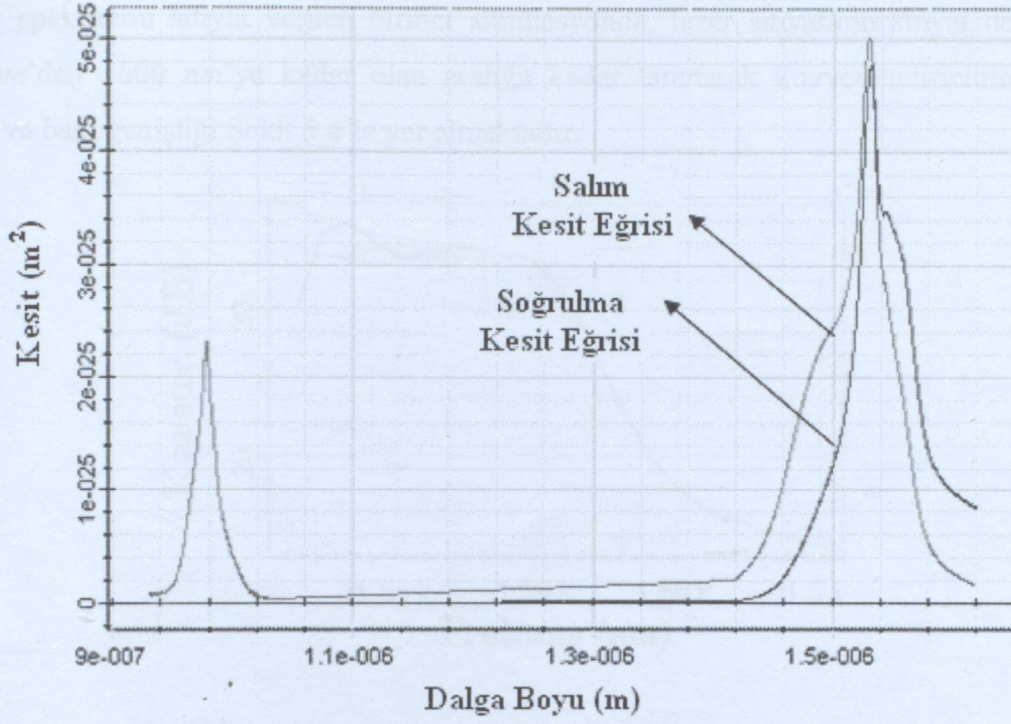
Üç tasarım projesi Şekil 5.1'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonda bileşen olarak erbiyum katkılı fiber kullanılmıştır.

Project Browser	
Default	
Name	Value
Amplifier Noise	20
Global	
CW Laser	CW Laser 1.0
Dual Port WDM Analyzer	Dual Port WDM Analyzer 1.0
Erbium Doped Fiber	Erbium Doped Fiber 1.0
Ideal Mux	Ideal Mux 1.0
Optical Null	Optical Null 1.0
Optical Spectrum Analyzer	Optical Spectrum Analyzer 1.0
Optical Spectrum Analyzer	Optical Spectrum Analyzer 1.0
Pump Laser	Pump Laser 1.0
Gain Saturation	20
Global	
CW Laser	CW Laser 1.0
Dual Port WDM Analyzer	Dual Port WDM Analyzer 1.0
Erbium Doped Fiber	Erbium Doped Fiber 1.0
Ideal Mux	Ideal Mux 1.0
Optical Null	Optical Null 1.0
Optical Spectrum Analyzer	Optical Spectrum Analyzer 1.0
Optical Spectrum Analyzer	Optical Spectrum Analyzer 1.0
Pump Laser	Pump Laser 1.0
Gain Spectrum	20
Global	
CW Laser	CW Laser 1.0
Dual Port WDM Analyzer	Dual Port WDM Analyzer 1.0
Erbium Doped Fiber	Erbium Doped Fiber 1.0
Ideal Mux	Ideal Mux 1.0
Optical Null	Optical Null 1.0
Optical Spectrum Analyzer	Optical Spectrum Analyzer 1.0
Optical Spectrum Analyzer	Optical Spectrum Analyzer 1.0
Pump Laser	Pump Laser 1.0

Şekil 5.1 Projede yaratılan üç farklı tasarım.

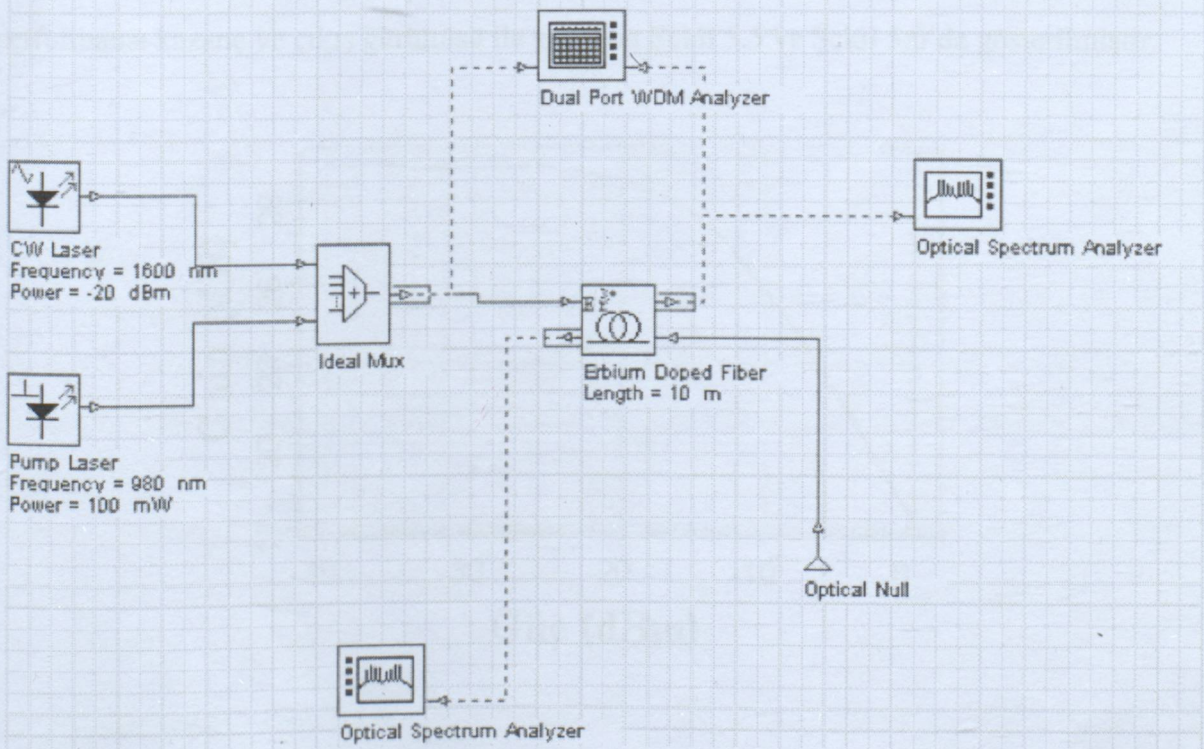
Üç farklı tasarım için olan grafiklerin her biri için çıkış sinyal gücü, kazanç ve gürültü için geçerlidir. Bu bileşen ayarları değiştirilebilir ve parametrelerdeki değişikliklerin bir sonucu olarak kuvvetlendiricinin performansında gözlenen değişiklikleri analiz edebilmek için simülasyonlar tekrarlanabilir.

Soğurma ve salım kesitleri, giriş parametreleri nümerik hesaplamada kullanılan yayılım denklemleri için kritik değerlerdir ve erbiyum fiber bileşeninde Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



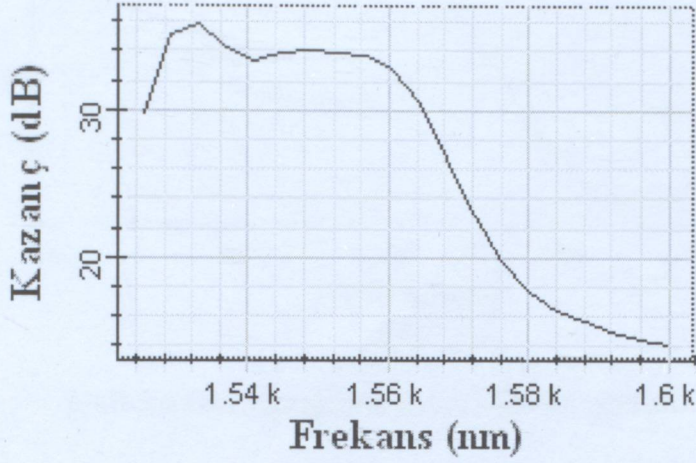
Şekil 5.2 Fiber kesitleri için soğurma ve salın değerleri.

Her bir tasarımdaki hesaplamalar için Şekil 5.3'teki temel tasarım projesi kullanılmıştır.



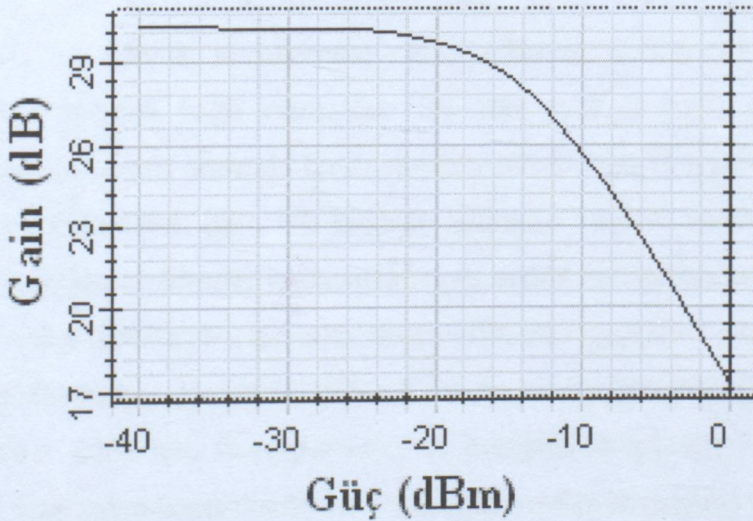
Şekil 5.3 980 nm lazer diyot ile pompalanan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici karakterizasyonu.

Kazanç spektrumu adıyla verilen birinci simülasyonda, lazer sinyalinin sinyal dalga boyu 1525 nm'den 1600 nm'ye kadar olan aralığa kadar taranarak kuvvetlendiricinin spektral kazanç ve bant genişliği Şekil 5.4'te yer almaktadır.

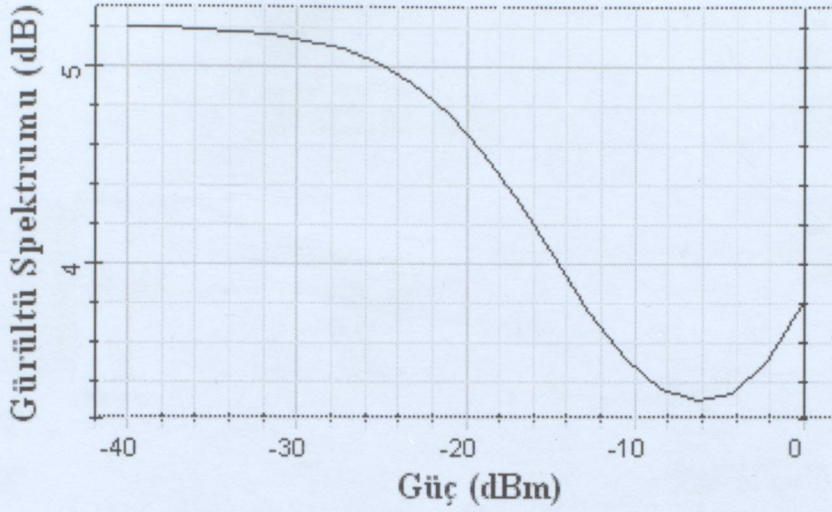


Şekil 5.4 Sinyal dalga boyuna bağlı olarak kazanç eğrisi.

Şekil 5.5'te giriş sinyal gücünün bir fonksiyonu olarak kuvvetlendirici performansını hesaplamak için kazanç doyumu görülmektedir. Giriş sinyal gücü, düşük seviyeden yüksek seviyeye olan rejime kadar -40 dBm ile 0 dBm arasında değiştirilmektedir. Kuvvetlendirici performansı kazanç ve çıkış gürültüsü ile sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Giriş sinyal gücüne karşılık kuvvetlendirilmiş sinyal.



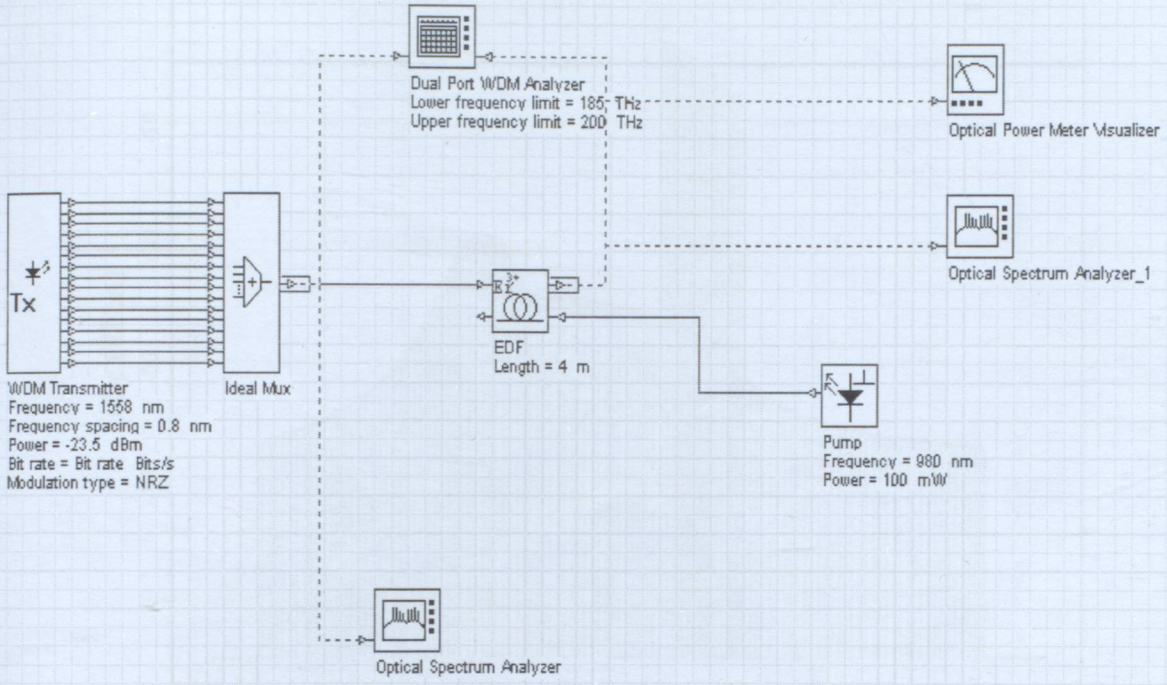
Şekil 5.6 Giriş sinyalinin gücüne karşın gürültü.

5.2 Dalga boyu Bölmeli Çoğullamalı Sistemler İçin Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici Kazancının Optimizasyonu

Bu bölümde, dalga boyu bölmeli çoğullamalı sistemlerde kullanılan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin kazancının düzleştirilmesi için optimizasyon projeleri yapılmıştır. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin kazancı fiberin boyu ve pompalama gücü optimize edilerek düzleştirilmiştir.

Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici içeren dalga boyu bölmeli çoğullamalı sistemlerin uygulamasındaki en büyük zorluklardan biri, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin kazancının dalga boyuna bağlı olmasıdır. Bu etki, kaskad bağlı erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin kanalları arasında farklı sinyal gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) oluşturur. Bunu düzeltmek için, tek biçimde olmayan kazanç yöntemi tavsiye edilebilir. Bunun için, dahili, harici filtreler kullanarak veya termal olarak kuvvetlendiricinin homojen çizgisini düşürmekle olabilir. Bu metotlar ayrıca bileşenler gerektirir ve bu bileşenleri sisteme eklemek zordur. Bu soruna çözüm bulabilen bir metot verilmiştir. Bu metot, verilen giriş gücü ve istenilen çıkış gücü için fiber boyunun ve pompalama gücünün erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici tarafından kontrol edilmesiyle yapılan optimizasyonuna bağlıdır.

Bu simülasyonda, bu metodu kullanarak erbiyum katkılı fiber bir kuvvetlendiricinin kazancının optimizasyonu yapılmıştır.

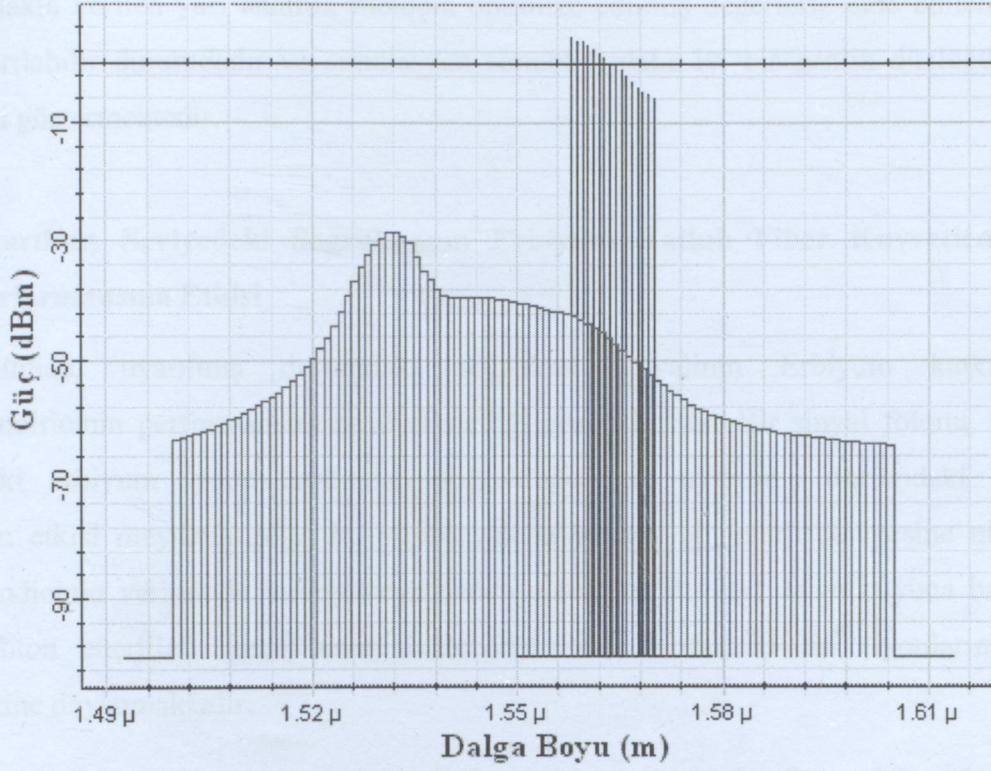


Şekil 5.7 Kazancı optimize edilmiş erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici proje şeması.

Optimizasyon hedefleri karşılaştırma açısından [4]. kaynaktaki gibi seçilmiştir. Fakat, [6]. kaynaktaki herhangi bir değer verilmediğinden dolayı simülasyonda fiber parametreleri farklı olabilir. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin girişindeki 16 adet eşitlenmiş dalga boyunda çoğullanmış sinyalin dalga boyu bölgesi, 0.8 nm aralıklarla aralıklandırılmış 12 nm (1546-1558 nm)'lik aralıktır. Herbir kanalın gücü, -26 dBm seviyesindedir ve varsayılan fiber parametreleri kullanılmıştır. Çıkışta istenilen kazanç, 23 dB seviyesindedir. Aynı zamanda, çıkış gücü olarak 8,5 dBm seviyesinin daha üzerinde ve kazanç düzleştirilmesi (G_{max}/G_{min}) ise 0.5 dB seviyesinden daha az seviyede gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Fiber boyu ve pompa gücü, istenen kazancı optimize edebilmek için çıkış gücü ve kazanç düzleştirme sınırlamaları altında parametre olarak seçilmiştir. Optik güçmetre çıkış gücünü ölçerken, çift bağlantı noktalı WDM analizörü kazanç ve düzlüğü ölçer. Pompalama gücü 100 mW ve fiber boyu 4 m'dir. Pompa gücü sınırları, 0 ile 160 mW arasında ve fiber boyu sınırları ise 1 ile 40 m arasındadır.

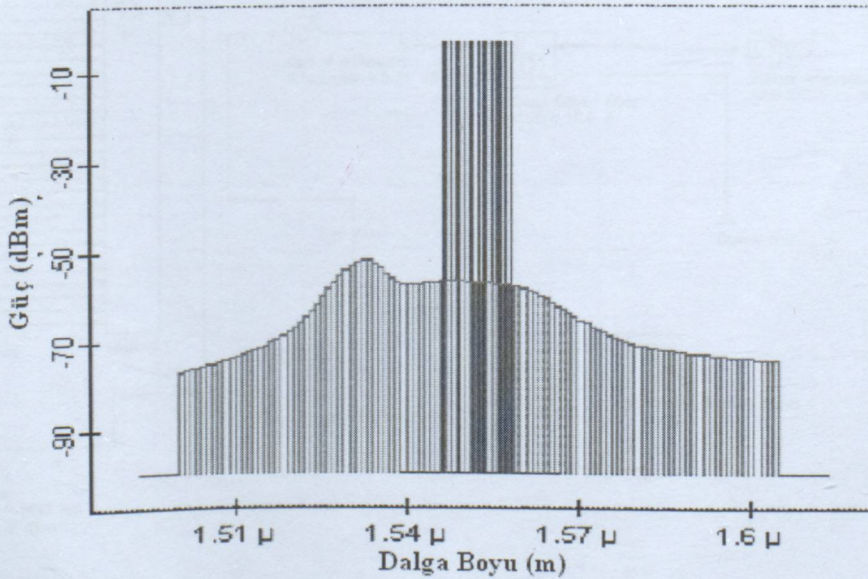
Şekil 5.8'de, pompa gücü 100 mW ve fiber boyu 4 m olarak belirlendiğinde henüz optimize edilmemiş kuvvetlendiricinin çıkış sinyali ve gürültü spektrumu gösterilmiştir. Bu durumda ortalama kazanç 30 dB ve kazanç düzleşmesi ise 2,24 dB seviyelerindedir ve gerekenin üzerindedir.



Şekil 5.8 Optimizyonu yapılmamış kuvvetlendiricinin çıkış sinyali ve gürültü spektrumu.

Yazılımda 24 adımdan sonra, pompa gücü ve fiber boyu istenen hedef değerler için optimize edileceği değerlere ulaşmıştır. İdeal pompa gücü, 24.13 mW ve fiber boyu 5.22 m olarak bulunmuştur.

Bu değerlerde, ortalama kazanç 23 dB ve kazanç düzlüğü 0.29 dB seviyelerine ulaşılmıştır. Çıkış gücü 8 mW civarındadır. Çıkış sinyali ve gürültü spektrumu Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Optimize edilmiş kuvvetlendiricinin çıkış sinyali ve gürültü spektrumu.

Giriş sinyali ideal bir çoğullayıcı tarafından çoğullanan 47 adet sinyal kümesinden oluşmaktadır. Sistem içindeki kayıplar optik zayıflatıcı ile örneklendirilmiş olup, erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici 1480 nm'deki sinyal pompasını yaymaktadır. Kazanç ve gürültü faktörü, çift çıkışlı dalga boyu bölmeli çoğullamalı analizör kullanılarak her kanal için hesaplanmıştır.

Erbium katkılı fiber kuvvetlendiricinin bazı parametreleri Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Simülasyonlar Rayleigh saçılımının etkisini de göz önünde bulundurmaktadır, fakat sonuçları değiştirecek herhangi bir etkiye sahip olmadığından ihmal edilebilir.

Uyarılmış durumdaki soğrulma hesaba katıldığında, simülasyonda kullanılacak olan uyarılmış durumdaki soğrulma kesitlerinin yüklenmesi konusuna özellikle dikkat edilmelidir. Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici bileşeni, ancak ve ancak iki düzende verilen dosyadaki uyarılmış durumdaki soğrulma kesitlerini kabul etmektedir.

- 1) Uyarılmış durumdaki soğrulma kesit dosyası, uyarılmış durumdaki soğrulma kesiti ile saçılım kesitini birlikte kabul eder.
- 2) Uyarılmış durumdaki soğrulma kesit dosyası, sadece uyarılmış durumdaki soğrulma kesitini kabul eder.

Birinci durum için, simülasyon yazılımında saçılımdan uyarılmış durumdaki soğrulmayı çıkar (extract ESA from emission) kutucuğu işaretlenirse, bileşen uyarılmış durumdaki soğrulma kesitini bu dosyadan çıkaracaktır. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de her iki durum gösterilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'den görülebileceği gibi sinyalin uyarılmış durumdaki soğrulmasının tepe noktası yaklaşık 1680 nm'dedir.

Erbium Doped Fiber Properties

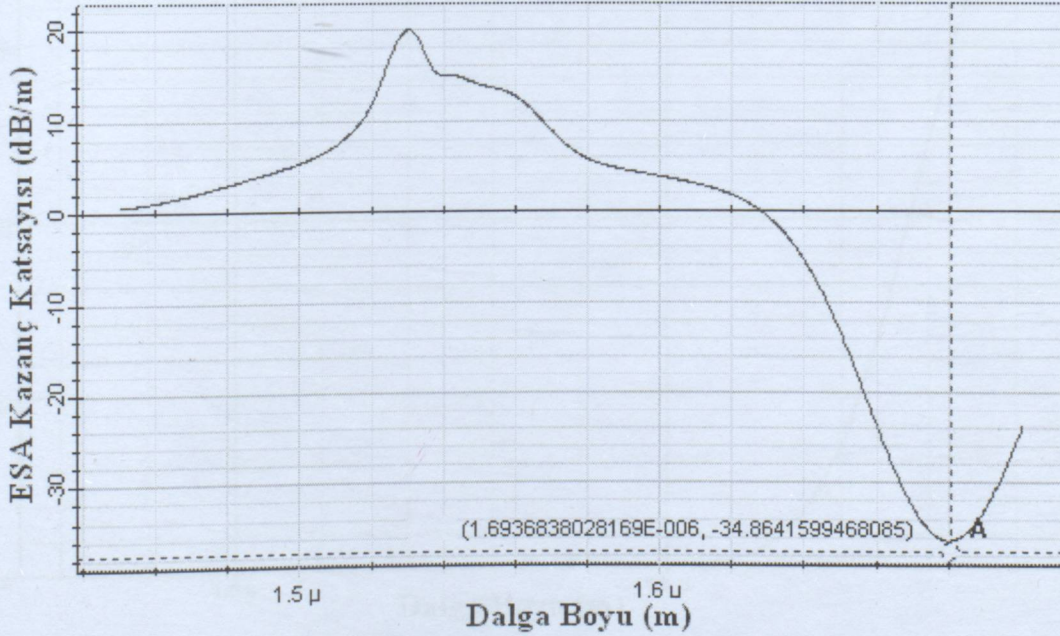
Label: Cost\$:

OK Cancel Evaluate Script

Main Cros... **Enha...** Nume... Graphs Simul... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Background loss data type	Constant		Normal
☐	Loss at 1310 nm	12.42	dB/km	Normal
☐	Background loss file name	Loss.dat		Normal
☐	Include Rayleigh scattering	☒		Normal
☐	Rayleigh constant	150	dB/Km	Normal
☐	Backscattering capture fra	Calculate		Normal
☐	Rayleigh capture file name	Capture.dat		Normal
☐	Include ion-ion interaction	☐		Normal
☐	Ion-Ion interaction effect	Homogeneous		Normal
☐	Upconversion coefficient	1e-022	m^3/s	Normal
☐	Ions per cluster	2		Normal
☐	Relative nr of clusters	12	%	Normal
☐	Include Temperature Effec	☐		Normal
☐	Temperature	20	C	Normal
☐	Cross-section Temperat	20	C	Normal
☐	Include ESA Effect	☐		Sweep
☐	ESA Cross-section file na	P:\Marcio\Samples\New Fo...		Normal
☐	Extract ESA from emission	☒		Normal

Load... Save As... Security... Help



Şekil 5.11 Uyarılmış durumdaki soğrulmanın saçılımdan çıkarılmış durumdaki kazanç sabitinin dalga boyuna bağlı değişimi.

Erbium Doped Fiber Properties

Label: Cost\$:

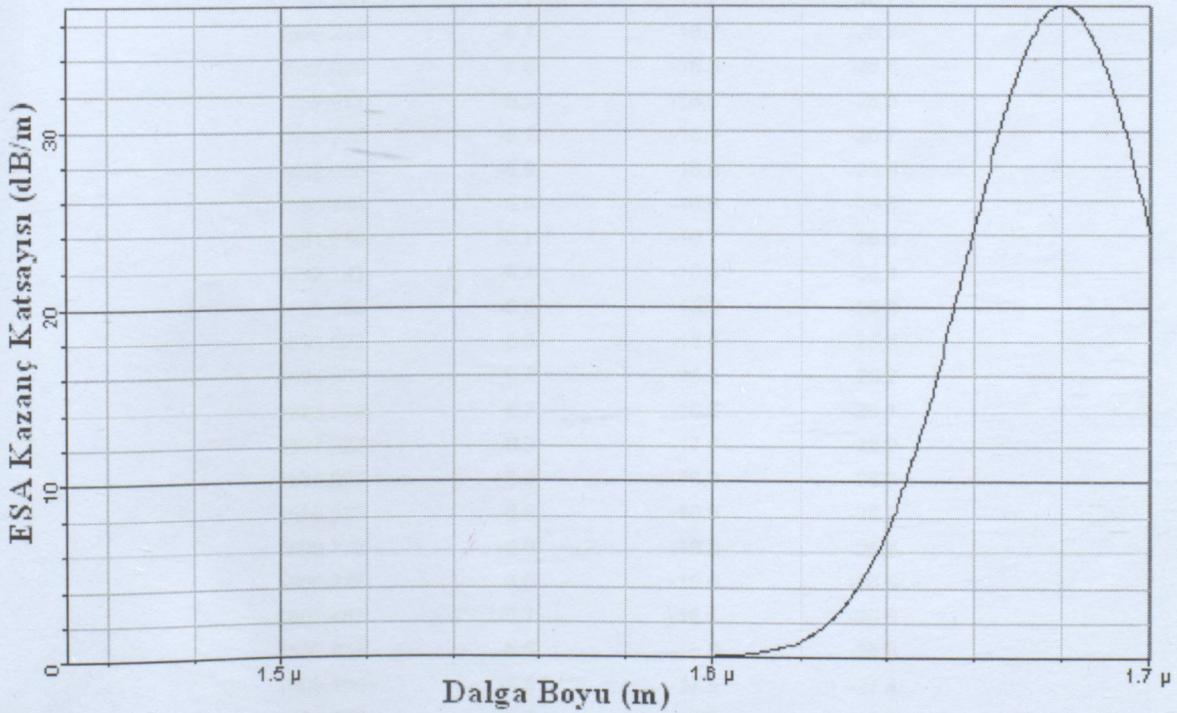
OK Cancel Evaluate Script

Main Cros... **Enha...** Nume... Graphs Simul... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Background loss data type	Constant		Normal
☐	Loss at 1310 nm	12.42	dB/km	Normal
☐	Background loss file name	Loss.dat		Normal
☐	Include Rayleigh scattering	☒		Normal
☐	Rayleigh constant	150	dB/Km	Normal
☐	Backscattering capture fra	Calculate		Normal
☐	Rayleigh capture file name	Capture.dat		Normal
☐	Include ion-ion interaction	☐		Normal
☐	Ion-ion interaction effect	Homogeneous		Normal
☐	Upconversion coefficient	1e-022	m ³ /s	Normal
☐	Ions per cluster	2		Normal
☐	Relative nr of clusters	12	%	Normal
☐	Include Temperature Effec	☐		Normal
☐	Temperature	20	C	Normal
☐	Cross-section Temperatur	20	C	Normal
☐	Include ESA Effect	☒		Sweep
☐	ESA Cross-section file na	P:\Marciot\Sample s\New Fo...		Normal
☐	Extract ESA from emission	☐		Normal

Extract ESA from emission

Load... Save As... Security... Help



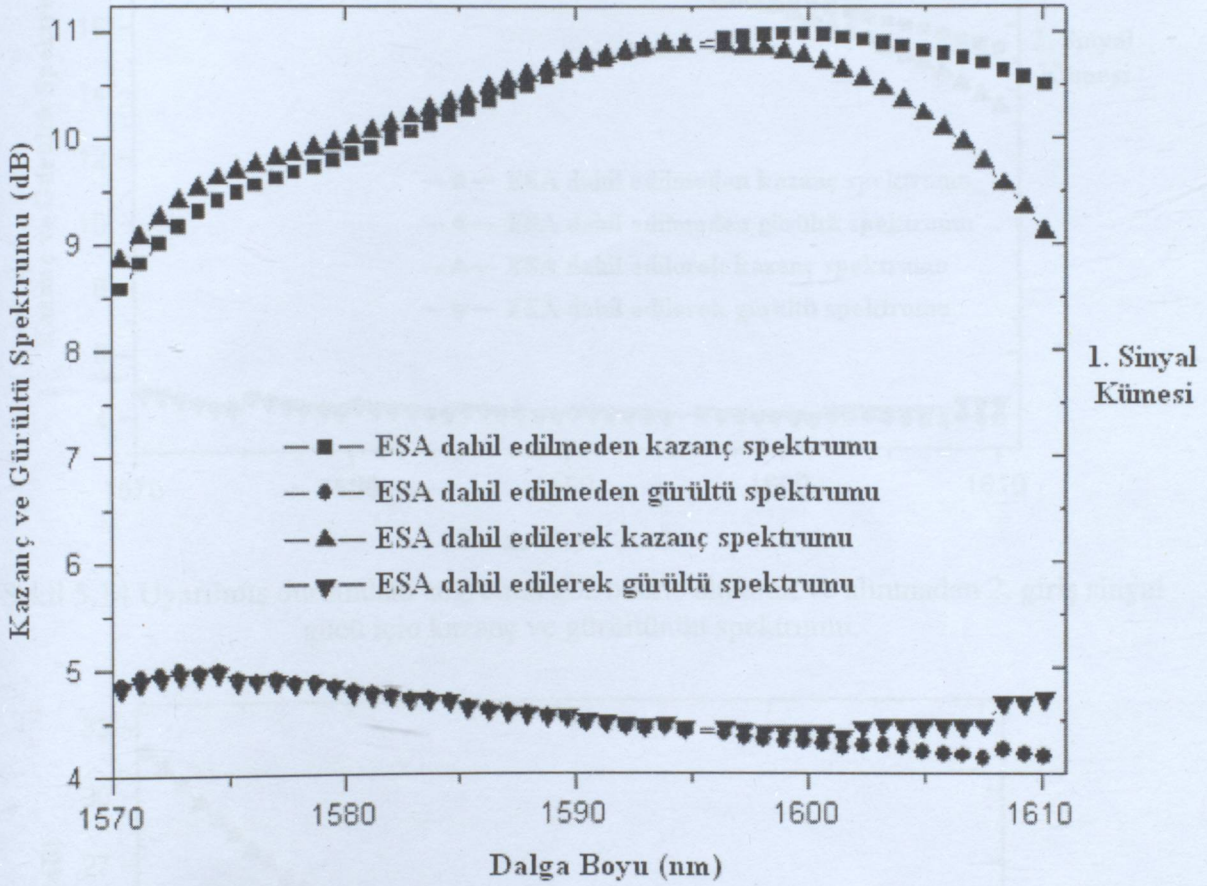
Şekil 5.12 Uyarılmış durumdaki soğrulmanın saçılımdan çıkarılmamış durumdaki kazanç sabitinin dalga boyuna bağlı değişimi.

Simülasyonlar, üç değişik sinyal giriş güçleriyle yapılmıştır. Tablo 5.1'de üç değişik sinyal için 47 kanaldaki dalga boyu ve giriş güçleri verilmiştir.

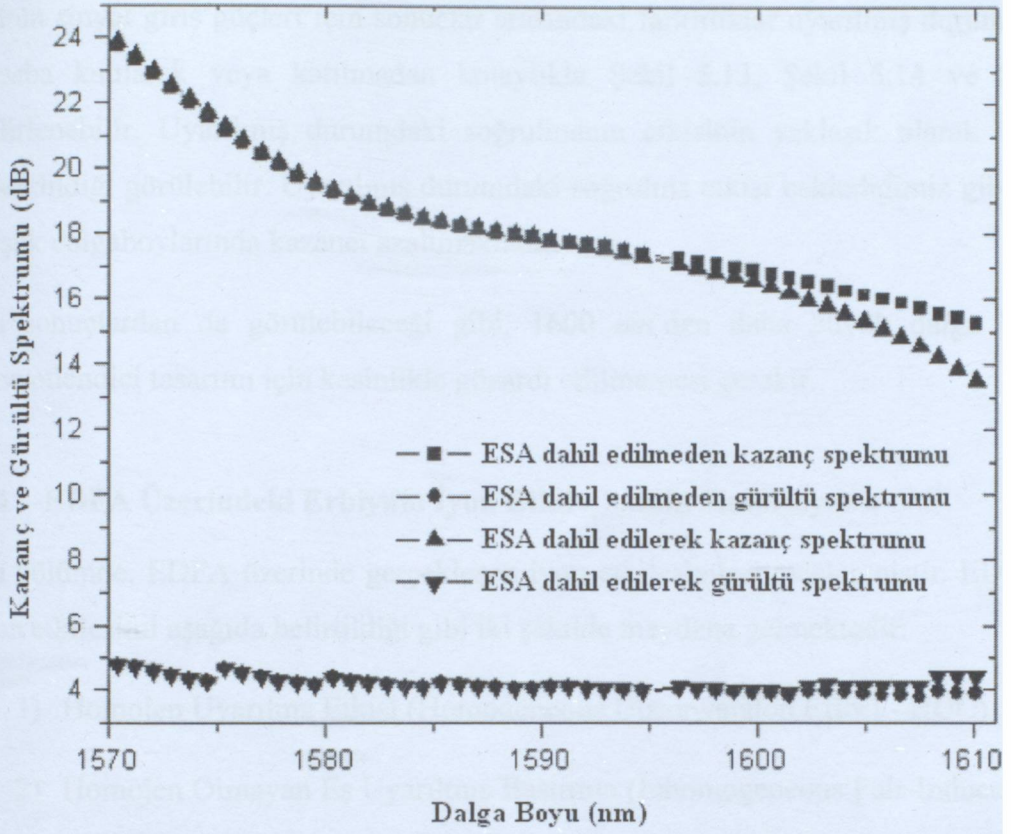
Tablo 5.1 Üç değişik sinyal için 47 adet ayrı kanaldaki dalga boyu ve giriş güçleri.

Dalga boyu (nm)	1.Giriş Sinyalinin Gücü (dBm)	2.Giriş Sinyalinin Gücü (dBm)	3.Giriş Sinyalinin Gücü (dBm)
1570.444	-7.4	-17.5	-27.6
1571.267	-7.6	-17.8	-27.8
1572.089	-7.5	-17.6	-27.6
1572.911	-8.3	-18.4	-28.5
1573.756	-6.5	-16.6	-26.6
1574.578	-6.4	-16.5	-26.6
1575.400	-6.4	-16.5	-26.5
1576.200	-7.1	-17.1	-27.1
1577.067	-6.5	-16.6	-26.6
1577.867	-6.5	-16.6	-26.6
1578.711	-6.6	-16.6	-26.6
1579.556	-6.5	-16.5	-26.5
1580.378	-6.9	-17.0	-27.0
1581.200	-6.7	-16.7	-26.7
1582.044	-6.5	-16.6	-26.6
1582.889	-6.6	-16.7	-26.7
1583.711	-6.6	-16.6	-26.6
1584.556	-6.5	-16.5	-26.5
1585.356	-6.7	-16.7	-26.7
1586.244	-6.7	-16.7	-26.7
1587.089	-6.8	-16.8	-26.8
1587.911	-6.5	-16.5	-26.5
1588.778	-6.7	-16.7	-26.7
1589.600	-5.9	-16.0	-25.9
1590.444	-6.6	-16.6	-26.5
1591.289	-6.7	-16.7	-26.6
1592.133	-6.4	-16.4	-26.4
1592.956	-6.0	-16.0	-26.0
1593.822	-5.8	-15.8	-25.8
1594.689	-6.2	-16.2	-26.2
1596.378	-6.2	-16.2	-26.1
1597.222	-6.9	-17.0	-26.9
1598.089	-6.9	-16.9	-26.8
1598.933	-6.9	-16.9	-26.8
1599.778	-6.8	-16.8	-26.7
1600.622	-6.6	-16.6	-26.5
1601.467	-6.7	-16.7	-26.6
1602.333	-6.6	-16.6	-26.6
1603.200	-7.5	-17.5	-27.4
1604.022	-6.8	-16.8	-26.7
1604.911	-6.8	-16.7	-26.7
1605.778	-6.7	-16.7	-26.6
1606.622	-6.9	-16.9	-26.8
1607.489	-6.6	-16.6	-26.5
1608.356	-6.8	-16.8	-26.7
1609.222	-6.8	-16.9	-26.8
1610.089	-6.8	-16.8	-26.7

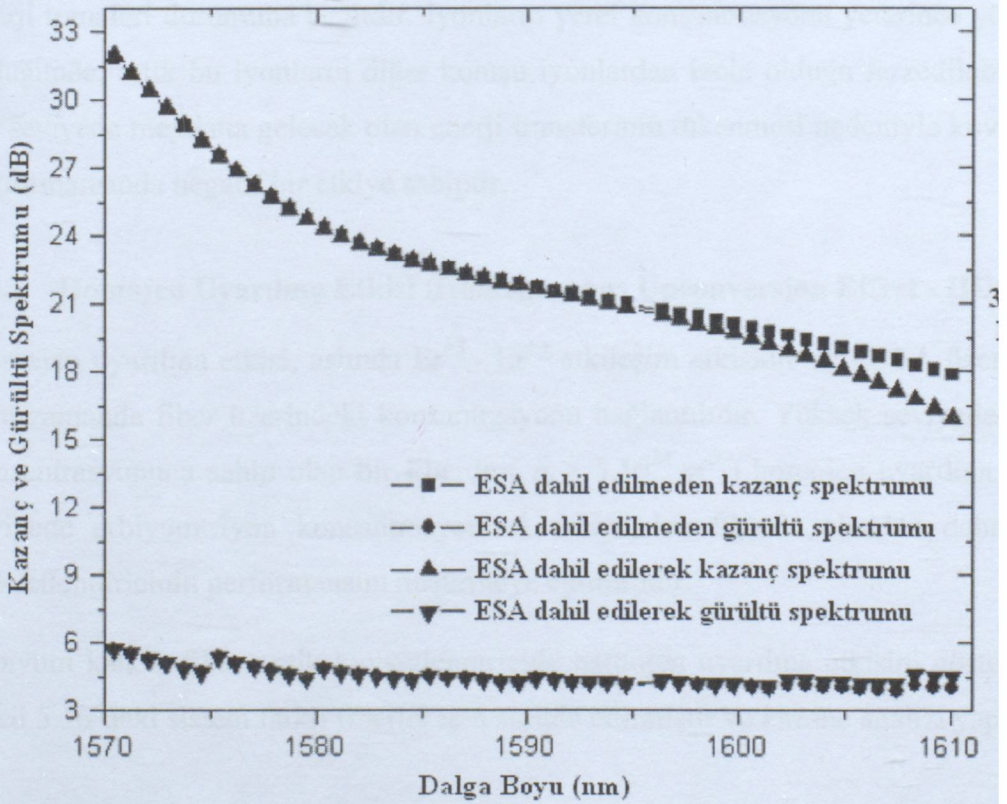
Üç değişik sinyal giriş gücü için, uyarılmış durumdaki soğrulma etkisi göz önüne alınarak ve alınmadan iki simülasyon yapılmıştır. Bu sayede, uyarılmış durumdaki soğrulmanın sonuçlardaki etkisi daha belirgin olarak gösterilmiştir. Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de Tablo 5.1’de verilen üç sinyal kombinasyonu için kazanç ve gürültü spektrumu verilmiştir.



Şekil 5.13 Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 1. giriş sinyal gücü için kazanç ve gürültünün spektrumu.



Şekil 5.14 Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 2. güç için kazanç ve gürültünün spektrumu.



Şekil 5.15 Uyarılmış durumdaki soğrulma göz önüne alınarak ve alınmadan 3. güç için kazanç ve gürültünün spektrumu.

Bütün sinyal giriş güçleri için sonuçlar arasındaki farklılıklar uyarılmış durumdaki soğrulma hesaba katılarak veya katılmadan kolaylıkla Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten belirlenebilir. Uyarılmış durumdaki soğrulmanın etkisinin yaklaşık olarak 1600 nm'lerde hissedildiği görülebilir. Uyarılmış durumdaki soğrulma etkisi beklediğimiz gibi 1600 nm'den düşük dalgaboylarında kazancı azaltmaktadır.

Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi, 1600 nm'den daha büyük dalga boylarında bir kuvvetlendirici tasarımı için kesinlikle gözardı edilmemesi gerekir.

5.4 EDFA Üzerindeki Erbiyum İyon Etkileşiminin Simülasyonu

Bu bölümde, EDFA üzerinde gerçekleşen iyon etkileşimleri incelenmiştir. EDFA üzerindeki iyon etkileşimi aşağıda belirtildiği gibi iki şekilde meydana gelmektedir:

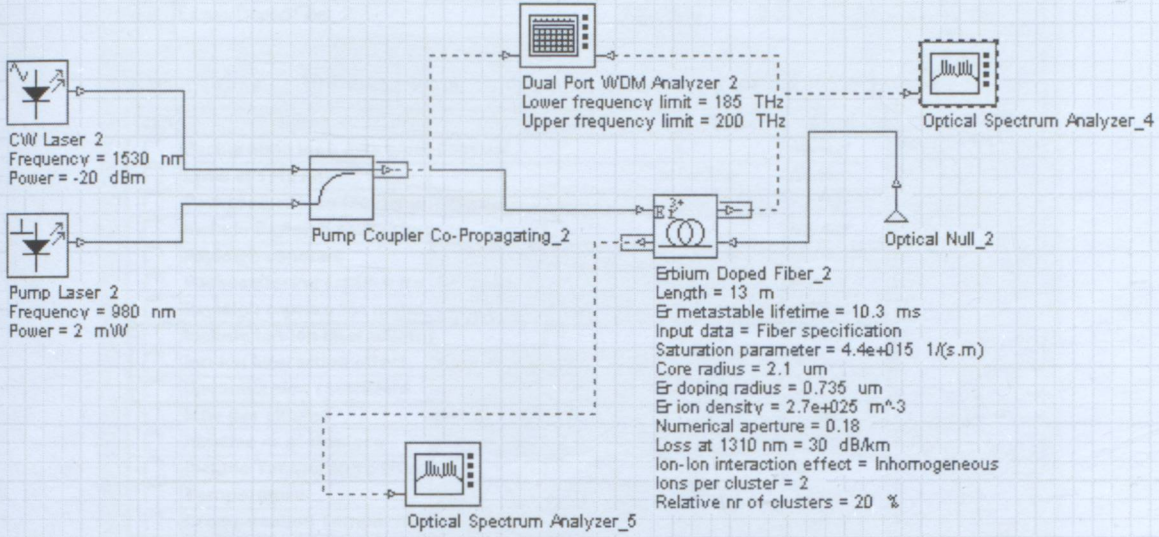
- 1) Homojen Uyarılma Etkisi (Homogeneous Upconversion Effect - HUC)
- 2) Homojen Olmayan Eş Uyarılmış Bastırma (Inhomogeneous Pair-Induced Quenching - PIQ)

Yukarıdaki tanımlamalarda açıklandığı gibi, iyon etkileşimleri katılan iyonlar arasındaki enerji transferi durumuna bağlıdır. İyonların yerel konsantrasyonu yeterince yüksek seviyede olduğunda, artık bu iyonların diğer komşu iyonlardan izole olduğu farzedilebilir. Bu durum üst seviyede meydana gelecek olan enerji transferinin tükenmesi nedeniyle kuvvetlendiricinin performansında negatif bir etkiye sahiptir.

5.4.1 Homojen Uyarılma Etkisi (Homogeneous Upconversion Effect - HUC)

Homojen uyarılma etkisi, aslında $Er^{+3} - Er^{+3}$ etkileşim etkisidir ve EDFA üzerindeki bu etki aynı zamanda fiber üzerindeki konsantrasyonu bağlantılıdır. Yüksek seviyede erbiyum iyon konsantrasyonuna sahip olan bir fiberde ($n_l > 5.10^{24} m^{-3}$) homojen uyarılma etkisi, düşük seviyede erbiyum iyon konsantrasyonuna sahip olan fiberde olandan daha fazla olarak kuvvetlendiricinin performansını düşürmeye eğilimlidir.

Erbium katkılı fiber optik kuvvetlendiricide homojen uyarılma etkisini gösterebilmek için, Şekil 5.16'daki sistem farklı fiberler için simüle edilmiştir ve kazanç analizi yapılmıştır.



Şekil 5.16 Homojen uyarılma etkisinin simüle edildiği sistem şeması.

İlk başta her fiberi karakterize etmek için, n_i erbiyum iyonlarının konsantrasyonu ve U_c iki partiküllü uyarılma katsayısı olmak üzere, homojen uyarılma etkisinin ömür süresi adında yeni bir parametre tanımlanabilir [1] :

$$\tau_{up} = \frac{1}{n_i} U_c \quad (5.1)$$

Simülasyonlar aşağıdaki 4 durum için gerçekleştirilmiştir ve bütün fiberler için aynı erbiyum iyon konsantrasyonu öngörülmüştür. Fiberler için homojen uyarılma göz önünde bulundurulduğunda, uyarılma katsayısının (U_c) değeri uyarılma ömür süresine denk gelmektedir:

1) Homojen uyarılma etkisi olmadan

2) $\tau_{UP_1} = 1 \text{ ms}$

3) $\tau_{UP_2} = 2 \text{ ms}$

4) $\tau_{UP_3} = 5 \text{ ms}$

Erbium Doped Fiber_2 Properties

Label: Erbium Doped Fiber_2 Cost\$: 0.00

OK Cancel Evaluate Script

Main Cros... **Enha...** Nume... Graphs Simul... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Background loss data type	Constant		Normal
☐	Loss at 1310 nm	30	dB/km	Normal
☐	Background loss file name	Loss.dat	...	Normal
☐	Include Rayleigh scattering	☐		Normal
☐	Rayleigh constant	150	dB/Km	Normal
☐	Backscattering capture fra	Calculate		Normal
☐	Rayleigh capture file name	Capture.dat	...	Normal
☐	Include ion-ion interaction	☐		Normal
☐	Ion-Ion interaction effect	Homogeneous		Normal
☐	Upconversion coefficient	1e-023	m^3/s	Normal
☐	Ions per cluster	2		Normal
☐	Relative nr of clusters	20	%	Normal
☐	Include Temperature Effec	☐		Normal
☐	Temperature	20	C	Normal
☐	Cross-section Temperatur	20	C	Normal
☐	Include ESA Effect	☐		Normal
☐	ESA Cross-section file na	ESAErbium.dat	...	Normal
☐	Extract ESA from emission	☒		Normal

Load... Save As... Security... Help

Erbium Doped Fiber_2 Properties

Label: Erbium Doped Fiber_2 Cost\$: 0.00

OK Cancel Evaluate Script

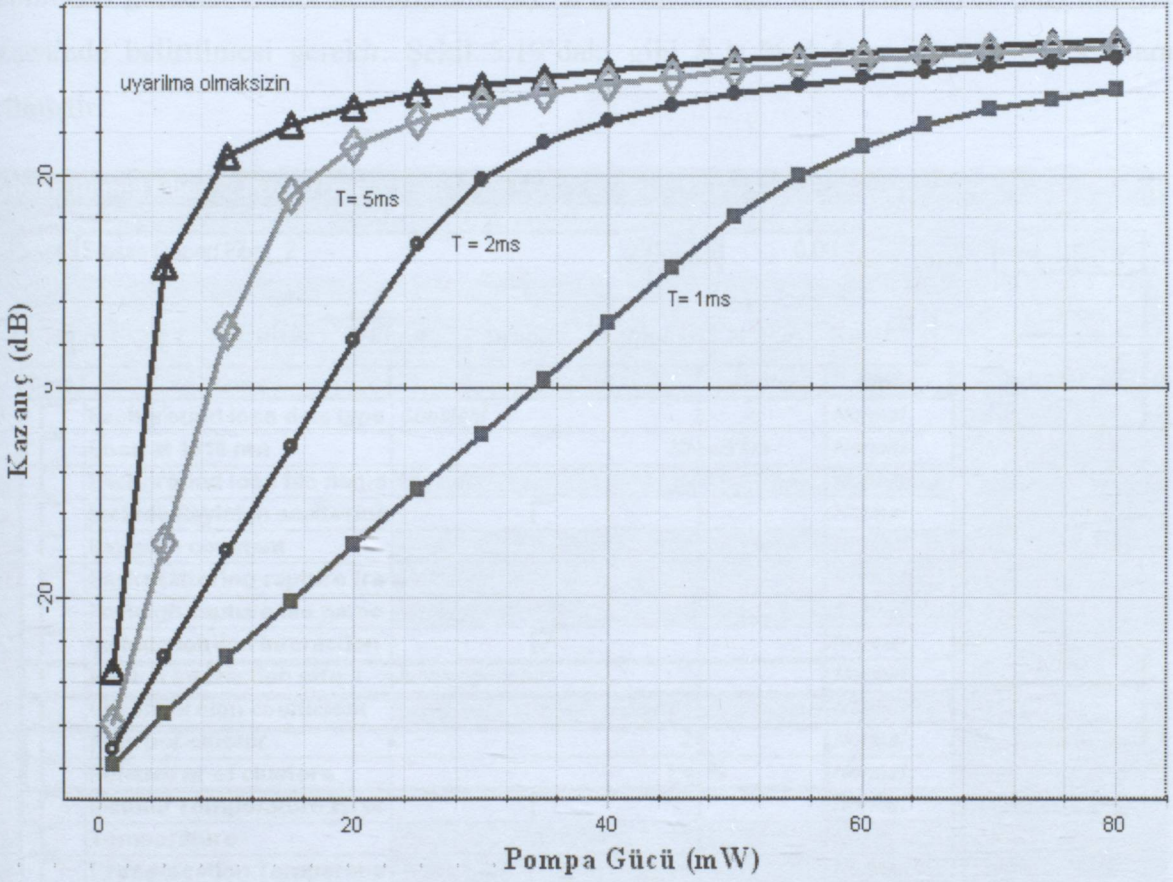
Main Cros... **Enha...** Nume... Graphs Simul... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Background loss data type	Constant		Normal
☐	Loss at 1310 nm	30	dB/km	Normal
☐	Background loss file name	Loss.dat	...	Normal
☐	Include Rayleigh scattering	☐		Normal
☐	Rayleigh constant	150	dB/Km	Normal
☐	Backscattering capture fra	Calculate		Normal
☐	Rayleigh capture file name	Capture.dat	...	Normal
☐	Include ion-ion interaction	☒		Normal
☐	Ion-Ion interaction effect	Homogeneous		Normal
☐	Upconversion coefficient	1e-023	m^3/s	Normal
☐	Ions per cluster	2		Normal
☐	Relative nr of clusters	20	%	Normal
☐	Include Temperature Effec	☐		Normal
☐	Temperature	20	C	Normal
☐	Cross-section Temperatur	20	C	Normal
☐	Include ESA Effect	☐		Normal
☐	ESA Cross-section file na	ESAErbium.dat	...	Normal
☐	Extract ESA from emission	☒		Normal

Load... Save As... Security... Help

Şekil 5.17 İyon etkileşiminin ayarlanabildiği yazılımın iyileştirme arayüzü.

Simülasyonlardan sonra, pompalama gücü eğrilerine karşın kazanç, her fiber için Şekil 5.18’de çizilmiştir. Şekil 5.18, simülasyondan elde edilen sonuçları içermektedir. Bu sonuçlar, uyarılma etkisinin EDFA’nın performansında azalmalara neden olduğunu göstermektedir. Kazançtaki azalmayı dengelemek için pompalama gücü artırılmalıdır. Simülasyon sonuçlarının gösterdiği gibi, iyon konsantrasyonuna bağlı olarak homojen uyarılma düşük konsantrasyonlarda ihmal edilebilir. Elde edilen sonuçlar, [1]. kaynaktaki sonuçlarla uyumludur.



Şekil 5.18 1550 nm’de farklı uyarılma ömür süreleri için sinyal kazançları.

5.4.2 Homojen Olmayan Eş Uyarılmış Bastırma (Inhomogeneous Pair-Induced Quenching - PIQ)

di veya daha fazla iyon arasındaki enerji transfer oranı denilen homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi, pompalama oranından belirli bir zaman ölçeğinden oldukça fazladır, bu yüzden pompalama gücünün uyarılan bütün iyonları pompalayamadığı düşünülebilir. Yazılımda kullanılan bu etki, erbiyum katkılı fiber bileşeni iyileştirme menüsünde iyon-iyon kileşimi parametresi altındaki homojen olmayan opsiyonu ile altındadır. Bu durumda, yazılımdaki göreceli demet numarasının (k) ve her demet için olan iyon sayısı (m_k)'nın fiber bileşeninde belirtilmesi gerekir. Şekil 5.19'daki gibi $k = \% 1.4$ ve $m_k = 2$ örnek olarak açıklanmıştır.

Erbium Doped Fiber_2 Properties

Label: Cost\$:

OK Cancel Evaluate Script

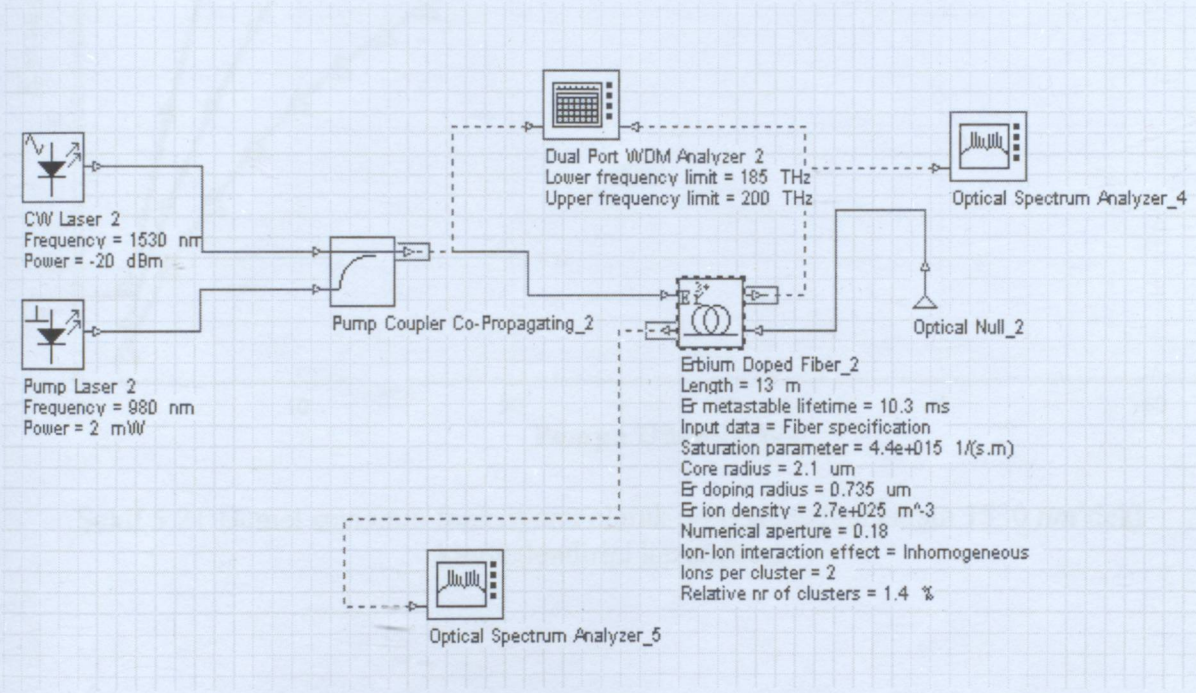
Main Cros... **Enha...** Nume... Graphs Simul... Noise Rand...

Disp	Name	Value	Units	Mode
☐	Background loss data type	Constant		Normal
☐	Loss at 1310 nm		30 dB/km	Normal
☐	Background loss file name	Loss.dat	...	Normal
☐	Include Rayleigh scattering	☐		Normal
☐	Rayleigh constant		150 dB/Km	Normal
☐	Backscattering capture fra	Calculate		Normal
☐	Rayleigh capture file name	Capture.dat	...	Normal
☐	Include ion-ion interaction	☒		Normal
☐	Ion-Ion interaction effect	Inhomogeneous		Normal
☐	Upconversion coefficient		$1e-023 \text{ m}^3/\text{s}$	Normal
☐	Ions per cluster	2		Normal
☐	Relative nr of clusters	1.4	%	Normal
☐	Include Temperature Effec	☐		Normal
☐	Temperature		20 C	Normal
☐	Cross-section Temperat		20 C	Normal
☐	Include ESA Effect	☐		Normal
☐	ESA Cross-section file na	ESAErbium.dat	...	Normal
☐	Extract ESA from emission	☒		Normal

Load... Save As... Security... Help

Şekil 5.19 k ve m_k değerlerinin ayarlanabildiği yazılımın iyileştirme arayüzü.

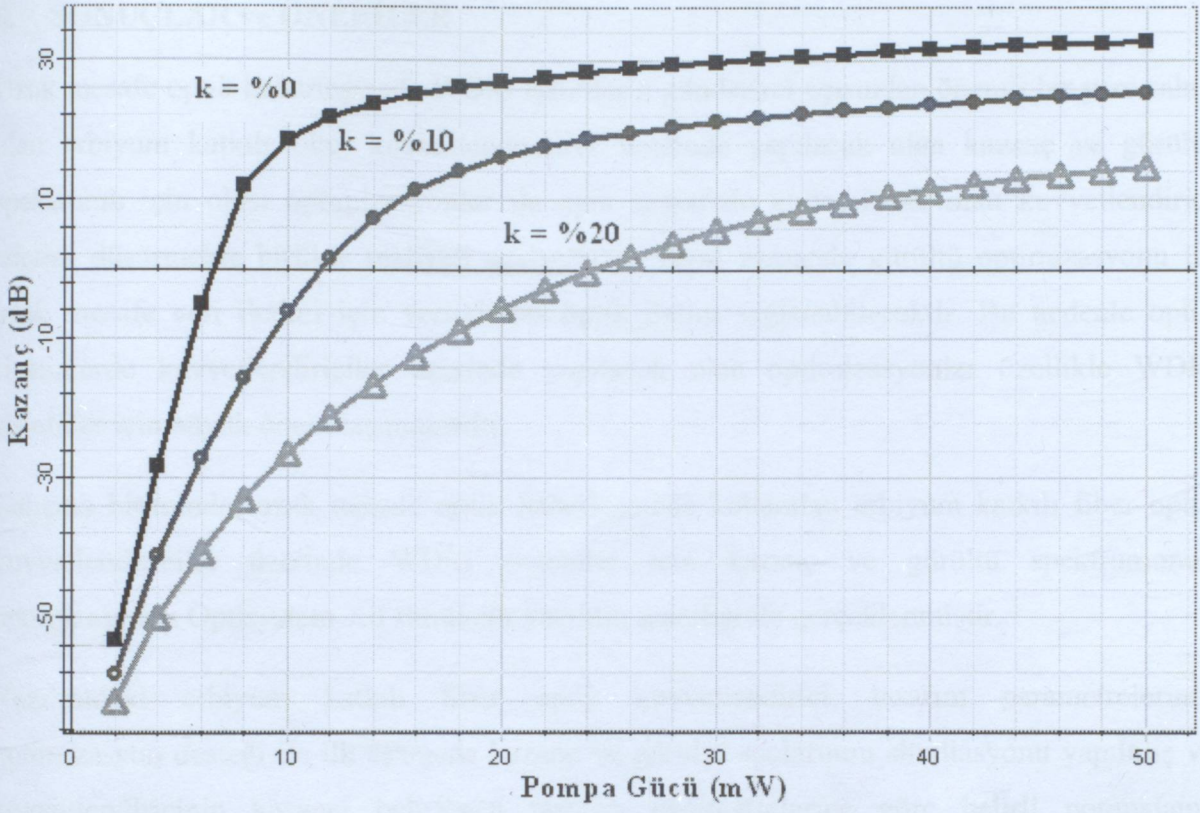
Simülasyonlar, homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisinin EDFA'nın performansında neden olduğu azalmayı göstermek için yapılmıştır. Şekil 5.19'da belirtilen fiber parametreleri ve Şekil 5.20'deki sistem şeması, simülasyonları gerçekleştirmede kullanılmıştır. Sistem, pompalama gücüne karşılık 1530 nm'deki sinyal eğrisi birleştirilerek oluşturulmuştur. Giriş sinyal gücü -20 dBm seviyesinde, pompalama gücü ise 980 nm'de 2 mW'tan 50 mW'ta değişen seviyelerde sabit tutulmuştur.



Şekil 5.20 Homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisinin simüle edildiği sistem şeması.

Yapılan simülasyonlarda, her eğri için farklı olan göreceli demet sayısı dışında bütün fiber parametreleri sabit tutulmuştur. Simülasyonlardan elde edilen üç eğri pompanın verimindeki düşüşü göstermektedir. Şekil 5.21'de, farklı iki demet sayısı ($k = \%10$ ve $k = \%20$) için hesaplanan eğrileri görülmektedir; burada aynı zamanda homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisinin olmadığı durumda ($k = \%0$) yer almaktadır.

Simülasyon sonucunda, Şekil 5.21'den görüldüğü gibi, homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi EDFA'nın performansında yüksek seviyede azalmalara neden olmaktadır. Bu sonuçlar [1]. kaynaktaki sonuçlarla aynı doğrultudadır.



Şekil 5.21 Demet sayısının fonksiyonu olarak pompa gücüne karşın 1530 nm'deki kuvvetlendirici kazançları.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Uzak mesafe optik haberleşmede WDM işaretlerin gönderimi açısından önemli bir yere sahip olan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler üzerinde yapılacak olan kazanç ve gürültü spektrumu için olası optimizasyonlar ile aynı mesafede kullanılacak olan kuvvetlendirici adetini düşürmekle birlikte maliyeti azaltacaktır. Aynı zamanda gürültü optimizasyonu ile uzak mesafe veri iletimi için verimli bir optik iletim sağlanabilecektir. Bu nedenle optik sistemlerde kuvvetlendiriciler üzerinde yapılacak olan optimizasyonlar özellikle WDM sistemler için büyük önem taşımaktadır.

Çalışma bitiminde, uzak mesafe optik haberleşmede kullanılan erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendiriciler üzerinde WDM sistemler için kazanç ve gürültü spektrumunun optimizasyonu Optisystem 7.0 simülatör yazılımı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

Yazılımdaki erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendirici, tasarım parametrelerinin optimizasyon desteği ile ilk aşamada kazanç ve gürültü spektrumu simülasyonu yapılmış ve kuvvetlendiricinin kazancı belirlenen tasarım parametrelerine göre belirli pompalama konfigürasyonları altında optimize edilmiştir. Yarı analitik metotlarla daha önceden optimize edilmiş değerlerden daha iyi bir genlik düzlüğünün elde edilmesiyle başarımlı sağlanmıştır.

Kazancı optimize edilen bu erbiyum katkılı fiber optik kuvvetlendirici, WDM sistemler için uzak mesafe veri haberleşmesinde kuvvetlendirici olarak kullanılabilir niteliktedir. Sonraki aşamada ESA (Uyarılmış Durumdaki Soğrulma, ESA) sinyalinin erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin performansına nasıl etkideği gösterilmiştir. Uyarılmış durumdaki soğrulma etkisinin 1600 nm'lerde hissedildiği görülebilir ve uyarılmış durumdaki soğrulma etkisi beklenildiği gibi 1600nm'den düşük dalga boylarında kazancı düşürmektedir. Dolayısıyla EDFA tasarım aşamasında ESA hesaba katıldığında 1600 nm dalga boyundan düşük dalga boylarında kazancın azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Son aşamada ise, EDFA üzerinde meydana gelen erbiyum iyon etkileşiminin kazanca olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu etkilerden birincisi olan homojen uyarılma etkisi, EDFA'nın performansında azalmalara neden olmaktadır. Kazançtaki bu azalmayı dengelemek için pompalama gücü artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Homojen olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi denilen ikinci etki ise, aynı birinci etkide olduğu gibi EDFA'nın performansında yüksek seviyede azalmalara neden olmaktadır. Çalışmada, demet sayısının oransal olarak azaltılması ($k = \%0$) ile olmayan eş uyarılmış bastırma etkisi, EDFA kazancı üzerinde en az seviyeye indirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Becker P. C., Olsson N. A. and Simpson J. R., (1999), Erbium-Doped Fiber Amplifiers : Fundamentals and Technology, Academic Press, San Diego.
- [2] Giles C. R., Desurvire E., Talman J. R., Simpson J. R. and Becker P. C., (1989) "2-Gbit/s signal amplification at $\lambda=1.53 \mu m$ in an erbium-doped single-mode fiber amplifier", J. Lightwave Technol., 7(4) : 651-656.
- [3] Armitage J. R., (1988) "Three-level fiber laser amplifier: A theoretical model", Appl. Opt., 27(23) : 4381-4836.
- [4] Pedersen B., Bjarklev A., Povlsen J. H., Dybdal K. and Larsen C. C., (1991) "The design of erbium-doped fiber amplifiers", J. Lightwave Technol., 9 : 1105-1112.
- [5] McCumber E., (1964) "Theory of phonon-terminated optical masers", Phys. Rev., 134: A299 – A306.
- [6] Ali M. A., Elrefaie A. F., Wagner, R. E. and Ahmed S. A, (1994), "Performance of erbium-doped fiber amplifier cascades in WDM multiple access lightwave networks", IEEE Photon. Tech. Lett., 6(9) : 1142-1145.
- [7] Park S. Y., Kim H. K., Park C. S. and Shin S. Y., (1996) "Doped fiber length and pump power of gain-flattened EDFA's", Electron. Lett., 32 : 2161-2162.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 06.06.1982

Doğum yeri İstanbul

Lise 1996-2000 Şişli Yunus Emre Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)

Lisans 2001-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2005-2008 Çizgi Elektronik Ltd Şti.

2008-Devam ediyor Nortel Networks - Netaş Ltd Şti.