

ERBİYUM KATKILI FİBER OPTİK YÜKSELTEÇLERİN (EDFA) KULLANILDIĞI UZUN MESAFE SOLİTON İLETİŞİM SİSTEMLERİNİN OPTİMİZASYONU

Murat ARI

Elektronik-Haberleşme Bölümü, Çankırı M. Y. O., Ankara Üniversitesi, Çankırı, mari@cmyo.ankara.edu.tr

(Geliş/Received: 17.11.2004; Kabul/Accepted: 21.03.2006)

ÖZET

Solitonlar, fiber optik iletişim sistemlerinde bozulmaya uğramadan yüzlerce kilometre gidebilen özel tip optik darbelerdir. Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteçler (EDFA) ise, silika fiberlerin zayıflamasının minimum olduğu 1550 nm dalga boyu civarında 40-50 nm aralıkta çalışabilen ve ticari olarak da tercih edilen optik yükselteçlerdir. Optik yükselteçlerin fiber zayıflamasını dengeleyerek kayıpsız bir optik iletişim sistemini efektif olarak sağlayabildikleri düşünüldüğünde, soliton tabanlı haberleşme sistemlerinin performansı zaman kayması etkileri tarafından sınırlanır. Bu çalışmada, soliton tabanlı bir fiber optik linkinin iletim mesafesini artırmak için zaman kaymasının nasıl kontrol edileceği üzerine daha önce matematiksel modellemesi yapılan ve iki EDFA aralığında sistemi inceleyen [1-14]'deki çalışma esas alınarak, bu sisteme pratik uygulamalardaki parametreleri içeren EDFA'ların yerleştirildiği yeni bir modelleme yapılmıştır. Zaman kayması etkilerine karşı EDFA'ların davranışları ile kazanç ve gürültü performansları incelenerek simülasyon yolu ile gösterilmiştir. Gordon Haus ve soliton etkileşimlerinden kaynaklanan sınırlayıcı zaman kayması etkilerinin birbirleri ile dengelenmesinde [1-14]'deki yaklaşıma göre alınan, uygun faz farklı soliton dizilerinin, EDFA kullanılan uzun mesafe soliton sistemlerinde de kayma etkisini minimize ederek sistem performansını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler, Erbiyum katkılı fiber optik amplifikatörler, zaman kayması, soliton, Gordon Haus etkisi, soliton etkileşimi.

THE OPTIMIZATION OF LONG DISTANCE SOLITON TRANSMISSION SYSTEMS BY USING EDFA

ABSTRACT

Solitons are special type of optic pulses which can go hundreds of kilometers without having any distortion. On the other hand, EDFA's are optical amplifiers that are commercially preferred for the wavelengths of around 1550 nm where silica Fiber's attenuation is minimum. Supposing that the attenuation of optical amplifiers are eliminated properly, the total transmission length of soliton based communication systems are limited by the timing jitter. In this study, a new model is presented for EDFA's which also includes practical parameters on how to control the timing jitter of a soliton based fiber optic communication systems based on the mathematical model of reference number 1 in the references. The behavior of the EDFA's against timing jitter and gain & noise performance were investigated and presented using simulations. As a result, it was obtained that solitons with proper phase difference minimized the jitter effect and increased the system performance based on the interactions of the Gordon Haus and limiting timing jitter in reference 1.

Keywords: Erbium doped fiber optic amplifier, timing jitter, soliton, Gordon-Haus effect, soliton interaction.

1. GİRİŞ

Fiber optik iletişim sistemlerinde, iletim mesafesini sınırlayan en önemli faktör fiber kayıplarıdır. Bu kayıpların dengelenmesinde, yüksek kazanç, düşük

gürültü, yüksek band genişliği ve büyük çıkış güç karakteristikleri yönü ile optik yükselteçler tercih edilmektedir [2,3]. Optik yükselteçler uyarılmış yayınımla (stimulated emission) ışığı yükseltirler. Geri beslemesi olmayan bir lazer mekanizması ile

gelen sinyalin frekansına ve dalga boyuna bağlı olarak optik bir kazanç sağlarlar [4]. EDFA'lar silika fiberlerin zayıflamasının minimum olduğu 1550 nm dalga boyu civarında geniş bir aralıkta çalışabilen ve ticari olarak ta tercih edilen optik yükselteçlerdir.

Optik yükselteçler ve dalga boyu bölmeli çoğullama (WDM) sistemler, fiber optik iletişim sistemlerinin kapasitesini oldukça artırır. Bu teknolojilerin ortak yanı, klasik radyo frekans sistemlerine (RF) benzerliğidir. Soliton sistemler temelde farklıdır ve fiber özelliklerine dayanır. Bu sebeple RF sistemlerle ortak yönü yoktur. Söz konusu fiber özellikleri, dispersiyon ve nonlineerliktir. Aynı ayrı düşünüldüğünde her iki özellik iletişim sistemlerini kötü yönde etkiler. Fakat belli koşullar altında nonlineerlik etkisi, dispersiyon etkisini yok eder. Bunun sonucunda elde edilen ve soliton adı verilen optik darbe yüzlerce kilometre bozulmaya uğramadan yayılabilir. Soliton darbeler, oldukça uzun mesafelere bozulmadan iletilebildiği için optik haberleşmede önemli bir çalışma alanına sahiptirler [5]. Optik soliton ilk defa teorik olarak Hasegawa ve Tappert [6] tarafından gösterilmiş ve Mollenauer et.al.[7] tarafından deneysel olarak gözlenmiştir.

EDFA'ların fiber zayıflamasını dengeleyerek kayıpsız bir optik iletişim sistemini efektif olarak sağlayabildikleri düşünüldüğünde, soliton tabanlı haberleşme sistemlerinin toplam iletim mesafesi zaman kayması etkileri tarafından belirlenir [8]. Bu çalışmada, soliton tabanlı bir fiber optik linkinin iletim mesafesini artırmak için zaman kaymasının nasıl kontrol edileceği üzerine daha önce matematiksel modellemesi yapılan ve iki EDFA aralığında sistemi inceleyen çalışma esas alınmıştır [1]. Bu çalışmada, Gordon Haus kayma etkisinin ve soliton etkileşiminin neden olduğu genlik ve frekans kayması etkilerini birbirleri ile dengeleyen bir modelleme yapılarak, soliton darbeler arasında sıfır faz farklı ve farklı faz farkına sahip durumlar için kayma etkileri hesaplanmıştır. Kritik açı olarak tanımlanan bir değer elde edilerek sistem iki EDFA aralığında incelenmiştir.

Bu çalışmada yukarıda bahsi edilen sistem için önce EDFA kullanılmadığı durumdaki iletim mesafesi sınırlaması incelenecektir. Daha sonra, yapılan yeni modelleme ile C bandında çalışan ve 1480 nm'de ileri yönde pompalanmış EDFA'yı karakterize eden oran ve yayılım eşitliklerini analiz ederek, kazanç, gürültü faktörü ve ASE gücü değişimlerinin, fiber boyu, pompa gücü, sinyal gücü ve erbiyum katkılama oranının fonksiyonu olarak elde edilecektir. Bu yolla bir EDFA'nın tipik parametrelerine bağlı kazanç gürültü faktörü performansı hesaplanacak ve bu EDFA'lar [1]'de önerilen sistemin izin verdiği ölçüde (zaman kayması optimizasyonuna göre) soliton tabanlı uzun mesafe fiber optik iletim linkine yerleştirilecektir. [1]'de yapılan çalışmada elde edilen

ve soliton darbeler arasında uygulanan kritik açının üzerindeki ve altındaki değerler ile kritik açı değeri için, EDFA kullanılan uzun mesafe optik iletişim sisteminde kayma etkisinin nasıl minimize edilebileceği simülasyon yolu ile de gözlemlenecektir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, teklif edilen optimizasyona esas teşkil eden matematiksel modelleme verilirken, üçüncü bölümde simülasyon sonuçlarının analizi yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

2. MATEMATİKSEL TEORİ VE KULLANILAN MODELLEME YÖNTEMİ

2.1. Edfa'ların Kazanç Spektrumu ve Kazanç Karakteristikleri

Yükselteç boyunca, yükseltilmeye başlanmış sinyalin optiksel gücü P ise ve saturasyon gücü P_s ise $(P/P_s) \ll 1$ için saturasyona ulaşmamış rejim göz önüne alınırsa kazanç katsayısı;

$$g(w) = \frac{g_0}{1 + (w - w_0)^2 T_2^2} \quad (1)$$

ile ifade edilir [5]. Eşitlikten görüleceği gibi atomik geçiş frekansı w_0 ile w gelen frekansı eşit olduğu zaman kazanç maksimum değerini almaktadır. Kazanç $w \neq w_0$ değerleri için azalır ve homojen genişleyen iki seviyeli sistemlerin karakteristikleri Lorentzian profiline göre çıkartılır [9].

EDFA'ların kazancı, erbiyum iyon konsantrasyonu, fiber yarıçapı, amplifikatör boyu ve pompa gücü gibi parametrelere bağlıdır. Üç seviyeli olan denklemleri birkaç lazer tipi kullanılarak her dalgaboyunda EDFA'lara adapte edebiliriz. Uyarılmış absorblama durumu (excited state absorption) gibi ortamların bulunduğu zamanlarda dördüncü seviyenin ele alınmasına gerek duyulur [10]. Genelde denklem sonuçları nümerik olarak elde edilir. Yükseltilmiş kendiliğinden yayılım (ASE) ve uyarılmış absorblama durumu ihmal edildiğinde basit iki seviyeli sistem modeli kullanılabilir. Eğer n_2 uyarılmış durumun popülasyonu ise, oran denklemi Eş. 2 ile elde edilir:

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = W_p \cdot n_1 - W_s (n_2 - n_1) - \frac{n_2}{T_1} \quad (2)$$

Burada $n_1 = n - n_2$ olarak verilir ve alt seviye (ground-state) popülasyonu olarak isimlendirilir. n_1 ise toplam atomik yoğunluktur. Uyarılmış durumdaki yaşam süresi T_1 olarak tanımlanmıştır. w_p ve w_s sırasıyla pompa ve sinyal dalgalarının iletim oranlarıdır ve bu

ilişki, $w_p = \frac{\sigma_p \cdot P_p}{a_p \cdot h \cdot \nu_p}$, $w_s = \frac{\sigma_s \cdot P_s}{a_s \cdot h \cdot \nu_s}$ şeklinde verilir.

Burada, σ_p , ν_p pompa frekansında iletim kesit alanıdır. a_p fiber içindeki pompa modunun kesit alanı ve P_p ise pompa gücüdür. σ_s , ν_s , a_s ve P_s benzer şekilde sinyal için tanımlanmıştır. w_p ve w_s için durgun durum (steady-state) çözümü yapılarak,

$$n_2 = \frac{(P'_p + P'_s)n_t}{1 + 2P'_s + P'_p}$$

şeklinde elde edilir.

$$P'_p = \frac{P_p}{P_p^{sat}} \quad \text{ve} \quad P'_s = \frac{P_s}{P_s^{sat}} \quad \text{şeklinde tanımlanır}$$

ve buradan saturasyon güçleri,

$$P_p^{sat} = \frac{a_p \cdot h \cdot \nu_p}{\sigma_p \cdot T_1} \quad P_s^{sat} = \frac{a_s \cdot h \cdot \nu_s}{\sigma_s \cdot T_1}$$

şeklinde bulunur.

Absorblama, kendiliğinden yayınma ve uyarılmış yayınma sebeplerinden dolayı pompa ve sinyal güçleri fiber boyunca değişken değerler alır. Eğer kendiliğinden yayınma ihmal edilirse pompa ve sinyal güçleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= -\sigma_p \cdot n_1 P_p - \alpha_p P_p \\ \frac{dP_s}{dz} &= \sigma_s (n_2 - n_1) P_s - \alpha_s P_s \end{aligned} \quad (3)$$

α_s sinyal, α_p pompa dalgaboyundaki fiber kayıplarıdır ve $\alpha_s = \sigma_s \cdot n_t$, $\alpha_p = \sigma_p \cdot n_t$ şeklinde verilir. Silika fiberlerdeki bu kayıp katsayıları 10-20 m arası uzunluğa sahip yükselteçler için ihmal edilebilecek seviyededir. Fakat daha uzun ve dağıtılmış durumlar için bu katsayılar göz önüne alınmalıdır. n_2 ve n_1 için verilen eşitlikler kullanılarak pompa ve sinyal güçleri Eş.4'deki son halini alır.

$$\begin{aligned} \frac{dP_p}{dz} &= \frac{(P'_s + 1) \cdot \alpha_p \cdot P_p}{1 + 2P'_s + P'_p} - \alpha_p P_p, \\ \frac{dP_s}{dz} &= \frac{(P'_p - 1) \cdot \alpha_s \cdot P_s}{1 + 2P'_s + P'_p} - \alpha_s P_s \end{aligned} \quad (4)$$

Eş. 4 ile verilen denklemlere, EDFA'daki sinyal gücünün artışı hakimdir. Küçük veya büyük sinyal yükseltmelerinin her ikisi için de bu denklemler kullanılabilir.

EDFA'lar için yapılan analizlerde, pompa ve sinyal dalgalarının her ikisinin de CW ışınlar olduğu kabulü yapılır [4]. Pratikte de EDFA'lar CW yarı iletken lazerler kullanılarak pompalanmaktadır. Fakat sinyal bir darbe katarı (puls train) şeklindedir. Darbeler arasındaki süre bit oranı ile ilgilidir. Bütün darbeler

deneysel uygulamalar sonucunda elde edilen verilere göre benzer kazançlıdır. Yeterince yüksek darbe sıklıklarında ($f_b \gg \frac{1}{T_1}$) darbe katarının ortalama gücünü cw kazancı belirler.

2.2. EDFA'larda Gürültü ve Gürültü Faktörü

Yükselteç gürültüsü sistem uygulamaları için çok önemli bir sınırlayıcı faktör olarak ortaya çıktıktan sonra üzerinde geniş kapsamlı çalışmalar yapılmıştır [11]. Yükselteç gürültüsü, gürültü faktörü olarak $NF=2n_{sp}$ eşitliğiyle verilir. Kendiliğinden yayınım faktörü olan n_{sp} , toprak (alt seviye) ve uyarılma (üst seviye) durumlarındaki n_1 ve n_2 bağıl popülasyonlarına bağlıdır ve $n_{sp}=n_2/(n_2-n_1)$ şeklinde tanımlıdır. EDFA'ların üç seviyeli pompalama operasyonu için $n_1 \neq 0$ ve $n_{sp} > 1$ değerindedir. Bu yüzden EDFA'larda gürültü faktörü ideal değer olan 3 dB'den büyüktür [5].

Gürültü faktörü $NF=(SNR)_{in}/(SNR)_{out}$ olarak bilinir. $(SNR)_{in}=P_{in}/(2 \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta \nu)$ ve $(SNR)_{out}=G \cdot P_{in}/(4 \cdot S_{sp}(\nu) \cdot \Delta \nu)$ formülleri kullanılarak EDFA için gürültü faktörü genişletilebilir:

$$NF = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} = \frac{P_{in}/(2 \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta \nu)}{G \cdot P_{in}/(4 \cdot S_{sp}(\nu) \cdot \Delta \nu)} = \frac{2 \cdot S_{sp}(\nu)}{G \cdot h \cdot \nu} \quad (5)$$

$S_{sp}(\nu)$ parametresi kendiliğinden yayınının neden olduğu gürültünün spektral yoğunluğudur. ASE gücü ise $P_a=S_{sp}(\nu) \cdot \Delta \nu$ olarak verilebilir. Buna göre $S_{sp}(\nu)=P_a/\Delta \nu$ Eş. 5'de yerine konularak EDFA'lar için gürültü faktörü elde edilir.

$$NF = \frac{2 \cdot P_a}{G \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta \nu} \quad (6)$$

Burada dikkate alınması gereken nokta ASE gücünün her iki yönde de yayıldığı kabul edilmesidir. Eğer ASE gücünün tek yönlü yayıldığı kabullenirse NF eşitliğinin payındaki 2 değeri alınmamalıdır.

Eş. 6'da görüleceği gibi EDFA'lardaki gürültü faktörü değeri ASE gücü ve kazançla direkt olarak bağlıdır. Artan ASE gücü için gürültü faktörünün de arttığı söylenebilir. Paydada bulunan kazanç parametresi de, yüksek kazanç durumlarında gürültünün düşük seviyede olabileceğini göstermektedir. Eş.6'ya göre yüksek değerli pompa güçleri için kazanç artmakta ve kazancın artışı gürültü faktörünü azaltmaktadır. Artan sinyal gücü için ise gürültü faktörü de artacaktır. Bunun sonucu olarak artan sinyal güçleri için kazanç düşecek ve kazançtaki bu düşüş ile Eş.6'da görülebileceği gibi gürültü artacaktır. Link uzunluğunun, pompa gücünün, sinyal gücünün ve katkılama oranının fonksiyonu olarak gürültü faktörü değeri fiber boyundaki artışa bağlı olarak lineer olmayan bir şekilde artacaktır. Artan mesafedeki

gürültü değeri kısa mesafelere göre daha fazladır. Bu nedenle EDFA'larda düşük gürültü faktörü için kullanılacak fiber boyunun kısa olması gerekmektedir. EDFA aralığı bu kriterler ışığında belirlendiği için Eş.2 ve 3'teki ön kabuller yapılmıştır.

2.3. EDFA'ların Kazanç Karakteristikleri ve Gürültü Faktörlerinin Minimum Birleşik Kayma Etkisi Altında Değerlendirilmesi

Kaynakları farklı, fakat etkileri aynı olan zaman kayması etkilerinden soliton etkileşimi ve Gordon Haus Kayması etkilerinin ayrı ayrı türetimi [1]'de verilmişti. Bu çalışmada yapılan modellemede, etkileşim kuvveti çok büyük olmadığı sürece, ortalama soliton aralığının iletim hat çıkışında değişmeyen ψ_0 giriş fazı olan $\psi_{zm}(Q)$ için bir değeri olduğu ve ψ_{zm} 'min;

$$\cos[2Q \cos(\psi_{zm})] + \cosh[2Q \sin(\psi_{zm})] - 2 = 0$$

çözümü olduğu verilmişti. Soliton darbeler arasında sıfır faz farkı oluşturulmuş ve bu durumda, kayma $\psi_0 = \psi_{zm}$ olarak düşünülerek darbe genişliğine (q_0) karşı hesaplama Eş. 7'ye göre yapılmıştı [1].

$$\frac{(< \delta q_n^2 >)^{1/2}}{(< \delta q_{nGH}^2 >)^{1/2}} = \left(\frac{3 \sum_{p=1}^n (b_p)^2}{z_a^2 (n)(n-1/2)(n-1)} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Eş. 7 kaynakları farklı olan soliton etkileşimi ve Gordon Haus Kaymasının ortak etkilerini, minimum birleşik kayma etkisi olarak tanımlamaktadır. Bu tanımlama, b_p ifadesi içerisinde, giriş fazı (ψ_{zm}), darbe genişliği (q_0) ile yükselteç aralığı (z_a), optik yükselteç sayısı (n) ile zayıflama, dispersiyon ve yükseltecin kendiliğinden emisyon faktörü gibi gerçek uygulamalarda kullanılan temel değişkenleri içermektedir.

Fiber boyunca sinyal, pompa ve ASE gücünün değişimini veren yayılım denklemleri, pompalama yöntemine göre değişmektedir [4]. Çift yönlü pompalama için pompa gücü (P_p^+ ve P_p^-) ve ileri yönde yayılan sinyal için sinyal gücü (P_s^+) yayılım denklemleri:

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \pm 2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^p n_2 - \sigma_{12}^p n_1] P_p^\pm \psi_p(r) r dr \pm \alpha_p P_p^\pm \quad (8)$$

$$\frac{dP_s^\pm}{dz} = \pm 2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^s n_2 - \sigma_{12}^s n_1] P_s^\pm \psi_s(r) r dr \pm \alpha_s P_s^\pm \quad (9)$$

şeklinde verilebilir. Her iki yönde yayılan yükseltilmiş kendiliğinden yayılım (ASE) ise aşağıdaki gibi ifade edilir [12].

$$\frac{dP_a^\pm}{dz} = \pm 2\pi \int_{r=0}^a [\sigma_{21}^s n_2 (P_a^\pm \Psi_s + 2P_0) - \sigma_{12}^s n_1 P_a^\pm \Psi_s(r)] r dr \pm \alpha_s P_a^\pm \quad (10)$$

$\sigma_{ij}^{p,s}(\nu)$ kesit alanı (m^2), $h_{p,s}^\nu$ foton enerjisi (joule) ve $\psi_{p,s}(r, \theta)$ normalize çizgi fonksiyonu (m^{-2})'dur. Burada kullanılan notasyon $ij = 12$ absorblama $p =$ pompa ve $ij = 21$ emisyon $s =$ sinyal içindir. Kesit alanı foton akışının taradığı birim alan olarak tanımlanabilir. Kesit alanı dalgaboyuna bağlıdır. Genelde absorblama ve uyarılmış yayılımın kesit alanları birbirine eşit değildir.

Burada α_p ve α_s fiber kaybı katsayılarıdır ve genelde uzun mesafe fiber optik iletişim linklerinde kullanılır [14]. Çünkü kısa mesafelerde bu katsayılar ihmal edilebilecek seviyededir. Bu eşitlikler homojen ve homojen olmayan nonlineer diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemlerin çözümü ancak nümerik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yukarıda verilen 3 yayılım eşitliğindeki 2π değeri θ 'ya göre integrasyondan gelmektedir. Işık şiddeti yoğunluğu (r, θ, z) koordinatlarına bağlıdır. Dolayısıyla n_1 ve n_2 değerleri de (r, θ, z)'nin birer fonksiyonudur.

Eş. 7 kaynakları farklı olan soliton etkileşimi ve Gordon Haus Kaymasının ortak etkilerini, minimum birleşik kayma etkisi olarak tanımlamaktadır. Bu çalışmada, söz konusu değişkenler Eş. 8-10 ile verilen yayılım denklemleri ile yeniden tanımlanmıştır. Bu yapılan tanımlama ile elde edilen nonlineer diferansiyel denklemlerin çözümü nümerik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerler Eş. 7 ile yapılan tanımlamadaki (n) ifadesinde yerine konarak bölüm 3'te verilen simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE ANALİZİ

Bu çalışmada Nonlineer Schrödinger denklemi MATLAB ortamında nümerik yöntemler kullanılarak çözülmüştür. Simülasyonda kullanılan giriş darbeleri,

ideal soliton darbeleri olup, $U(0, t) = A \operatorname{sech}(\frac{t}{\tau})$

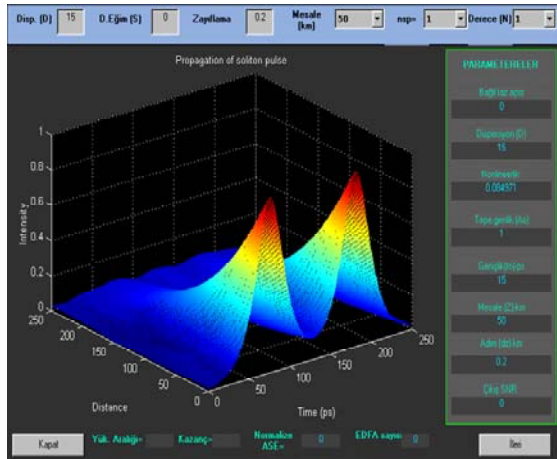
formundadır [5]. Burada A darbenin tepe genliği ($A = \sqrt{P_0}, P_0$: darbenin tepe gücü), τ darbe genişliğidir. ($t_{FWHM} = 1,763 \cdot \tau$ yarı maksimum güçte tam darbe genişliği [13]). 50 km uzunluğundaki standart tek modlu bir fiber (S-SMF) için simülasyon yapılmış olup girişteki soliton darbeleri 10 ps genişliktedir. ($\tau_{FWHM} = 17.63 \text{ ps}$) $5\tau_{FWHM}$ 'luk darbe

ayrımı göz önüne alındığında yaklaşık 10 Gbit/s hızda iletme karşılık gelir.

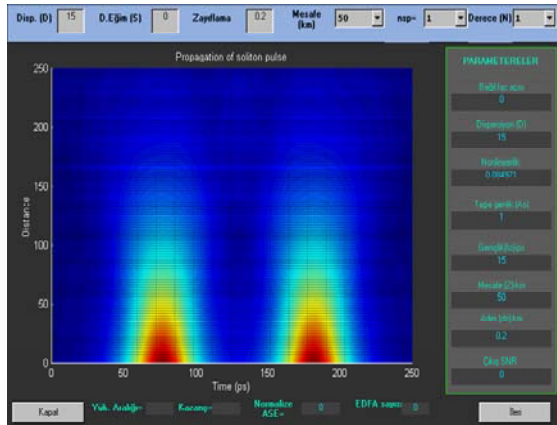
EDFA'nın kazanç profili small-signal rejimde düz değildir. Fakat soliton tabanlı iletişim sistemi large-signal rejimde çalıştığı için kazanç spektrumu small-signal rejime göre daha düzdür. Ayrıca bu çalışma yapılırken EDFA çıkışında kazanç spektrumunu düzleştirmek için bir Long-Period Fiber Bragg-Grating konulacağı ve bu yolla kazancın düzleştirilebileceği düşünülmüştür. Bu nedenle C bandı içinde EDFA linkinin kazanç band genişliğinin yeterli olduğu düşünülmüştür.

Soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkileri altındaki soliton tabanlı optik iletim hattına 0,2 dB/km'lik bir zayıflama etkisi sisteme ilave edildi. Soliton tabanlı bir fiber optik iletim hattında 0,2 dB/km'lik zayıflama alınabilecek tipik bir değerdir. Şekil 1 dispersiyon ve zayıflama etkisi altındaki kayıplı bir optik iletim hattında soliton darbelerin kısa bir mesafe içerisinde sönmüldüğünü göstermektedir.

Şekil 2 dispersiyon etkisi olmayan 0,2 dB/km'lik zayıflamaya sahip tek modlu, soliton tabanlı bir optik

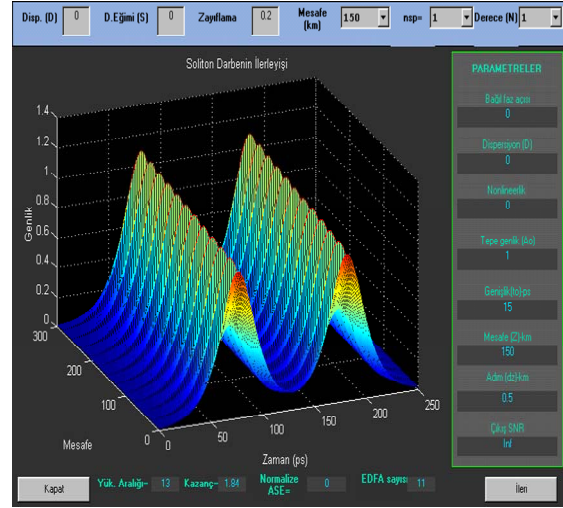


a. Üç boyutlu görünüş

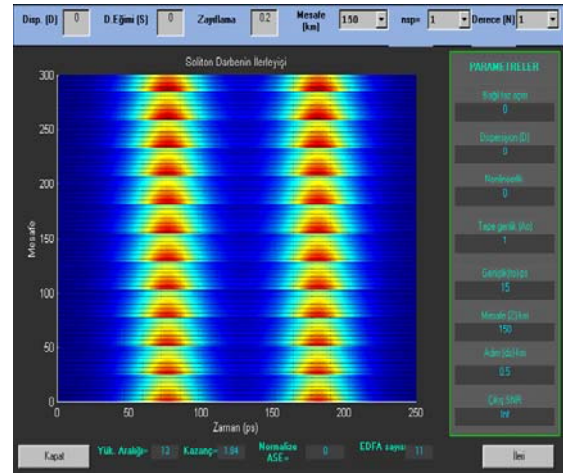


b. Üstten görünüş

Şekil 1. EDFA kullanılmayan tek modlu, kayıplı bir fiber optik iletim sistemi



a. Üç boyutlu görünüş



b. Üstten görünüş

Şekil 2. EDFA kullanılan 150 km.'lik fiber iletim hattındaki komşu soliton darbelerin ilerleyişi (dispersiyon etkisi yok)

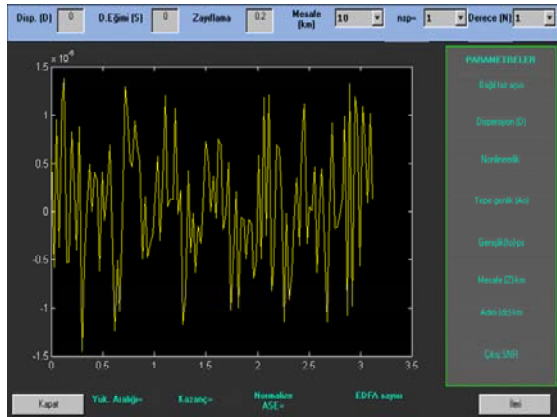
iletim hattında soliton darbenin iletim mesafesi boyunca uğradığı kaybın hatta belli aralıklarla eklenen EDFA'lar ile telafi edildiğini göstermektedir. Şekil 2'de 150 km iletim mesafesi boyunca 11 adet EDFA kullanılarak soliton darbenin şeklini koruması sağlanmıştır. EDFA aralığı optik darbenin zayıflama ve dispersiyon etkisine bağlı olarak ana karakteristiğini kaybetmeyeceği en uzun mesafe olarak yapılan matematiksel modellemeye Eş. 4 ve Eş. 7 kullanılarak nümerik analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Linke yerleştirilen EDFA'lar için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 1'de 50 km.'lik mesafede hemen hemen tümüyle sönmülenen soliton darbenin Şekil 2'de 150 km.'lik mesafe boyunca ortalama darbe şeklini muhafaza ettiği görülmektedir. Şekil 2 zayıflama etkisinin EDFA kullanılarak ortadan kaldırılabilirliğini göstermektedir.

EDFA çıkışında Eş. 10 ile belirlenen ve Şekil 3'de simülasyonu verilen ASE gürültü spektrumu elde

Tablo 1. Kullanılan EDFA Parametreleri

Parametre	Sembol	Simülasyonda Kullanılan Değer
Fiber Yarı Çapı	a	2 μ m
Pompa Absorblama Kesit Alanı	σ_{12}^p	0,75 x 10 ⁻²⁵ m ²
Sinyal Absorblama Kesit Alanı	σ_{12}^s	2.40 x 10 ⁻²⁵ m ²
Pompa Emisyon Kesit Alanı	σ_{21}^p	0.19 x 10 ⁻²⁵ m ²
Sinyal Emisyon Kesit Alanı	σ_{21}^s	3.80 x 10 ⁻²⁵ m ²
Pompa Dalgaboyu	λ_p	1480 nm
Sinyal Dalgaboyu	λ_s	1550 nm
Pompa Saturasyon Gücü	P_{sat}^p	1 mW
Sinyal Saturasyon Gücü	P_{sat}^s	10 mW
Maksimum Giriş Pompa Gücü	P_p	20 mW
Giriş Sinyal Gücü	P_s	1 mW
Erbiyum Katkılama Oranı	nt	140 ppm

**Şekil 3.** Her bir EDFA'nın ürettiği ASE gürültü fonksiyonu spektrumu

edilmiştir. İletim hattına eklenen her EDFA optik darbenin gücünü yükseltirken Eş. 10'da verildiği gibi sisteme bozucu yönde ilave gürültü eklemektedir. Bu da S/N oranının her EDFA çıkışında azalmasına sebep olmaktadır.

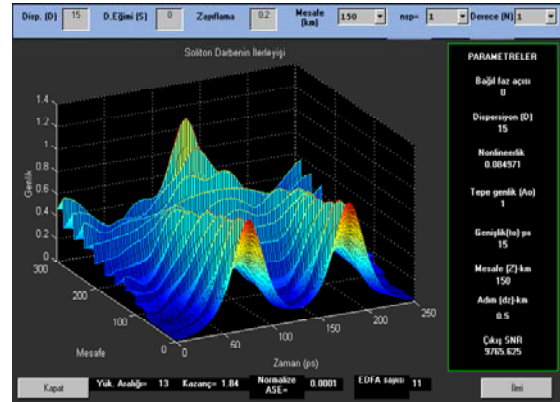
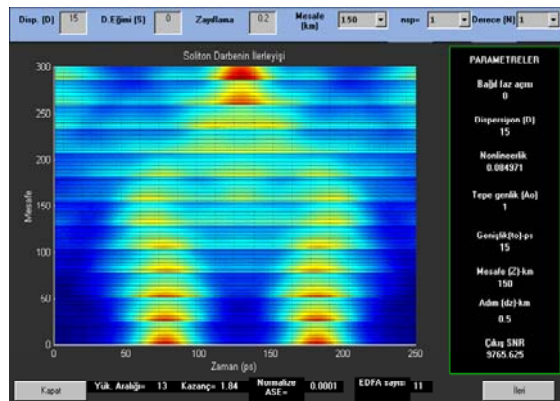
Gordon Haus etkisinin ve soliton etkileşiminin neden olduğu zaman kayması etkilerinin optik darbelerin fazı ile ilgili olduğu bilinmektedir. $\psi_{zm}=2.36$ olarak bulunan ve kritik açı olarak tanımlanan faz farkı için bu iki istenmeyen etki bir değerinin etkisini kaldırır [1]. Bu bölümde söz konusu faz farkı değerlerinden $\psi_{zm}=0$, $\psi_{zm}=1.5$ (Kritik açı altı), $\psi_{zm}=3$ (Kritik açı üstü), $\psi_{zm}=2.36$ (Kritik açı) için Tablo 1'deki parametreleri içeren EDFA'ların kullanıldığı uzun

mesafe soliton linki için Şekil 4-7'de verilen simülasyonlar incelenerek yorumlanacaktır.

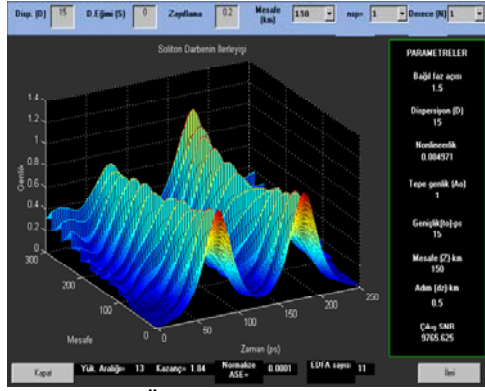
Şekil 1 ve Şekil 4'deki simülasyonların, tek başına soliton girişimi üzerine yapılan çalışmalara paralel sonuç verdiği görülmüştür [5]. Bu paralellik çalışmada önerilen yaklaşımın ve programın doğru sonuç verdiğini göstermektedir.

Şekil 4'de $\Psi_{zm} = 0$ için EDFA kullanılan kayıplı bir optik iletim hattında komşu soliton darbelerin ilerleyişi görülmektedir. 150 km.'lik optik iletim hattı 15 nSn/km.'lik dispersiyon ve 0,2 dB/km.'lik zayıflama etkisine sahiptir. Şekil 4'de kromatik dispersiyon ve zayıflama etkisine ilaveten soliton soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi altındaki optik iletim hattında soliton darbelerin komşu soliton darbelerle birleşerek çökmeler yaptığını ve soliton darbelerin karakteristiğini kaybettiğini görebiliriz.

Şekil 5 ve Şekil 6'da sırası ile, kritik açı değerinin altındaki değer olan $\Psi_{zm} = 1.5$ ve kritik açı değerinin üzerindeki değer olan $\psi_{zm}=3$ için komşu soliton darbelerin dispersiyon, zayıflama, soliton soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi altında

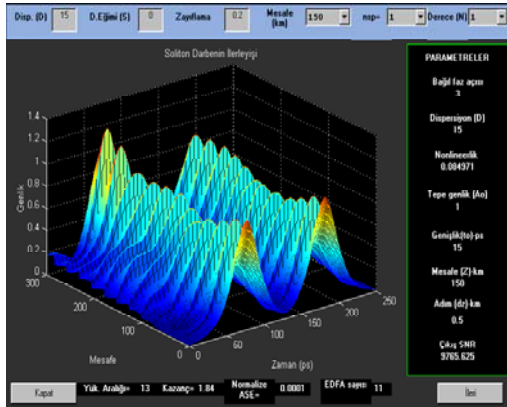
**a. Üç boyutlu görünüş****b. Üstten görünüş**

Şekil 4. $\Psi_{zm} = 0$ için EDFA kullanılan, kromatik dispersiyon ve zayıflama etkisine ilaveten soliton soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi altındaki kayıplı bir optik iletim hattında komşu soliton darbelerin ilerleyişi



Üç boyutlu görünüş

Şekil 5. $\Psi_{zm} = 1,5$ için (kritik açı altındaki değer) EDFA kullanılan, kromatik dispersiyon ve zayıflama etkisine ilaveten soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi altındaki kayıplı bir optik iletim hattında komşu soliton darbelerin ilerleyişi



Üç boyutlu görünüş

Şekil 6. $\Psi_{zm} = 3$ için (kritik açı üzerindeki değer) EDFA kullanılan, kromatik dispersiyon ve zayıflama etkisine ilaveten soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi altındaki kayıplı bir optik iletim hattında komşu soliton darbelerin ilerleyişi

ilerleyişi verilmektedir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, komşu soliton darbelerin genliklerindeki farklı artışı gözlemek mümkündür. Kritik açı değeri altında, komşu solitonlardan sağ taraftaki solitonun lehine olan genlik farkının (Şekil 5), kritik açı değeri üzerinde komşu solitonlardan sol taraftakinin lehine (Şekil 6) simetrik olarak döndüğü görülmektedir.

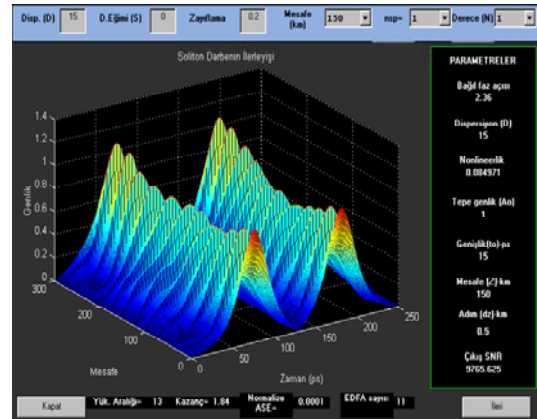
Bu fark, komşu soliton darbelerin genliklerindeki dengenin bozulmasına neden olacaktır. Soliton tabanlı iletim sisteminde, doğrusal olmayan etki ile dispersiyon arasında bir denge kurulduğu ve bu doğrusal olmayan etkinin optik darbenin gücü ile doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde, bu durum iletim mesafesi arttıkça alıcı tarafında algılama hatalarına neden olabilecektir.

Şekil 7’de kritik açı değeri olan $\Psi_{zm} = 2,36$ için komşu soliton darbelerin dispersiyon, zayıflama, soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi

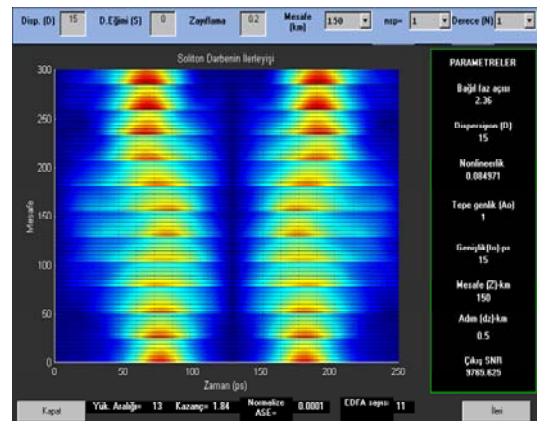
altındaki soliton darbelerin ilerleyişi verilmektedir. Bu kritik açı değerinin üzerindeki ve altındaki faz farkı değerlerinde (Şekil 5 ve 6) gözlenen komşu soliton darbelerin genliklerindeki dengesizlik $\Psi_{zm} = 2,36$ için ortadan kalkmıştır. Bu yorum ışığında, zaman kayması etkilerinin optimizasyonuna yönelik soliton darbeler arasında verilen kritik açının [1] EDFA kullanılan uzun mesafe soliton tabanlı optik iletişim sistemleri için de optimizasyonu sağladığı görülmüştür.

4. SONUÇ

Optik yükselteçlerin fiber zayıflamasını dengeleyerek kayıpsız bir optik iletişim sistemini efektif olarak sağlayabildikleri düşünüldüğünde, soliton tabanlı haberleşme sistemlerinin toplam iletim mesafesi zaman kayması etkileri tarafından belirlenir. Bu çalışmada, soliton tabanlı bir fiber optik linkinin iletim mesafesini artırmak için zaman kaymasının nasıl kontrol edileceği üzerine daha önce matematiksel modellemesi yapılan ve iki EDFA aralığında sistemi inceleyen çalışma esas alınarak [1], bu sisteme pratik uygulamalardaki parametreleri



a. Üç boyutlu görünüş



b. Üstten görünüş

Şekil 7. $\Psi_{zm} = 2,36$ (kritik açı değeri) için EDFA kullanılan, kromatik dispersiyon ve zayıflama etkisine ilaveten soliton girişimi ve Gordon Haus Kayma etkisi altındaki kayıplı bir optik iletim hattında komşu soliton darbelerin ilerleyişi

içeren EDFA'ların yerleştirildiği yeni bir modelleme yapılmıştır. Yapılan yeni modelleme ile C bandında çalışan ve 1480 nm'de ileri yönde pompalanmış EDFA'yı karakterize eden oran ve yayılım eşitlikleri analiz edilmiş ve kazanç, gürültü faktörü ve ASE gücü değişimleri, fiber boyu, pompa gücü, sinyal gücü ve erbiyum katkılama oranının fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Elde edilen oran ve yayılım eşitlikleri 4. dereceden Runge-Kutta metodu ile nümerik olarak çözümlenmiş ve soliton tabanlı uzun mesafe fiber optik linke sistemin izin verdiği ölçüde yerleştirilmiştir. Mat-Lab 6.0'da gerçekleştirilen simülasyon çıktıları üzerinden değerlendirme ve yorumlar yapılmıştır.

Bölüm 3'te şekil 5 ve şekil 6 ile verilen simülasyon sonuçlarının yorumu ışığında zaman kayması etkilerinin optimizasyonu için, soliton darbeler arasında verilecek kritik açı değerinin altındaki ve üzerindeki değerlerde komşu soliton darbelerin genliklerindeki farklı artış gözlenirken, kritik açı değeri için komşu soliton darbelerin genliklerindeki bu dengesizliğin ortadan kalktığı görülmüştür.

Soliton tabanlı iletişim sistemlerinde, nonlinear etki ile dispersiyon arasında bir denge kurulduğu ve bu nonlinear etkinin optik darbenin genliği ile ilişkili olduğu düşünüldüğünde, komşu soliton darbelerin genliklerindeki dengesizliğin giderileceği durum için optimizasyon sağlanmıştır diyebiliriz.

Bu çalışmada verilen EDFA modellemesinde pasif elemanların etkisi ihmal edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, pasif elemanlar da modellenerek istenilen aralıklara bloklar halinde yerleştirilebilirse simülasyon sonuçlarının pratik değerlere daha fazla yaklaşacağı önerisini yapmak doğru olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Göktaş H., Arı M. "Soliton İletişim Sistemlerinin Optimizasyonu Üzerine Bir Yaklaşım Modeli", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.** Cilt 19, No 3, 343-349, Eylül 2004.
2. Arı M., Altuncu A., Nakipoğlu C. "Erbiyum Katkılı Fiber Optik Yükselteçlerin (EDFA) Modellemesi ve Bilgisayarlı Kazanç Simülasyonu", **Elektr.-Elektro.-Bilg. Müh. 8.Ulusal Kong.**, 487-491 Gaziantep, 1999.
3. Chapman D.A., "Erbium doped fiber amplifiers: the latest revolution in optical communications", **Electro. & Commun. Engine. J.**, 59-62, 1994.
4. Uguhart P., Whitley T.J., "Long Span Fiber Amplifiers", **Applied Optics**, Vol. 29, No.24, 3503-3509, 1998
5. G.P. Agrawal, "Non-linear fibre optics, 2nd Ad.", **Academic Press**, London, 1995.
6. A. Hasegawa and F. Tappert, "Transmission of stationary optical pulses in dispersive dielectric fibers", **Appl. Phys. Lett.**, 23 (3): 142-144, 1973.
7. Mollenauer L. F. Stolen R. H. and Gordon J.P., "Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibres", **Physics Rev. Lett.** 45:1095-96, 1980.
8. A.N. Pinto, G.P. Agrawal, "Effect of soliton interaction on timing jitter in comm. Syst.", **J. Lightwave Tech.**, 16(4): 381-385, 1998.
9. Siegman A. E., "Lasers University Science Book", **Mill Valley**, CA, 1986.
10. M. Arı, C. Taplamacıoğlu, H. Göktaş, "Analysis of Erbium Doped Fibre Amplifiers", **Third Int. Conf. on Electr. and Electro. Eng. Dec.**, Bursa, 1-680, 2003.
11. Kikuchi K. "Noise in Optical Amplifier", **Electronic Letter.** 26., 1182-1185, 1990.
12. Giles CR and Desurvire C.R., **J. Lightwave Tech.** 9, 147-150, 271-275, 1991.
13. Y. Kodama and K. Nozaki, "Soliton interaction in optical fibres", **Opt. Lett.**, 12 (12):, 1987.
14. Keong-Po Ho "Phase Statistics of the Soliton" **JOSAB**, 21 (2): 266-272, 2004.