

Pasif Optik Ağlarda Performans Analizi ve Uygulamaları

Özge Güre, N. Özlem Ünverdi
Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul
ozgegure@ieee.org, unverdi@yildiz.edu.tr

Özet: Günümüzde, haberleşme ağlarında veri, ses ve video trafiğinin yanında yeni uygulamalarda da yüksek band genişliğini sağlayan fiber teknolojisi, son kullanıcıya kadar erişmiştir. Bu yapı, FTTH (Fiber-to-the-Home, Eve Kadar Fiber) adıyla anılmaktadır ve maliyetleri düşüren PON (Passive Optical Networks, Pasif Optik Ağlar) teknolojileri hayatımıza girmiştir. Performansın artırılmasının temel amacı, daha uzak mesafelere ve daha çok kullanıcıya ulaşma isteğine dayanır. Bu çalışmada, pasif optik ağlarda, OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile teorideki güç bütçesi hesabına uygun optik iletişim performansının artırılması için geliştirilebilecek olan topolojiler incelenmiştir. Sisteme eklenen elektro-optik elemanların PON üzerindeki etkileri, BER (Bit Error Rate, Bit Hat Oranı) diyagramları, zaman domeni ve spektrum çıktılarından yararlanılarak analiz edilmiştir.

1. Giriş

John Tyndall'ın, ışığın, bir su akıntısına kılavuzluk edebileceğini deneyle kanıtlaması ve Alexander Graham Bell'in, ses sinyallerini ışık vasıtasıyla gönderebilen fotofonu geliştirmesiyle başlayan optik haberleşme konusundaki çalışmalar, bugünün tam yansıma prensibine göre çalışan fiber optik teknolojisine temel olmuştur. Veriyi nakledecek optik kablo şebekesi fikirleri, lazerin geliştirilmesi ve ışığın kılavuzluğu için cam elyafın kullanılması çalışmaları ile devam eden fiber optik süreci sonunda optik fiberler, bugün haberleşme sistemleri için vazgeçilmez veri taşıyıcıları olmuşlardır. Sonraki dönemlerde çeşitli standartların konulması ve üretici firmaların yeni buluşlarıyla değişik optik fiber tipleri üretilmeye başlanmış ve optik fiber zayıflaması en az seviyeye indirilmiştir. Optik fiberlerin iletişim sistemlerinde kullanım biçimleri, hız, verim ve daha çok kullanıcıya hitap etme yönünden büyük önem taşımakta ve günümüzde halen fiber optik çalışmaları devam etmektedir. Bu yönüyle dünyada daha çok evlere kadar fiber olarak bilinen pasif optik ağların kullanılması, fiber optik iletişimde farklı bir pencere açmıştır.

Bu çalışmada, kullanımı her geçen gün yaygınlaşan pasif optik ağlar incelenmiştir. Çalışmanın 2. Bölümü'nde, son kullanıcıya kadar giden optik haberleşme sistemleri açıklanmış ve 3. Bölüm'de, pasif optik ağların yapısı ve kullanılan çoğullama sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. 4. Bölüm'de, OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile pasif optik ağ uygulamaları analiz edilmiş ve 5. Bölüm'de elde edilen sonuçlar yorumlanarak değerlendirilmiştir.

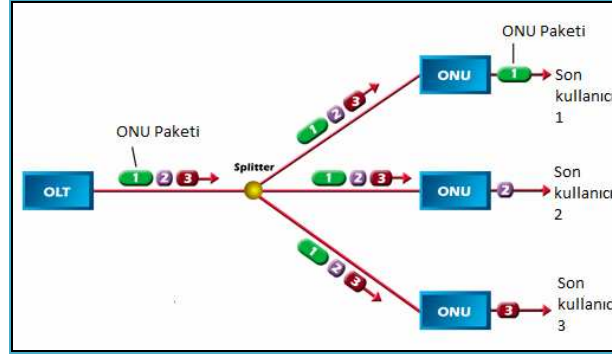
2. Son Kullanıcıya Kadar Fiber Sistemleri

Son kullanıcılara kadar erişen fiber ağların genel adı FTTx olup "x" terimi uygulamalardaki farklılıkları belirtmektedir. Farklı "x" terimleri şu şekilde açıklanabilir:

FTTB'de (Fiber to the Building, Binaya Kadar Fiber), merkez santral ofisindeki anahtarlama cihazından çıkan optik fiber, binanın sınırlarına kadar ulaşır ve daha sonra çift sarmal (twisted-pair) kablo ile binadaki dairelere hizmet verilir. FTTC'de (Fiber to the Curb, Kaldırıma Kadar Fiber), merkez santral ofisinden çıkan optik fiber, abonenin yaklaşık olarak 300 m kadar yakınındaki bir anahtarlama cihazına kadar getirilir. Buradan aboneye göre koaksiyel kablo, çift sarmal bakır kablo ya da optik fiberle müşteriye kadar bağlantı hizmeti verilir. FTTH'de (Fiber to the Home, Eve Kadar Fiber), merkez santral ofis ekipmanından çıkan optik fiber, direkt olarak ev kullanıcısına kadar götürülür. FTTCab'de (Fiber to the Cabinet, Kabinete Kadar Fiber), optik fiber, abonenin yaklaşık olarak 1 km yakınına kadar döşenir ve bu uygulamaya FTTN (Fiber to the Node, Düğümüne Kadar Fiber) adı verilir [1].

3. Pasif Optik Ağlar

Şekil 1'de görüldüğü gibi, PON yapısında, OLT (Optical Line Termination, Optik Hat Sonlandırıcı), ONU (Optical Network Unit, Optik Ağ Ünitesi), OLT ve ONU'lar arasında bilgi akışını ayıran ve birleştiren optik bölücü ve bu cihazları birbirine bağlayan fiber optik kablolardan meydana gelir. Merkez ofise yerleştirilen OLT birimi, verinin, optik dağıtım ağı boyunca çift yönlü olarak iletilmesini sağlar. OLT cihazı, aşağı yöndeki iletim için şehir içi ağdan aldığı ses, veri ve video trafiğini tüm ONT cihazlarına dağıtır; yukarı yönde ise aşağı yöndeki iletimin tersine farklı içerik ve çeşitteki verilerin alınması ve şehir içi dağıtımından sorumludur. ONU birimi, doğrudan kullanıcının evine ya da işyerine yerleştirilir. ONT adı da verilen bu cihaz, gerekli elektriksel-optik dönüşümleri sağlayarak optik ağ içerisinde bağlantı noktası oluşturur [2, 3].



Şekil 1. Pasif optik ağ bileşenleri.

OLT'den çıkan optik bilgi, ayrıştırıcı ile tüm ONU'lara dağıtılır ve ONU'lar, gelen bilgiyi eğer kendisine gönderilmiş ise alarak işler. ONU'ların kendisine ait olmayan bilgiyi de alma durumu olduğundan geliştirilecek olan servislerin giden paketlerin gizliliğini sağlaması önem arz eder. Diğer taraftan tüm ONU'lardan OLT'ye gönderilecek tek bir optik fiber hattı kullanmak durumunda kalınacağından, gönderilen verilerin hat üzerinde çakışmasını engelleyecek TDMA (Time Division Multiple Access, Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) ve WDMA (Wavelength Division Multiple Access, Dalgaboyu Bölmeli Çoklu Erişim) gibi çoklu erişim sistemlerinin kullanılması gerekir.

ODN (Optical Distribution Network, Optik Dağıtım Ağı), genel olarak OLT ve ONT arasında iletimi sağlayan elemanları ve iletim ortamını ifade eder. Bölücü (splitter), fiber optik kablolar, ek kutusu ve saha dolabı gibi pasif elemanların yer aldığı pasif optik ağlarda, abone lokasyonları, fiziksel özellikleri, çevre şartları ve maliyet göz önünde bulundurularak yol topolojisi, halka topolojisi, yıldız topolojisi, ağaç topolojisi ve örgü topolojisi gibi yapı tipleri kullanılır.

Pasif optik ağlar, geliştirildikleri teknoloji, destekledikleri hız ve çoğullama yöntemi açısından APON (ATM PON), BPON (BroadBand PON, Genişband PON), EPON (Ethernet PON), GPON (Gigabit PON), GePON (Gigabit Ethernet PON) ve NGPON (Next Generation PON, Yeni Nesil PON) olarak sınıflandırılır [4].

APON teknolojisinde, OLT ve ONU arasındaki bağlantı, bağlantı yönelimli olan ATM (Asynchronous Transfer Mode, Asenkron Transfer Modu) sanal devreleri olarak kurulur. G.983.1, simetrik 155 Mbps aşağı ve yukarı yönde bit hızıyla APON mimarisini içerir. Bu özellik, 2001 yılında geliştirilerek 155 Mbps yukarı yön, 622 Mbps aşağı yön ve simetrik 622 Mbps iletim ile BPON ortaya çıkmıştır.

EPON teknolojisinde, diğer PON standartlarından farklı olarak ethernet standardı temel alınır. Veri iletimi için sabit ATM hücreleri yerine uzunluğu değişebilen ethernet paketleri kullanılır. Ethernet teknolojisi, kolay yönetim, ethernet bazında bağlantı, müşteri ve merkezdeki IP (İnternet Protokol, İnternet Protokolü) ekipmanlarının çalışması yeteneğini sağlar.

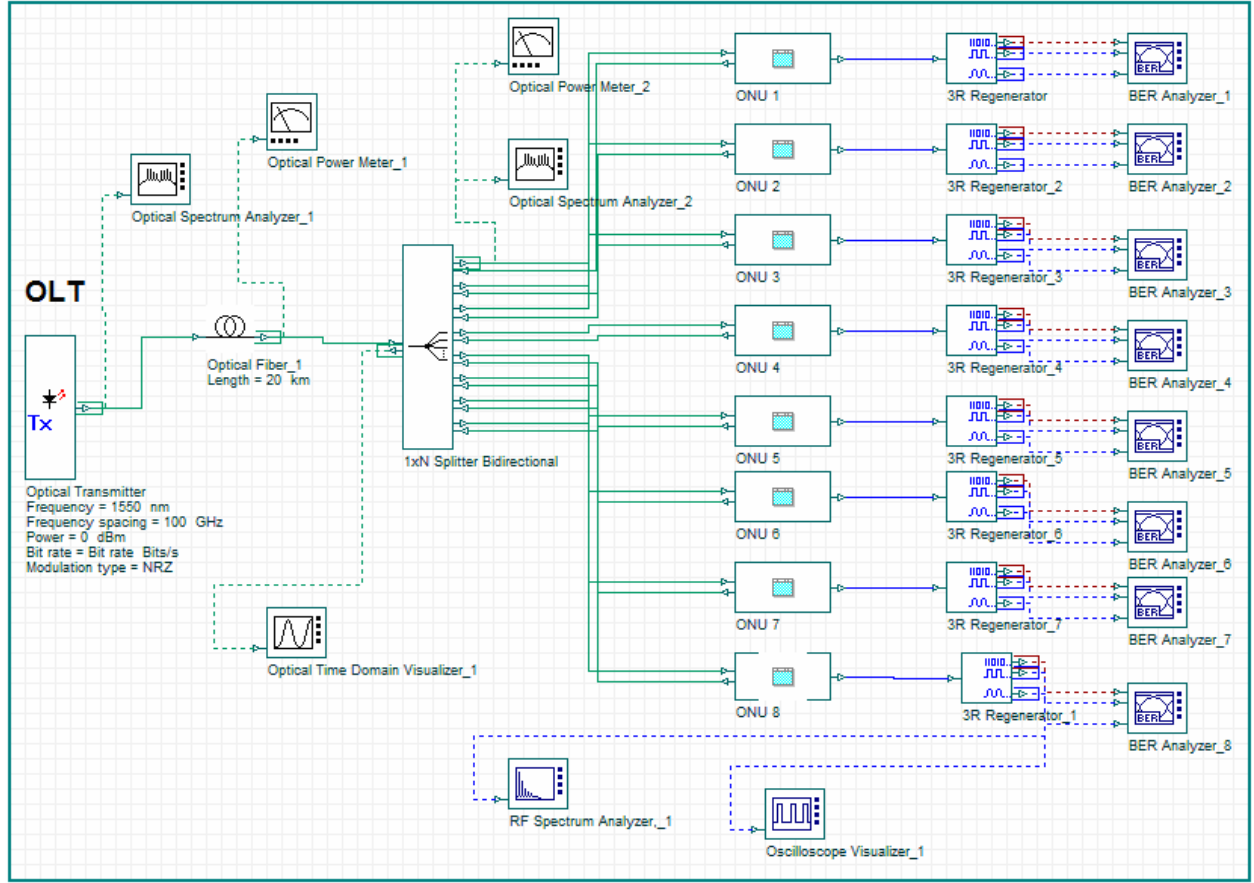
G.984 standardıyla yayınlanan GPON teknolojisi, BPON teknolojisinin geliştirilmiş versiyonudur. 2.488 Mbps gibi yüksek hızları simetrik olarak desteklemekle birlikte daha çok 2488/1244 Mbps aşağı/yukarı hızlarında kullanılır. BPON'daki eski nesil ATM çerçeveleri yerine GEM (GPON Encapsulation Method, GPON Kapsülleme Metodu) adı verilen çerçevenin kullanılması, optik bölme oranını 128'e kadar destekleyen GPON mimarisinin avantajları arasında yer alır. Bu yapı ile TDM, ethernet ve IP gibi farklı yapıdaki paketlerin çerçevelenmesi sağlanır [5]. GPON teknolojisi, kullanımı en çok yaygınlaşan pasif optik ağ türüdür.

4. Pasif Optik Ağ Uygulamaları

Bu bölümde, OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile tasarlanan pasif optik ağ topolojilerinde değiştirilen bileşen özellikleri ve elektro-optik elemanların pasif optik ağ üzerindeki etkileri incelenmiştir [6].

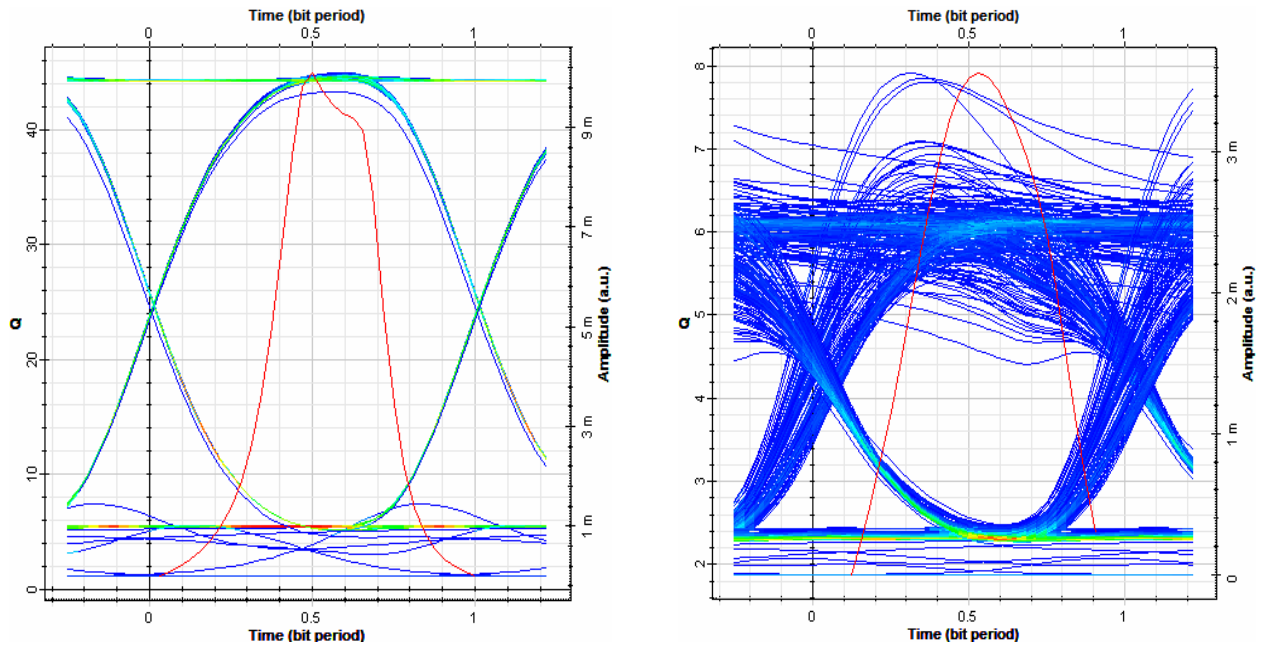
4.1 Pasif Optik Ağlarda Elemanların Özelliklerinin Değiştirilmesi

Haberleşme sistemlerinde, sistemin alıcı duyarlılığı ve servis kalitesinin belirlenmesi için birçok yol vardır. Bunlardan biri, BER (Bit Error Rate, Bit Hata Oranı) ölçümleridir. BER, bilgi iletiminde gönderilen veri içindeki bozulan ya da yanlış algılanan bit oranının ifade edilmesinde ve fiber sistem ölçümlerinde sıklıkla kullanılır.



Şekil 2. Referans pasif optik ağ topoloji örneği.

1550 nm aşağı yönde, 20 km'lik tek modlu optik fiber ve 1/8 bölücü ayırımıyla tasarlanan referans topoloji Şekil 2'de yer almaktadır. Optik fiber uzunluğunun, referans topoloji üzerindeki etkisi incelendiğinde, referans topolojiden ve 50 km'lik optik fiberle gerçekleştirilen topolojiden elde edilen göz diyagramları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. 20 km'lik ve 50 km'lik optik fiber hatlardaki göz diyagramları.

20 km'lik sistemde, iletmek istenen tüm veri, ONU'lara ulaşmış, başka bir deyişle BER değeri, 0 olarak bulunmuş ve maksimum kalite faktörü değeri, 44.96 olarak elde edilmiştir. 29 dBm'lik verici gücüne sahip olan bu sisteme 30 km daha optik fiber eklenmesi ile sistem kaybı artmış, göz diyagramı açıklığı azalmış, diyagram kararsız hale gelerek kalite faktörü, 7.9'a düşmüştür. Göz diyagramı yüksekliğinin azalması ve jitterin artması, sistemin kaybının artmasına bağlı olarak veriminin azalmasının göstergesidir.

Referans topolojide, optik fiber türü değiştirilerek 20 km'lik çok modlu bir optik fiber hattı kullanıldığında, kalite faktörünün 0 olduğu ve sistemde veri iletiminin olmadığı görülmüştür. Bu sistem, çok modlu optik fiberle çalıştırıldığında, ancak 10.5 km'den daha az uzunluktaki çok modlu optik fiberde iletim sağlandığı görülmüştür. Tek modlu optik fiberdeki veri haberleşme kalitesi, çok modlu optik fiberlerde de istenecek olursa, kullanılması gereken optik fiber uzunluğu, 2 km'nin altında olmalıdır; bu durumda, uzak mesafe haberleşmesinde çok modlu optik fiberler tercih edilmemektedir. Bahsedilen fazla kayıp, çok modlu fiberdeki grup gecikmesinden kaynaklanmaktadır. Referans topolojide, optik fiberin özelliklerindeki değişimler, sistemde önemli bozulmalara ya da kalitenin artmasına neden olmuştur. Örneğin, 20 km'lik tek modlu optik fiber kullanılan yapıda, optik fiberde mevcut sistemdeki dispersiyon, 16.75 ps/nm/km iken veri iletimi sağlanmış ve kalite faktörünün, 44 seviyelerinde olduğu, diğer taraftan dispersiyon, 50 ps/nm/km iken sistemin kalite faktörünün, 37 ve dispersiyon, 75 ps/nm/km iken kalite faktörünün, 31.14 olduğu görülmüştür. Dispersiyon ile kalite faktörü arasında tam anlamıyla ters orantılı bir değişim olmamasına karşın optik fiberde değiştirilen dispersiyon değerlerinin, sistemi etkilediği belirlenmiştir.

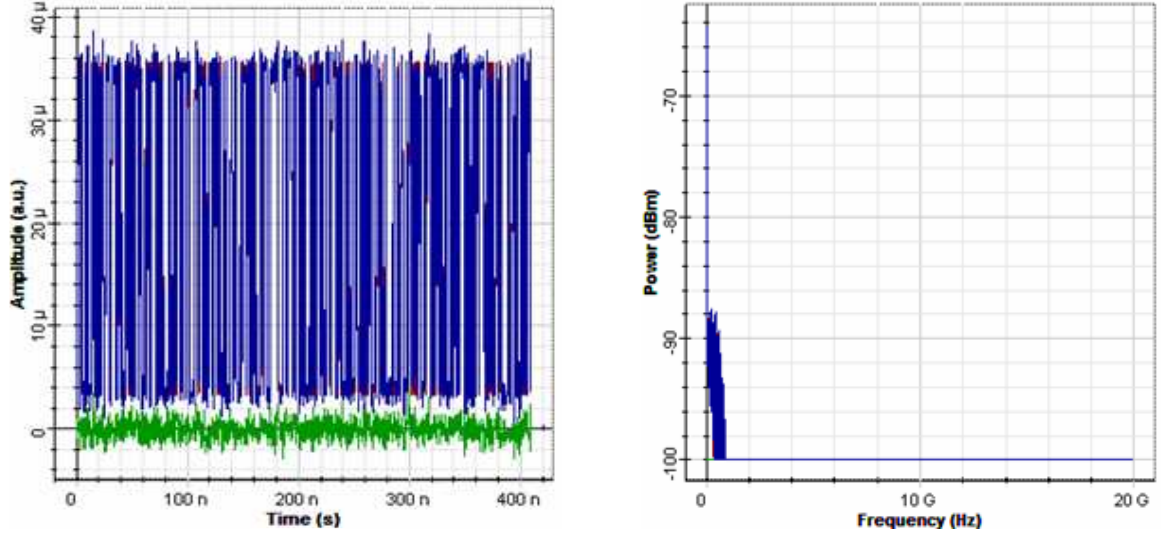
Pasif optik haberleşmede, veri iletim kalitesini etkileyen ana elemanlardan biri de bölücüdür. Bu elemandaki değişimler, sistemi direkt olarak etkiler. Konuyla ilgili olarak, 20 km'lik hattın, 29 dB'lik WDM verici üzerinden 8 ayrımla gerçekleştirilen topolojisinde, bölücünün bazı karakteristik özelliklerine göre durum değişimi incelenmiştir. Bölücüde, ilk durumda, ekleme kaybı (insertion loss) 1.5 dB, geri dönüş kaybı (return loss) 65 dB ve gürültü dinamiği (noise dynamic) 3 dB olduğunda, OLT'den ONT'lerin birine aktarılan gücün, 11.790 dB olduğu görülmüştür. Ekleme kaybı, 10 dB olduğunda, ONT'ye aktarılan güç, 3.290 dBm olarak gözlenmiştir. Bu durum, zayıflamanın, her ONT'ye aktarılan güç üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ekleme kaybı, 6 dB olduğunda, tek ONT'ye 7.290 dBm güç aktarılmış ve 4 dBm'lik kayıp, aboneye direkt olarak yansımıştır. Bu noktada, ekleme kaybının, pasif optik ağlarda kritik rol oynadığı açıkça görülmektedir. Uygulamada, geriye dönüş kaybının etkisi de incelenmiştir. Geri dönüş kaybının, 65 dB olması durumunda, ONT'ye 11.790 dBm'lik güç aktarılmıştır. Bu kayıp, 100 dB olduğunda, ONT'ye 7.290 dBm güç aktarılmış ve ilk duruma göre 4 dBm'lik kayıp söz konusu olmuştur. Geri dönüş kaybı azaltılarak 10 dB yapıldığında, ONT'lere aktarılan gücün, 7.296 dBm olduğu görülmüştür. Bu durum, ağda büyük değişiklikler yapıldığında, geri dönüş kaybının, ekleme kaybı gibi etkili olduğunu göstermektedir. Bölücüdeki gürültü dinamiğinin artırılması, topolojiye direkt olarak etki edecektir. 3 dB'lik gürültüde, ONT'lerin her birine aktarılan güç, 11.790 dBm olurken, 6 dB'lik bir bölücü gürültüsünde, 7.290 dBm güç aktarımı olmuştur. Bölme oranı, pasif optik ağ topolojilerinde, bölücünün sistemi etkilediği en önemli konular arasında yer alır. Günümüzde, GPON yapılarında bölme oranı, teoride 128'e kadar desteklenir; ancak endüstriyel uygulamalarda bu oran, ayırım sayısının artmasının, sisteme etkileyen bölücü kaybını artırması nedeniyle daha azdır. Konuyla ilgili olarak, 20 km'lik tek modlu optik fiber ile elde edilen topolojide, 8 yerine 4 ayrımla alınan sinyalin kalitesindeki değişiklik incelenmiştir. İki yönlü (bidirectional) optik fiberle oluşturulan örnek bir BPON'da, sistemdeki 8, 4 ve 2 bölme oranlı durumlarda, her bir ONT'den elde edilen kalite faktörü, sırasıyla, 9.4, 18.85 ve 37.53 olarak bulunmuştur.

4.2 Elektro-Optik Elemanların Pasif Optik Ağ Yapılarına Eklenmesi

Pasif optik ağ şebekelerinde abone hattı ya da ölçüm için bırakılan optik fiber hatları yönünde elde edilmesi istenen değerler kullanım amacına göre çeşitlilik gösterir. Bu amaçla değişik elektro-optik elemanlar sisteme eklenebilir. Bu bölümde, elektro-optik elemanların sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tek modlu fiberle gerçekleştirilen 20 km'lik bir hatta, 8 ayrımlı bölücü ve 0 dBm'lik verici kullanılarak tasarlanan PON mimarisinde, bir ONU'dan elde edilen kalite faktörü, 18.811 ve minimum BER değeri, 3.06×10^{-79} 'dur. Uygulamada, söz konusu olan PON topolojisine Mach-Zehnder modülatörü eklendiğinde, elde edilen sonuçlar incelenmiş ve Mach-Zehnder modülatörün, sistemin kalite faktörü değerini 10^7 'a düşürdüğü görülmüştür. Optik modülatörler, uygulanan dış elektrik alanının bir fonksiyonu olarak kırılma indisinde değişiklik meydana getirerek sisteme etki ederler. Bu etki, örnekteki gibi, sistem kalitesini bir miktar düşürebildiği gibi kaliteyi artırıcı etki de gösterebilir.

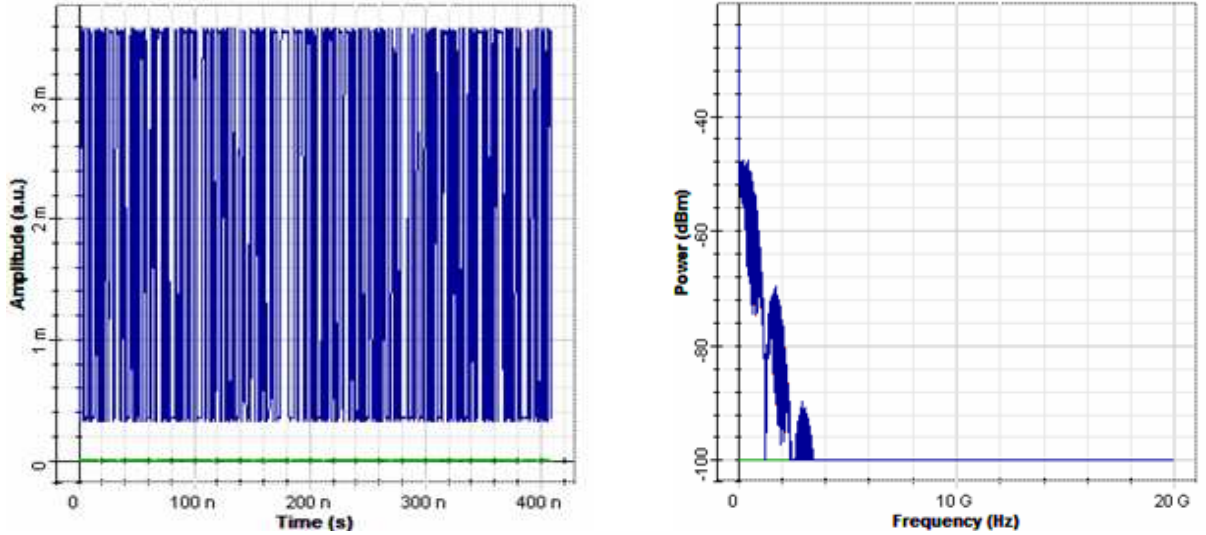
Pasif optik ağlarda, tek tek bileşenlere oranla daha sık kullanıldığı görülen diğer bir eleman da optik kuvvetlendiricilerdir. Birçok optik kuvvetlendirici, gelen ışığı uyarılmış emisyonla kuvvetlendirir. Bu anlamda, mekanizma, lazerlere benzer. Aslında optik kuvvetlendirici, geri beslemesiz bir lazerdir. Ana parametresi olan optik kazanç, popülasyon çevriminin başarılması için kuvvetlendiricinin pompalanması ile sağlanır. Optik kazanç, sadece gelen sinyalin frekansına değil, aynı zamanda kuvvetlendirici içindeki herhangi bir noktada yerel huzme yoğunluğuna da bağlıdır. Optik kuvvetlendiricilere EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier, Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici), Raman kuvvetlendirici, yarı iletken optik kuvvetlendirici ve dalga kılavuzu kuvvetlendiricisi örnek olarak verilebilir. Günümüzde pasif optik ağlarda özellikle EDFA'lı topolojiler tercih edilmektedir.

20 km mesafede 8 ayrımlı 1550 nm’de çalışan PON topolojisi referans alındığında, tek bir ONU çıkışında optik zaman domenı göstericisi ve optik spektrum analizöründen elde edilen zaman domenı ve frekans domenı grafikleri Şekil 4’te görölmektedir.



Şekil 4. EDFA için kullanılacak olan referans topolojide, ONU sonrası zaman domenı ve frekans domenı grafikleri.

Bu yapıya 5 m uzunluğunda EDFA eklendiği durumda, ONU çıkışındaki grafiklerin yer aldığı Şekil 5’e göre, gürültü genliği azalmış ve spektrum gücünün, önceki durumdaki (-90) – (-80) dBm seviyelerinden (-50) – (-40) dBm seviyelerine arttığı görölmüştür.

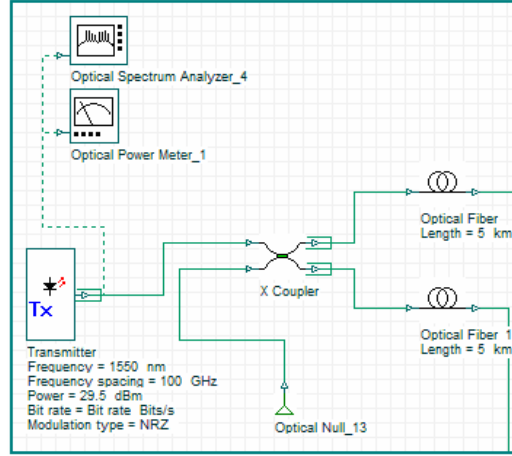


Şekil 5. EDFA’nın kullanıldığı yapıda, ONU sonrası zaman domenı ve frekans domenı grafikleri.

Pasif optik ağı yapıya optik filtre eklemeye de ihtiyaç duyulabilir. Optik filtreler, belirli bir dalgaboyundaki ışığın absorbe edilmesi veya yansıtılması prensibine dayanır. Frekans spektrumunun büyük ya da küçük bileşenleri kullanılır ve kullanılan bu spektrum genişliğine bağlı olmak üzere filtrelerin, PON yapısına etkileri söz konusu olur. Bu şekilde, istenilen frekans bölgesinde işlem yapılabilir. Uygulamada, THz’ler mertebesinde çalışılan pasif optik ağı 10 GHz band genişliğinde bir dikdörtgen (rectangle) filtre eklenmiş, sistemde sadece 1,55248 μm ve 1,55256 μm dalgaboyu aralığı etkili olmuş ve bu durum, sistemin verimini azaltmıştır.

Pasif optik ağlarda kullanılabilecek olan elektro-optik elemanlardan biri de fiber optik kuplörlerdir. Bir optik doğrultu kuplöründe, iki tane paralel, iki tane bükülmüş veya biri düz, diğeri ise bükülmüş olan optik fiber yer alır.

Optik fiberlerin eksenleri arasındaki uzaklığın, çalışma dalgaboyuna göre çok küçük olması nedeniyle evanescent (yaklaşık olarak sönümlü) alanların karşılıklı olarak etkileşimi söz konusudur. Optik fiberler arasındaki karşılıklı kuplaj, Kuple Mod Teorisi ve Pertürbasyon Teorisi ışığında incelenir [7]. Pasif optik bir ağa OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile tasarlanmış olan örnek optik doğrultu kuplörü eklenmiş yapı, Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. doğrultu kuplörü eklenmiş PON yapısı.

Günümüzde, fiber optik kabloların döşendiği saha koşullarında bölme işi, pasif ağlarda bölücülerle yapılır. Kuplör ise daha çok işaretin çok büyük kısmının normal iletişim için kullanıldığı, küçük bir kısmının ise ölçümler için bırakıldığı durumlarda kullanılır. Simülasyon ortamında, kuplaj katsayısı değeri değiştirilerek belirtilen amaca ulaşılır. Örneğin, Şekil 6'da verici kısım, kuplör ve optik fiber kısmı gösterilmiş yapıda, işaretin çoğunluğunun üst koldan geçmesi istendiğinde, % 90 ve % 10'luk bir ayırım oranı düşünülerek kuplaj katsayısı 0.1 yapılır ve aktarılan güç değerleri yeniden incelenir. Kuplörün üst kol çıkışındaki güç değeri, 26.432 dBm, diğer bir ifadeyle 439.759×10^{-3} W, alt kol çıkışındaki güç değeri ise 16.890 dBm, başka bir deyişle 48.862×10^{-3} W olarak ölçülmüştür. Üst koldan aktarılan güç, alt koldan aktarılan güçten yaklaşık olarak 9 kat daha fazladır ve % 90'a % 10 oranı sağlanmıştır. Bu durumda, bir ONT'ye aktarılan güç, üst kol için 61.824×10^{-3} W iken, alt koldan beslenen bölücü sonrası ONT için 6.869×10^{-3} W olarak bulunmuştur. Tüm veri, başarılı şekilde her iki kolda aktarılmış ve istenen güç aktarım oranı sağlanmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, iletişim teknolojileri içinde önemli bir konumda bulunan pasif optik ağlar incelenmiş ve OptiSystem 7.0 simülasyon programı ile tasarlanan topolojilerde kullanılan devre elemanlarının yeri değerlendirilmiştir. Ağda kullanılan optik fiberin çeşidi, uzunluğu ve dispersiyon değerlerinin ve pasif optik ağ temel bileşenlerinden bölücünün ekleme kaybı, geri dönüş kaybı ve gürültü dinamiği parametrelerinin, sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Pasif optik ağı optik modülatör, optik kuvvetlendirici, optik filtre ve optik kuplörün eklenmesiyle pasif ağ yapısının verimini olumlu ya da olumsuz şekilde etkileyecek olan durumlar, BER diyagramları, zaman domeni ve spektrum çıktıları ile irdelenmiştir. Yapılan ölçümlerde, pasif optik ağlarda, 1300-1350 nm'deki ikinci pencere bölgesi ve 1500-1550 nm'deki üçüncü pencere bölgesinde verimin arttığı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1]. Green P. E., Fiber to the Home: The New Empowerment, John Wiley & Sons, New Jersey, A.B.D., 2006.
- [2]. Lam C. F., Passive Optical Networks Principles and Practice, Academic Press – Elsevier, Burlington, Canada, 2007.
- [3]. Keiser, G., FTTX Concepts and Applications, John Wiley & Sons, New Jersey, A.B.D., 2006.
- [4]. Banerjee A., Kramer G., Dixit S., Ye Y. ve Mukherjee B., Advances in Passive Optical Networks (PONs), Springer-Verlag Telos, California, A.B.D., 2004.
- [5]. Chochliouros I. P. ve Heliotis G. A., Optical Access Networks and Advanced Photonics: Technologies and Deployment Strategies, Information Science Reference, New York, A.B.D., 2009.
- [6]. Güre Ö., Pasif Optik Ağlar ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [7]. Ünverdi N. Ö. ve Ünverdi N. A., "Optik Haberleşme Sistemlerinin Modellenmesi", V. URSI - Türkiye'2010 Bilimsel Kongresi, Ulusal Genel Kurul Toplantısı, 25-27 Ağustos 2010, ODTÜ - Kuzey Kıbrıs Kampüsü, Güzel yurt, K.K.T.C., s. 436-439.