

Kablosuz Optik Haberleşme Sistemlerinde Dalga Boyu Çeşitlemesi

Yusuf E. YENİCE, Sezai A. TEKİN

Niğde Üniversitesi

Aksaray Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

68100 Aksaray

y_e_yenice@hotmail.com, sezaialper@hotmail.com

Özet: *Türbülanslı atmosferin kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansına etkilerini en aza indirecek önlemler üzerinde uzun süredir çalışılmaktadır. Erken dönem araştırmacıları, zayıf türbülans teorisiyle hesaplanan ışık şiddeti dalgalanmalarının spektral kovaryansının büyük dalga boyu farklarında bile yüksek korelasyon göstermesi sebebiyle, dalga boyu çeşitlemesinin bu bağlamda işe yaramayacağına kanaat getirmişlerdir. Ancak, daha sonraki yıllarda yürütülen ve spektral kovaryansın geçerlilik sınırlarını genişleten teorik ve deneysel çalışmalar ile yeni geliştirilmekte olan ve kullanılabilir dalga boyu sınırını diğer atmosfer pencerelerine doğru genişleten QC lazerler sayesinde, dalga boyu çeşitlemesinin de bir seçenek olabileceği görülmektedir.*

1. Giriş

Bina dışı kablosuz optik haberleşme sistemleriyle ilgili en temel sorun, atmosferin ışığın yayılımı üzerindeki olumsuz etkileridir. Bu etkilerden sistem mühendisliği açısından önemli olanı da atmosferdeki türbülanstır. Güneş enerjisinin atmosfer ve yeryüzünün değişik kısımlarına farklı miktarlarda ulaşması, bu kısımların da ısınma ve soğuma özelliklerinin farklılıklar göstermesi sebebiyle atmosfer sürekli akış halindedir. Bu akış, yerden gündüzleri birkaç kilometre, geceleri birkaç yüz metre yüksekliğe kadar daima türbülanslıdır. Daha yükseklerde ise ışığı etkileyecek kuvvetteki türbülansa ince katmanlar halinde rastlanır. Türbülans sıcaklık gradyanına sahip hava bloklarını parçalayıp karıştırarak, sıcaklığın (dolayısıyla da kırılma indisinin) konuma ve zamana göre kaotik bir şekilde değiştiği bir ortam oluşturur. Bu ortamın, çevri (*eddy*) adı verilen, kırılma indisinin kendi içinde sabit olduğu, her yöne rastgele hareket eden çeşitli büyüklüklerdeki parçalardan oluştuğu varsayılır. Işığın hüzmeye çapından büyük çevrilerin hüzmeyi bir bütün olarak rastgele sapıtması hüzmeye gezinmesi ve geliş açısı dalgalanmasına sebep olur. Hüzmeye çapına yakın boyutlardaki çevriler, hüzmeyi tamamı veya bir kısmını odaklayan veya ıraksatan mercekler gibi davranarak, hüzmeye yayıldıkça hüzmeye kesitinde yapıcı ve yıkıcı girişime yol açar (parıldama, *scintillation*). Küçük çevriler hüzmeyi küçük parçalarını birbirinden bağımsız olarak kırılma ve saçılmaya uğratarak hüzmeye genişlemesine ve dalga cephesinin fazının bozulmasına sebep olur.

Türbülanslı atmosferin kablosuz optik haberleşme sisteminin performansına etkilerini en aza indirmek için alınabilecek önlemler bizce iki gruba ayrılabilir. Birinci grup, elektronik sinyal bir ışık kaynağı tarafından optik sinyale dönüştürülmeden önce ve optik sinyalin optik dedektör tarafından elektronik bir sinyale dönüştürülmesinden sonra uygulanabilecek sinyal işleme ve kodlama yöntemleridir. Optik sistem konfigürasyonu tasarlanırken alınabilecek önlemler de mevcuttur. Önerilen çözümler arasında, birden fazla alıcı veya verici kullanarak uzaysal çeşitlemenin sağlanması, gönderilen ışığın şiddet profilinin değiştirilmesi (hüzmeye şekillendirmesi), adaptif optik tekniklerinin kullanılması, gönderilen ışığın hüzmeye genişliğinin türbülansın şiddetine göre ayarlanması, gönderilen ışığın faz uyumluluğunun kısmen bozulması sayılabilir. Bu çalışmada ikinci gruba dahil edilebilecek dalga boyu çeşitlemesi ele alınmaktadır.

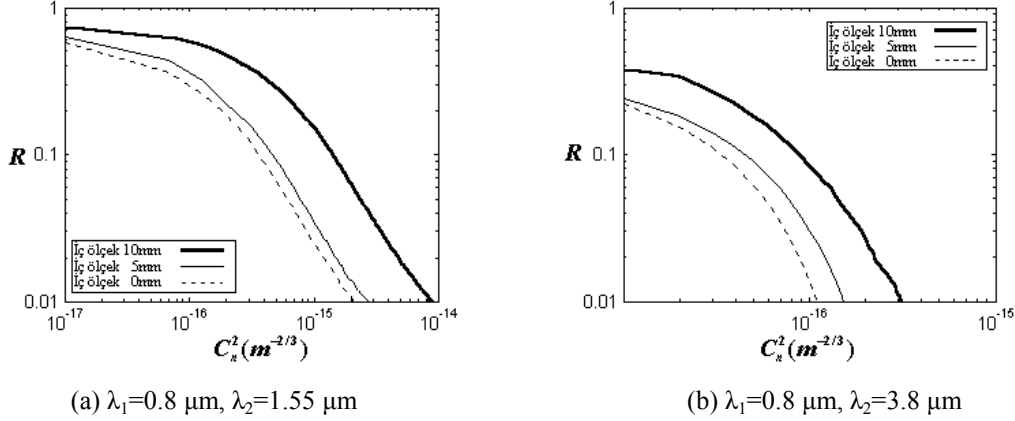
2. Spektral kovaryans teorisi

Kabaca saçılma açısını veren dalga boyu/çevri büyüklüğü oranları farklı olduğu için, türbülanslı atmosferde yayılan farklı dalga boylarındaki ışık hüzmelerinin dalgalanan şiddetleri arasındaki korelasyon katsayısı 1'den küçük olacaktır. Yani, hüzmeler birbirinin aynı kırılma indisi alanını görseler bile, hüzmelerin karşılaştığı türbülans miktarı arttıkça ışık şiddetleri arasındaki korelasyon azalacaktır. Fried [1] sıfır iç ölçek ve zayıf türbülans varsayımıyla, farklı dalga boylarındaki iki dalganın korelasyonunu veren bir ifade geliştirmişti. Fried spektral kovaryansın dalga boyu farkına bağımlılığının çok zayıf olduğunu görerek, dalga boyu çeşitlemesi ile parıldamanın azaltılması yönteminin pek umut vaat etmediği sonucuna varmıştır. Zayıf türbülans teorisine göre, sıfır iç ölçekli ortamdaki bir nokta alıcı için korelasyon katsayısı

$$R=(1-\Delta^{5/6})/(1-\Delta^2)^{5/12} \quad (1)$$

ile verilir [2]. Burada $\Delta=|\lambda_1-\lambda_2|/(\lambda_1+\lambda_2)$ 'dir. Dalga boylarının 0.8 μm ve 1.55 μm olduğu bir çeşitleme düzeneği çok kullanışlı olabilirdi, ancak dalga boyu farkının nispeten büyük olduğu bu durumda bile korelasyon katsayısı 0.642'dir. Korelasyon katsayısı ancak çok büyük farklar için ($\lambda_1=10.6 \mu\text{m}$, $\lambda_2=0.5 \mu\text{m}$) cazip seviyelere düşmektedir ($R=0.157$). Sıfırdan büyük iç ölçek için genellikle katsayı daha yüksektir. Sıfırdan büyük alıcı açıklığı çapı için de katsayı yükselir.

Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetinden (C_n^2) bağımsız olduğunu öngören zayıf türbülans teorisinin yetersizliğine ilk dikkati çekenler Pincus ve Kerr [3] olmuştur; ölçülen katsayı, görece zayıf türbülans şiddetleri için teorik değerlerden yüksek çıkmış ve türbülans şiddeti arttıkça sürekli bir düşüş göstermiştir. Gurvich ve arkadaşları [4] tarafından kuvvetli türbülans ($\rho_0 = (58\lambda^{-2}C_n^2L)^{-3/5} < (\lambda L)^{1/2}$) bölgesinde, yani ışığın faz uyumluluk yarı çapının Fresnel bölgesinin boyundan küçük olduğu durumda yürütülen deneyler de bu bulguyu doğrulamıştır. Bilindiği kadarıyla, kuvvetli türbülans bölgesi için tam bir teori mevcut değildir. Bununla birlikte, Churnside ve arkadaşları [2] zayıf türbülans ifadesinde, çok sağlam bir teorik dayanağı olmayan, ancak fiziksel olarak makul görünen ve deneysel korelasyon verileriyle oldukça iyi uyuşan bir değişiklik önermiştir. Önerilen ifade kullanılarak, $L=4$ km'lik menzil ve nokta alıcı için nümerik olarak spektral korelasyon katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Spektral korelasyon katsayısının türbülans şiddetine göre değişimi

Şekil 1-a incelendiğinde, optik haberleşmede yaygın kullanılan 0.8 ve 1.55 μm lazerlerle yapılacak çeşitlemenin, ancak kuvvetli türbülans ve küçük iç ölçek şartlarında yüksek başarımlı sağlayabileceği, daha geniş kullanım alanı için ikinci dalga boyunun daha uzun olması gerektiği görülmektedir. Son yıllarda geliştirilen ve 3.5-20 μm arasındaki yakın kızılaltı bölgesinin tamamını kapsayan yarı iletken QC (*quantum cascade*) lazerlerin, atmosfer üzerinden yüksek bant genişlikli bağlantılar sağlayabileceği gösterilmiştir [5-6].

3. Dalga boyu seçimi

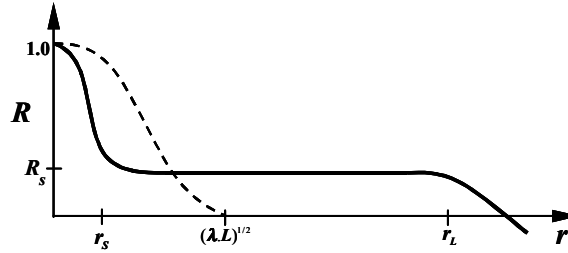
Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde dalga boyu seçimi, dalga yayılımı meseleleri, arka plan ışıması, göz güvenliği ve gerekli teknolojilerin birlikte değerlendirilmesine dayanmalıdır. Shaik ve Hemmati [7] ile Manor ve Arnon'un [8] çalışmaları bu amaçla kullanılabilir. Teknolojik ve ekonomik sorunların zamanla çözüleceği varsayılırsa, 3.5-20 μm aralığında mümkün olan en kısa dalga boyunu seçmek için iki temel sebep vardır: (i) Serbest uzay kaybının artması yüzünden alıcıya ulaşan güç yoğunluğu λ^2 ile orantılı olarak azalır. (ii) Atmosfer 4 μm 'den büyük dalga boylarında ikincil bir ışık kaynağı gibi davranarak kuvvetli bir arka plan gürültüsüne sebep olur. Hüzme gezinmesi dalga boyundan bağımsızdır, ancak dalga boyu arttıkça kırınım sınırlı hüzme genişliği artacağından, hüzme gezinmesinin etkisi görece azalabilir. Işığı çok az kayıpla geçiren atmosfer pencereleri içinde olmak kaydıyla, dalga boyunun molekül soğurumu ve Rayleigh saçılması üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Manor ve Arnon'a [8] göre, sadece bulanık (sisli, puslu, yağmurlu vs.) hava etkileri ele alındığında tercih edilmesi gereken dalga boyu aralığı 8-13 μm 'dir. Ancak diğer etkiler de dikkate alındığında, elde edilen mütevazi kazancın yukarıda sayılan olumsuz etkileri karşılamaya yetmediği görülmektedir. Uzun dalga boylarının cazip yanı parıldama varyansının $\lambda^{-7/6}$ ile orantılı olarak azalmasıdır. Kullanılan dalga boyu arttırılarak parıldama ihmal edilebilecek seviyelere indirilebilir; bu durumda da zaten çeşitlemeye gerek kalmaz.

1968'de NASA ve MIT tarafından ortaklaşa düzenlenen optik haberleşme konferansında [9] 3.8 μm 'de düşük arka plan gürültüsüyle çıkan düşük kayıplı bir atmosfer penceresi bulunduğu ifade edilmiş, ancak uygun ışık kaynağı ve dedektör olmadığı için bu potansiyel değerlendirilememiştir. Bu sorun artık aşıldığına göre, dalga boyu çeşitlemesinde kullanılacak ikinci kaynak için 3.8 μm 'yi öneriyoruz. Şekil 1-b bu sistemin diğerine göre çok daha geniş bir uygulama alanı olacağını göstermektedir.

4. Dalga boyu çeşitlemesi ile uzaysal çeşitlemenin karşılaştırılması

Türbülansın etkilerine karşı alınabilecek önlemlerden bazıları birlikte, bazıları ise birbirinin yerine kullanılabilir. Bu konuda ayrıntıya girilmesi çalışmanın kapsamını çok aşacağından, parıldamanın etkisini azaltmak için çeşitlemeye karar verildiği varsayılarak, dalga boyu çeşitlemesi uzaysal çeşitleme ile karşılaştırılacaktır. Farklı dalga boylarında birden fazla verici kullanmak yerine, tek bir verici ve aralarında yeterince yanal mesafe bulunan birden fazla alıcı kullanarak da çeşitleme yapılabilir. Zayıf türbülansda ışık şiddeti dalgalanmaları $r=(\lambda L)^{1/2}$ civarındaki yanal mesafe

içinde ilişkilidir. Bu mesafeden sonra korelasyon katsayısı yaklaşık sıfırdır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, kuvvetli türbülans bölgesindeki uzaysal korelasyon, zayıf türbülans bölgesindekinden çok farklıdır [10]. Kuvvetli türbülansta korelasyon katsayısı $r=(\lambda L)^{1/2}$ 'den daha kısa bir mesafede (r_s) hızla düştükten sonra neredeyse yatay seyreder ve $r=(\lambda L)^{1/2}$ 'den daha büyük bir mesafede (r_L) sıfıra düşer.



Şekil 2. Uzaysal korelasyon katsayısının yanıl mesafeyle değışimi

Fante'nin [10] verdiği bağıntılar kullanılarak çeşitli durumlar için R_s ve r_L değerleri hesaplanmıştır. R_s orta kuvvetteki türbülans için 0.3-0.2 civarında olup, türbülans şiddeti arttıkça yavaş yavaş düşmektedir. Buna göre kuvvetli türbülans bölgesinde, alınan sinyaller arasındaki korelasyonu sıfıra düşürmek için alıcılar arasında en az r_L kadar mesafe bırakılmalıdır. Türbülans şiddetiyle artan r_L , çok kuvvetli türbülansla birkaç metreyi bulmaktadır. Bireysel tüketiciye yönelik uygulamalarda tasarımın derli toplu olması çok önemli olduğundan, gerekli r_L mesafesi arttıkça uzaysal çeşitleme dalga boyu çeşitlemesine göre cazibesini kaybedecektir. Uzaysal çeşitleme, aralarında yeterli yanıl mesafe bırakılan, aynı dalga boyunda birden fazla verici kullanarak da gerçekleştirilebilir. Bu seçeneğin de parıldama varyansını düşürmede etkili olduğu deneysel olarak gösterilmiştir [11]. Yerden uyduya haberleşmede, çok uzun yol kat eden ışığın korelasyon mesafeleri kırınım sebebiyle çok büyüyeceğinden, diğer uzaysal çeşitleme seçeneği uygulanamaz. Bunun dışında, yukarıda çok alıcılı çeşitleme için yapılan değerlendirme, çok vericili uzaysal çeşitleme için de geçerlidir.

5. Sonuç

Optik haberleşmede yaygın kullanılan 0.8 ve 1.55 μm lazerlerle yapılacak çeşitleme, ancak kuvvetli türbülans ve küçük iç ölçek şartlarında yüksek başarımlı sağlayabilir; daha geniş kullanım alanı için ikinci dalga boyunun daha uzun olması gerekir. Çeşitli meseleler birlikte değerlendirmeye alındığında, en uygun ikinci dalga boyunun 3.8 μm olduğu kanaatine varılmıştır. Piyasada mevcut tasarımların azami menzili genellikle 1-2 km civarında olup, yürütülen ar-ge çalışmaları çoğunlukla menzilin 4 km ve ötesine çıkarılmasına yöneliktir. Buradan, çeşitlemeye çoğunlukla kuvvetli türbülans bölgesinde ihtiyaç duyulacağı sonucu çıkar. Özellikle 0.8-1.55 μm lazerlerle yapılacak çeşitlemenin yeterli performans sağladığı şartlarda dalga boyu çeşitlemesinin uzaysal çeşitlemeye tercih edilmesi gerekir. 0.8-3.8 μm 'lik çeşitleme içinse, QC lazerin getireceği maliyet vb. külfetler ile aralarında büyük mesafe bulunan iki parçadan oluşan alıcı veya verici tasarımının sakıncaları karşılaştırılarak karar verilmelidir.

Kaynaklar

- [1] Fried, D.L., "Spectral and angular covariance of scintillation for propagation in a randomly inhomogeneous medium", Applied Optics, 1971, Cilt.10, s.721-731.
- [2] Churnside, J.H., Lataitis, R.J., Wilson, "Two-color correlation of atmospheric scintillation", Applied Optics, 1992, Cilt.31, s.4285-4290.
- [3] Pincus, P.A., Kerr, J.R., "Spectral covariance of scintillations", Applied Optics, 1976, Cilt.15, s. 2305.
- [4] Gurvich, A.S., Kan, V., Pokasov, V.V., "Two-frequency fluctuations of light intensity in a turbulent medium", Optica Acta, 1979, Cilt.26, s.555-562.
- [5] Blaser, S., Hofseter, D., Beck, M., Faist, J., "Free-space optical data link using Peltier-cooled quantum cascade laser", Electronics Letters, 2001, Cilt.37, s.778-780.
- [6] Martini, R., Gmachl, C., Falciglia, J., Curti, F.G., Bethea, C.G., Capasso, F., Whittaker, E.A., Paiella, R., Tredicucci, A., Hutchinson, A.L., Sivco, D.L., Cho, A.Y., "High-speed modulation and free-space optical audio/video transmission using quantum cascade lasers", Electronics Letters, 2001, Cilt.37, s.191-193.
- [7] Shaik, K., Hemmati, H., "Wavelength Selection criteria for laser communications", Free-space Laser Communication Technologies X, 1995, Proc. SPIE, Cilt.2381, s.342-357.
- [8] Manor, H. and Arnon, S., "Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength", Applied Optics, 2003, Cilt.42, s.4285-4294.
- [9] MIT/NASA Conference on Optical Communications, Williamstown, Massachusetts, A.B.D., 4-17 Ağu. 1968.
- [10] Fante, R.L., "Inner-scale effect on the scintillations of light in the turbulent atmosphere", JOSA, 1983, Cilt.73, s.277-281.
- [11] Bruno, W.M., Mangual, R., Zampolin, R.F., "Diode laser spatial diversity transmitter", Optomechanical Design of Laser Transmitters and Receivers, 1989, Proc. SPIE, Cilt.1044, s.187-194.