

Düz Tepeli Işık Hüzmelerinin Türbülanslı Atmosferde Yayılımında Alıcı Açıklığı Etkileri

Canan Kamacıoğlu¹, Yahya Baykal² ve Erdem Yazgan³

¹ Çankaya Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,
Eskişehir Yolu 29. Km Yenimahalle- Ankara, Türkiye.

² Çankaya Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü,
Eskişehir Yolu 29. Km Yenimahalle- Ankara, Türkiye.

³ Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Beytepe Yerleşkesi- Ankara, Türkiye.

cyazicioglu@cankaya.edu.tr, y.baykal@cankaya.edu.tr, yazgan@hacettepe.edu.tr

Özet: Düz tepeli ışık hüzmelerinin ortalama gücü, türbülanslı atmosferden geçtikten sonra Gauss profili olan bir açıklığa sahip alıcı düzleminde incelendi. Işık şiddetini oluşturan alan, genişletilmiş Huygen-Fresnel prensibi kullanılarak formüle edildi ve bu tür hüzmelerin alıcı düzleminde oluşturdukları ortalama güç analitik olarak hesaplandı. Elde edilen ortalama güç profilleri Matlab programlama dili kullanılarak farklı düzleştirme parametre değerleri için yayılım mesafesi ve açıklık yarıçapına karşılık çizdirildi. Büyük düzleştirme parametreleri için yayılım mesafesi arttıkça ortalama güç değerindeki düşmenin azaldığı gözlemlendi. Büyük yayılım mesafesinde, düzleştirme parametresinin değeri artırıldıkça büyük açıklığa sahip alıcılardaki ortalama güç değerinde artış görüldü.

1. Giriş

Serbest uzay optik iletişim sistemleri, yüksek veri hızı, çabuk kurulumu, taşınabilirliği ve güvenlik özelliklerinden dolayı oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, atmosferdeki türbülans, vericiden gönderilen ışık hüzmesinin alıcıda rastgele oynaması, yer değiştirmesi, hüzmenin genişlemesi ve gücünün azalması gibi nedenlerle, iletişim performansının bozulmasına yol açmakta, dolayısıyla optik haberleşme linkleri üzerinde olumsuz etkileri olmaktadır. Düzlem dalga ışık şiddeti salınımlarına alıcı açıklığı etkileri Tatarskii tarafından çalışılmıştır [1]. Optik link performansının iyileştirilmesinde, kullanılan ışık kaynağı hüzme tiplerinin önemli etkisinin olduğu bilinmektedir. Düz tepeli ışık hüzmeleri, atmosferdeki yayılım esnasında daha az genişleme göstermekte ve türbülanslı atmosferde avantaj sağlamaktadır [2]. Ayrıca, atmosfer haberleşmesinde kullanılan optik linklerde performansın iyileştirilmesinde alıcı açıklığının etkisi önemlidir [3]. Türbülanslı atmosferde yayılan ışık hüzmesinin ışık şiddeti salınımlarına alıcı açıklığı etkileri incelenmiştir [4]. Bu makalede, düz tepeli ışık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayıldıktan ve belirli boyutta bir alıcı açıklığından geçtikten sonra oluşan optik gücü incelendi.

2. Formülasyon

Düz tepeli ışık hüzmelerinin ışık şiddeti salınımlarını, türbülanslı atmosferden geçtikten sonra Gauss profilinde açıklığa sahip alıcı düzleminde analitik olarak hesapladık [5] ve alıcı açıklığının ışık şiddeti salınımlarına olan etkilerini inceledik. Işık şiddeti salınımlarını formüle edebilmek için ortalama optik gücün bulunması gerekmektedir. Bu makalede, önceki çalışmamızda [5] elde ettiğimiz düz tepeli ışık hüzmelerinin ortalama güç formülleri kullanarak alıcı açıklığının optik güç üzerindeki etkileri rapor edilmektedir. Yayılım eksenine dik olarak konumlandırılmış kaynak düzleminin merkezinde düz tepeli ışık hüzmesinin alan ifadesi aşağıdaki denklemle verilir [6].

$$u(s) = \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \exp \left[-\frac{n(s_x^2 + s_y^2)}{2\alpha_s^2} \right], \quad (1)$$

Eş. (1)'de (s_x, s_y) , s vektörünün kaynak düzleminde x ve y bileşenlerine ayrılmasıyla oluşur. α_s , s_x ve s_y doğrultularındaki Gauss kaynak boyutlarıdır. Kaynak düzleminde L mesafe uzaklıkta alıcı düzleminde ortalama ışık şiddeti genişletilmiş Huygens-Fresnel integrali kullanılarak bulunmuş olup [5], makale bütünlüğü açısından aşağıda gösterilmektedir.

$$\langle I(\mathbf{p}, L) \rangle = \frac{\pi^2}{(\lambda L)^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{1}{t_{1x} t_{2x} t_{1y} t_{2y}} \frac{(-1)^{n-1}}{N} \frac{(-1)^{m-1}}{N} \binom{N}{n} \binom{N}{m} \exp\left(-\frac{k^2}{4t_{1x}^2 L^2} p_x^2\right) \exp\left(-\frac{k^2}{4t_{1y}^2 L^2} p_y^2\right) \\ \times \exp\left(\frac{-\frac{k^2 p_x^2}{L^2} - \frac{k^2 p_x^2}{t_{1x}^4 L^2 \rho_0^4} + \frac{2k^2 p_x^2}{L^2 t_{1x}^2 \rho_0^2}}{4t_{2x}^2}\right) \exp\left(\frac{-\frac{k^2 p_y^2}{L^2} - \frac{k^2 p_y^2}{t_{1y}^4 L^2 \rho_0^4} + \frac{2k^2 p_y^2}{L^2 t_{1y}^2 \rho_0^2}}{4t_{2y}^2}\right), \quad (2)$$

Eş. (2)'de

$$t_{1x} = \left(\frac{n}{2\alpha_{sn}^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{1}{\rho_0^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$t_{2x} = \left(\frac{m}{2\alpha_{sm}^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{1}{\rho_0^2} - \frac{1}{t_{1x}^2 \rho_0^4} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

t_{1y} ve t_{2y} ise Eş. (3) ve (4)'de x yerine y konarak bulunur. $\langle \rangle$, ortam istatistikleri üzerinden ortalamayı, $j = \sqrt{-1}$, $k = 2\pi/\lambda$ dalga sayısını, λ dalgaboyunu, $*$ kompleks eşleniği, $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$ vektörü alıcı düzlemi koordinatlarını göstermektedir. $\rho_0 = (0.545 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ türbülans ortamında yayılan küresel dalganın uyumluluk uzunluğu, C_n^2 yapı sabitidir. Gauss profiline sahip bir açıklığı olan alıcı düzlemindeki ortalama güç aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\langle P \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(\mathbf{p}, L) \rangle w(\mathbf{p}) d\mathbf{p}, \quad (5)$$

Eş. (5)'de, $w(\mathbf{p})$ Gauss ağırlıklandırma fonksiyonu Ref. [5]'den farklı olarak aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$w(\mathbf{p}) = \exp\left[-\frac{1}{R^2} (p_x^2 + p_y^2)\right], \quad (6)$$

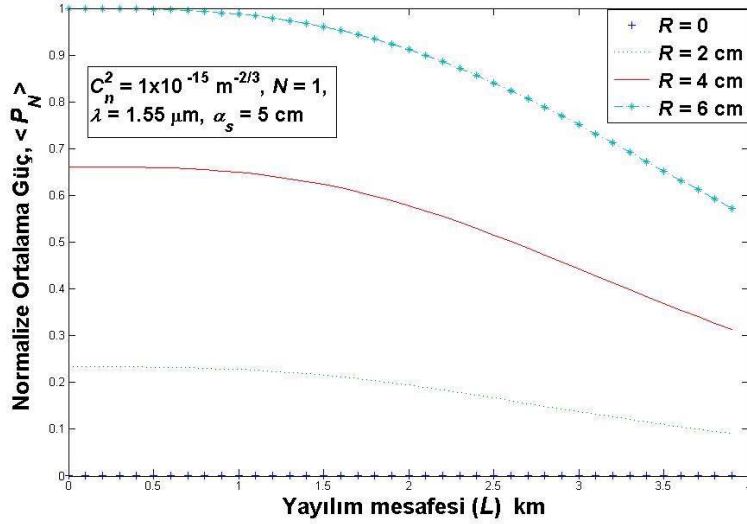
R alıcının yarıçapıdır. Eş. (6), Eş. (5)'e yerleştirilip Ref. [7] nin 3.323.2 numaralı eşitliği kullanılarak çözüldüğünde aşağıdaki şekilde ortalama güç bulunur.

$$\langle P \rangle = \frac{\pi^3}{(\lambda L)^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{(-1)^{n+m}}{N^2} \frac{1}{t_{1x} t_{2x} t_{1y} t_{2y}} \binom{N}{n} \binom{N}{m} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R^2} + \frac{k^2}{4t_{1x}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2x}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2x}^2 t_{1x}^4 L^2 \rho_0^4} - \frac{k^2}{2t_{2x}^2 t_{1x}^2 L^2 \rho_0^2} \right)}} \\ \times \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R^2} + \frac{k^2}{4t_{1y}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2y}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2y}^2 t_{1y}^4 L^2 \rho_0^4} - \frac{k^2}{2t_{2y}^2 t_{1y}^2 L^2 \rho_0^2} \right)}}. \quad (7)$$

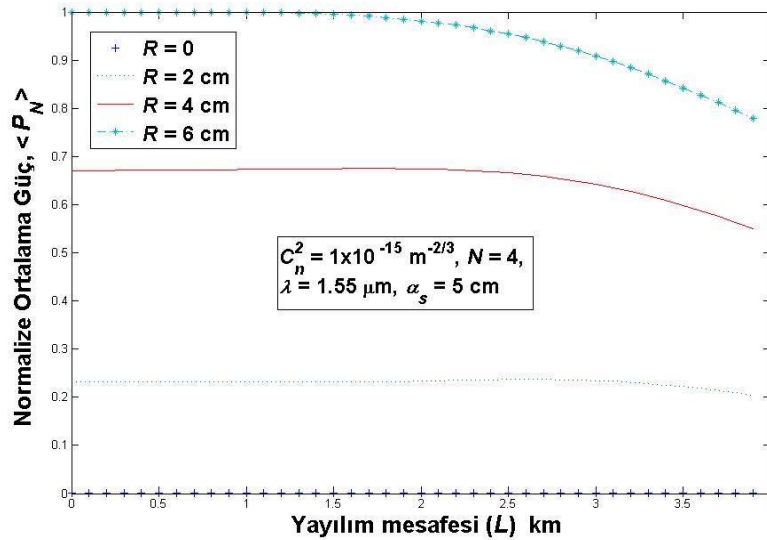
3. Şekiller

Düz tepeli ışık hüzmelerinin ortalama gücü, Eş. (7) kullanılarak türbülanslı atmosferden geçtikten sonra farklı düzleştirme parametre değerleri için yayılım mesafesi ve açıklık yarıçapına karşılık çizdirilmiştir. Tüm şekillerde dalga boyu $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ve Gauss kaynak boyutu $\alpha_s = 5 \text{ cm}$ alınmıştır. Şekil 1 ve 2'de $\langle P_N \rangle = \langle P \rangle / (\langle P(L=0) \rangle_{N=1} \text{Max}\langle P \rangle)$ normalizasyonu yapıldığından başlangıç durumlarında ortalama güç değerleri kaynak düzleminde eşit olarak görülmektedir. $\langle P_N \rangle$, alıcı düzlemindeki normalize edilmiş ortalama güç, $\langle P(L=0) \rangle_{N=1}$, kaynak düzleminde $N=1$ durumu için ortalama gücü, $\text{Max}\langle P \rangle$ ise alıcı düzlemindeki maksimum

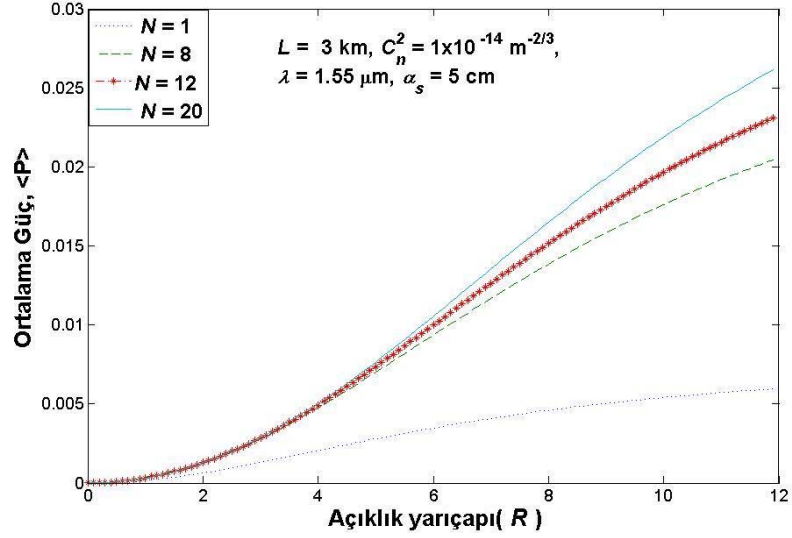
gücü göstermektedir. Şekil 1’de yayılım mesafesine karşılık ortalama güç değerleri farklı açıklık yarıçapları için çizdirilmiştir. Şekil 1’de düzleştirme parametresi $N=1$ ve yapı sabiti $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için alıcı düzleminde açıklığın olmaması durumunda minimum güç gözlemlenirken, açıklık yarıçapı $R=2 \text{ cm}$ den $R=6 \text{ cm}$ ’ye çıkarıldığında ortalama gücün arttığı gözlemlenmiştir. Yayılım mesafesi arttıkça ortalama güç düşmektedir. Şekil 2’de $N=8$ düzleştirme parametresi için ortalama güç incelenmiştir. Burada, kaynak düzlemindeki ortalama güç değerleri $N=1$ durumuna göre normalize edildiğinden, başlangıç durumlarında her iki şekilde de ortalama güç değerleri kaynak düzleminde eşittir. Açıklık yarıçapının artmasıyla ortalama güç artmaktadır. Yayılım mesafesinin artmasıyla ortalama güç düşmekte, düzleştirme parametresinin artmasıyla ortalama güç değerindeki düşüş azalmaktadır. Şekil 3’de $L=3 \text{ km}$ ve $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ değerleri için açıklık yarıçapına karşılık ortalama güç çizdirilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü gibi belirli bir yayılım mesafesinde açıklık yarıçapı arttıkça ortalama güç artmaktadır. Düzleştirme parametresi N ’nin artmasıyla ortalama gücün daha da arttığı görülmektedir.



Şekil 1. $N=1$ düzleştirme parametresi için farklı açıklık yarıçap değerlerinde yayılım mesafesine karşılık normalize ortalama güç.



Şekil 2. $N=8$ düzleştirme parametresi için farklı açıklık yarıçap değerlerinde yayılım mesafesine karşılık normalize ortalama güç.



Şekil 3. $N=1, 8, 12$ ve 20 düzeltme parametreleri için $L=3 \text{ km}$ 'de açıklık yarıçapına karşılık ortalama güç.

4. Sonuç ve Yorumlar

Elde edilen ortalama güç profilleri incelendiğinde, türbülanslı atmosferden geçtikten sonra düz tepeli ışık hüzmelerinin ortalama gücü açıklık yarıçapının artmasıyla artmaktadır. Düzleştirme parametresindeki artışın, ortalama güç değerlerini artırdığı gözlemlendi. Büyük düzeltme parametreleri için yayılım mesafesi arttıkça ortalama güç değerindeki düşme azalmaktadır. Uzun yayılım mesafesinde, düzeltme parametresinin değeri artırıldıkça büyük açıklığa sahip alıcılardaki ortalama güç değerindeki artış Gauss hüzmesine göre çok fazla olmaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Tatarskii V. I., The effects of the turbulent atmosphere on wave propagation. National Technical Information Service, 1971.
- [2]. Eyyuboğlu H.T., Arpalı Ç. ve Baykal Y., "Flat topped beams and their characteristics in turbulent media," Opt. Express, 14(10), s. 4196-4207, 2006.
- [3]. Andrews L. C., Phillips R. L ve Hopen C. Y., Laser beam scintillation with applications. SPIE Press, ABD, 2001.
- [4]. Wang S. J., Baykal Y. ve Plonus M. A., "Receiver-aperture averaging effects for the intensity fluctuation of a beam wave in the turbulent atmosphere," J. Opt. Soc. Am. 73, s. 831-837 1983.
- [5]. Kamacıoğlu C., Baykal Y. ve Yazgan E., "Receiver aperture averaging for flat-topped beams," J. Opt. Soc. Am. A (gönderilecek).
- [6]. Li Y., "Light beams with flat-topped profiles," Opt. Lett. 27, s. 4732-4738, 2004.
- [7]. Gradshteyn I. S ve Ryzhik I. M., Tables of Integrals, Series and Products, Academic, 2000.