

Yüksek dereceli halkasal Gauss ve düz tepeli ışık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılım özellikleri

Çağlar Arpalı, Serap A. Arpalı, Canan Yazıcıoğlu, Halil T. Eyyuboğlu ve Yahya Baykal *

*Çankaya Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü,
Öğretmenler Cad. No:14 Yüzcüncüyıl 06530 Balgat Ankara, Türkiye.
c.arpalı@cankaya.edu.tr, saltay@cankaya.edu.tr, cyazicioglu@cankaya.edu.tr,
h.eyyuboglu@cankaya.edu.tr, y.baykal@cankaya.edu.tr

Yüksek dereceli halkasal Gauss ve düz tepeli ışık hüzmelerinin ışık şiddeti, kaynak düzleminde ve türbülanslı atmosferden geçtikten sonra alıcı düzleminde incelenmiştir. Türbülanslı atmosferdeki yayılım, yüksek dereceli halkasal Gauss ve düz tepeli kaynak ışına alanını içeren genişletilmiş Huygens Frensel prensibi kullanılarak formüle edilmiş ve bu tür hüzmelerin alıcı düzleminde oluşturdukları ortalama ışık şiddeti analitik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama ışık şiddeti profilleri, farklı kaynak ve atmosfer parametreleri için video formatında kaydedilmiştir. Yüksek dereceli halkasal Gauss kaynağından çıkan ışık alanının türbülanslı atmosferde belli bir yayılım mesafesi katettikten sonra oluşturduğu ortalama ışık şiddeti, gözlem yapılan yayılım eksenine dik olan düzlemin merkezi çevresinde yoğunlaşmaktadır. Düz tepeli kaynaktan çıkan ışık alanının türbülanslı atmosferde belli bir yayılım mesafesi katettikten sonra oluşturduğu ortalama ışık şiddeti ise, türbülanssız ortamdakine benzer bir davranışla, gözlem yapılan yayılım eksenine dik olan düzlemin merkezinde dairesel halka şeklini almaktadır. Yayılım uzunluğu arttıkça bu dairesel halkanın çevresi ışık hüzmelerinin merkezine doğru daralmaktadır. Her iki hüzmeye için de geçerli olacak şekilde ortalama ışık şiddeti, türbülanslı atmosferde belirli bir yayılım uzunluğundan sonra tamamen Gauss eğrisine dönüşmekte, yayılım uzunluğu yeteri kadar büyütüldüğünde ise beklenildiği gibi tüm alıcı düzleminde sıfır değerine yaklaşmaktadır.

1.Giriş

Atmosferik türbülans altındaki serbest uzay optik linklerini sınırlayıcı en önemli etken, iletişim kanalının atmosfer olması nedeni ile ortamın yapısal karakteristiklerinin ve iklimsel olayların ışık hüzmeleri üzerindeki bozucu etkileridir. Işık kaynakları serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin temelini oluşturduğundan günümüzdeki aktif araştırma konularından biridir ve değişik ışık hüzmelerinin kaynak ve türbülanslı atmosferden geçtikten sonra alıcı düzlemindeki davranışları literatürde mevcuttur. Yüksek dereceli halkasal hüzmelerin atmosferik türbülanslı ortamdaki incelenmiştir [1,2]. Düz tepeli ışık hüzmeleri de türbülanslı atmosferde çalışılmıştır [3,4]. Bu makalede yüksek dereceli halkasal Gauss ve düz tepeli ışık hüzmelerinin atmosferik türbülans boyunca yayılımını incelendi. Türbülanslı atmosferdeki yayılım, yüksek dereceli halkasal Gauss ve düz tepeli kaynak ışına alanını içeren genişletilmiş Huygens Frensel prensibi kullanılarak formüle edilmiş ve bu tür hüzmelerin alıcı düzleminde oluşturdukları ortalama ışık şiddeti analitik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen ortalama ışık şiddeti profilleri, farklı kaynak ve atmosfer parametreleri için video formatında kaydedilmiştir.

2. Düz tepeli ve yüksek dereceli halkasal Gauss ışık hüzmelerinin kaynak ve alıcı düzleminde ışık şiddeti hesabı

Düz tepeli ışık hüzmeleri, temel Gaussian ışık hüzmelerinin belirli bir düzleştirme parametresiyle ilişkilendirilmesiyle oluşturulur. Bu tip ışık hüzmeleri atmosferdeki yayılım esnasında daha az genişleme gösterirler ve türbülansa karşı daha dirençlidirler. Yayılım prensibi açısından bakıldığında kaynak düzleminde literatürde birçok düz tepeli ışık hüzmeleri vardır; süper Gaussian, Fermi-Dirac, süper-Lorentzian [5] gibi. Kullandığımız model Li [6] tarafından geliştirilmiştir. Bu model düzleştirme parametresiyle üstel olarak Gaussian exponansiyelinin değerlerini toplam şeklinde ifade eden bir yaklaşımdır. Yayılım eksenine dik olarak konumlandırılmış kaynak düzleminin merkezinde düz tepeli ışık hüzmelerinin alan ifadesi [4] aşağıdaki denklemle verilir.

$$u_s(\mathbf{s}) = u_s(s_x, s_y) = 1 - \left[1 - \exp\left(-s_x^2 / \alpha_{sx}^2 - s_y^2 / \alpha_{sy}^2\right) \right]^N, \quad (1)$$

(1) nolu denklemde (s_x, s_y) , \mathbf{s} vektörünün kaynak düzleminde x ve y bileşenlerine ayrılmasıyla oluşur, N derecesi düzleştirme parametresini göstermektedir, örneğin $N=1$ için, $u_s(\mathbf{s})$ temel Gaussian modun kaynak ifadesine indirgenir. α_{sx} ve α_{sy} , s_x ve s_y doğrultularındaki Gaussian kaynak boyutlarıdır.

Yüksek dereceli halkasal Gauss ışık hüzmeleri, odaksız ışık hüzmeleriyle kıyaslandığı zaman, atmosferik türbülans altında uzun yayılım mesafelerinde, hüzmeye genişlemesi ve ışık şiddeti kayıpları açısından daha iyi performans sergilemektedir [2]. Halkasal ışık hüzmeleri, birincil ve ikincil olarak adlandırılan iki eş merkezli hüzmeye alanından oluşur. Yayılım eksenine dik olarak konumlandırılmış kaynak düzleminin merkezinde yüksek dereceli halkasal Gauss ışık hüzmelerinin alan ifadesi aşağıdaki denklemle verilir [2].

$$u_s(s_x, s_y) = A_{n_1 m_1} H_{n_1}(a_{x1}s_x + b_{x1}) H_{m_1}(a_{y1}s_y + b_{y1}) \exp\left\{\frac{1}{2} 0.5k(\alpha_{x1}s_x^2 + \alpha_{y1}s_y^2)\right\} - A_{n_2 m_2} H_{n_2}(a_{x2}s_x + b_{x2}) H_{m_2}(a_{y2}s_y + b_{y2}) \exp\left\{\frac{1}{2} 0.5k(\alpha_{x2}s_x^2 + \alpha_{y2}s_y^2)\right\} \quad (2)$$

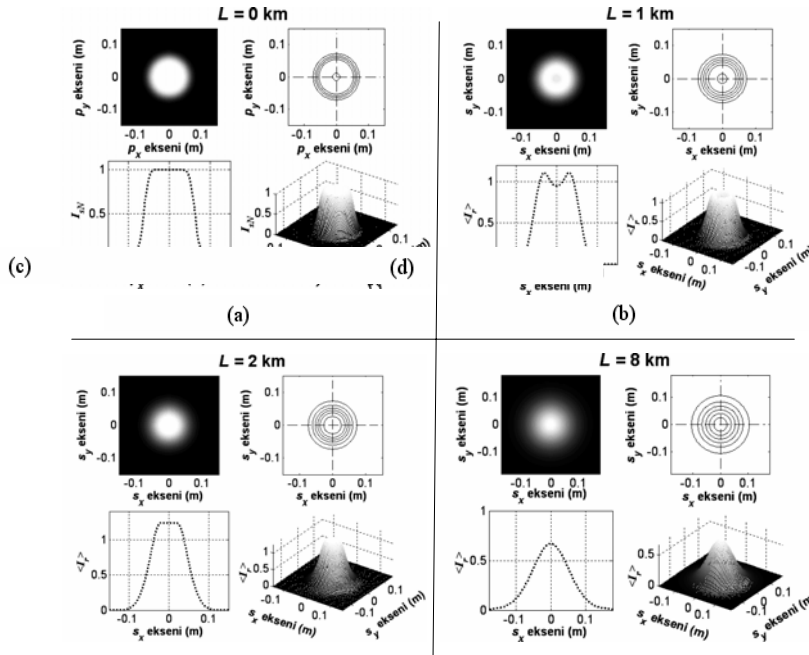
(2) nolu denklemde 1 numaralı indis birincil hüzmeyi, 2 numaralı indis ikincil hüzmeyi tanımlar. $A_{n_1 m_1}$, birincil hüzmelerin alanının genlik faktörüdür. $H_{n_1}(a_{x1}s_x + b_{x1})$ ve $H_{m_1}(a_{y1}s_y + b_{y1})$, s_x ve s_y doğrultularında hüzmeyi şekillendiren Hermite polinomlarını tanımlamakta, n_1 ve m_1 dereceleri, a_{x1} ve a_{y1} genişliği, b_{x1} ve b_{y1} de kompleks kaydırma parametrelerini göstermektedir ve

$$\alpha_{x1} = 1/(k\alpha_{sx1}^2) + i/F_{x1}, \quad \alpha_{y1} = 1/(k\alpha_{sy1}^2) + i/F_{y1}, \quad (3)$$

Burada α_{sx1} , α_{sy1} Gaussian kaynağın boyutlarıdır, s_x ve s_y doğrultuları için odaklama parametreleri F_{x1} , F_{y1} 'dir, benzer tanım ikincil hüzmeye için de geçerli olup sadece alt indis 1 yerine 2 yazılacaktır. Kaynak düzlemindeki ışık hüzmelerinin şiddeti alan ifadesinin kompleks eşleniği ile çarpımıyla elde edilir ve aşağıdaki eşitlikle verilir.

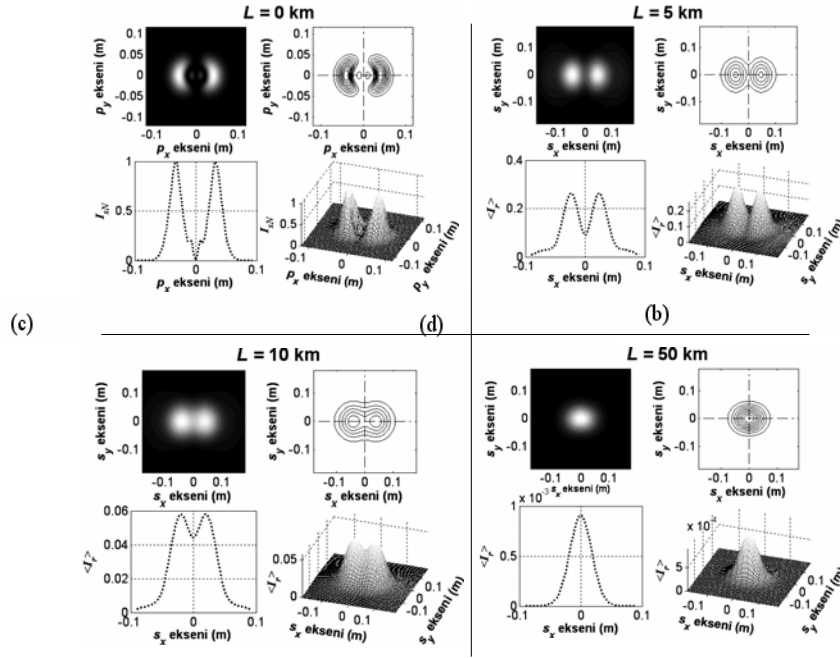
$$I_s(\mathbf{s}) = u_s(\mathbf{s})u_s^*(\mathbf{s}). \quad (4)$$

Türbülans altında atmosferde yayılan, yüksek dereceli halkasal Gauss ve düz tepeli ışık hüzmelerinin alıcı



Şekil 1. Düz tepeli ışık hüzmeleri için, (a) kaynak ve (b), (c), (d) alıcı düzleminde değişik yayılım mesafeleri için kaydedilmiş video görüntülerinden kesitler.

düzlemindeki ortalama ışık şiddeti değerlerini, daha önce hesaplamıştık [2,4]. Ref. 2 ve 4 deki (10) ve (14) numaralı denklemlerden yararlanarak yayılım eksenine dik konumlanmış alıcı düzlemindeki bu ışık hüzmelerinin, ortalama şiddet değerini, değişik kaynak ve yayılım parametreleri için çeşitli mesafelerde inceledik. Dalga boyu $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, hüzmeye boyutları, $\alpha_{sx} = \alpha_{sy} = 0.03 \text{m}$ ve yapı sabiti, $C_n^2 = 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ değeri için, düz tepeli ışık hüzmelerinin türbülans altındaki yayılımıyla oluşan ışık şiddet değerlerinin video formatında kayıt edilen profillerinden alınan kesitler Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 2. Yüksek dereceli halkasal Gauss ışık hüzmesi için, (a) kaynak ve (b), (c), (d) alıcı düzleminde değişik yayılım mesafeleri için kaydedilmiş video görüntülerinden kesitler

indislerini göstermektedir. Şekil 2 (a) kaynak düzleminde hüzmenin şiddet dağılımını, Şekil 2 (b), (c), (d) ise sırasıyla $L = 5$ km, $L = 10$ km, $L = 50$ km, yayılım mesafeleri için alıcı düzleminde hüzmenin, şiddet dağılımını farklı açılardan göstermektedir.

Sonuç ve Yorumlar

Elde edilen ortalama ışık şiddeti profilleri incelendiği zaman, yüksek dereceli halkasal Gauss kaynağından çıkan ışık alanının türbülanslı atmosferde belli bir yayılım mesafesi katettikten sonra oluşturduğu ortalama ışık şiddetinin, gözlem yapılan yayılım eksenine dik olan düzlemin merkezi çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Düz tepeli kaynaktan çıkan ışık alanının türbülanslı atmosferde belli bir yayılım mesafesi katettikten sonra oluşturduğu ortalama ışık şiddeti ise, türbülanssız ortamdakine benzer bir davranışla, gözlem yapılan yayılım eksenine dik olan düzlemin merkezinde dairesel halka şeklini almaktadır. Yayılım uzunluğu arttıkça bu dairesel halkanın çevresi ışık hüzmesinin merkezine doğru daralmaktadır. Her iki hüzme için de geçerli olacak şekilde ortalama ışık şiddeti, türbülanslı atmosferde belirli bir yayılım uzunluğundan sonra tamamen Gauss şekline dönüşmekte, yayılım uzunluğu yeteri kadar büyütüldüğünde ise beklenildiği gibi tüm alıcı düzleminde sıfır değerine yaklaşmaktadır. Elde edilen bu kayıtlar kullanılarak, verilen kaynak ve atmosfer parametreleri için kaynak düzleminde başlayarak alıcı düzlemine kadar ortalama ışık şiddetinin, yayılım eksenine dik düzlemlerde oluşturacağı profilleri video formatında izleyebilmek mümkün olmaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Baykal Y., "Log-amplitude and phase fluctuations of higher-order annular laser beams in a turbulent medium," J. Opt Soc. Am. A, 22(4) s. 672-679, 2005.
- [2]. Eyyuboğlu H.T., Altay S., ve Baykal Y., "Propagation characteristics of higher-order annular Gaussian beams propagation in atmospheric turbulence," Opt. Commun., 2006 (yayınlanacak).
- [3]. Zhang J. ve Li Y., "Atmospherically turbulent effects on partially coherent flat-topped Gaussian beam," Proc. SPIE., 5832, s. 48-55, 2005.
- [4]. 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.
- [5]. Shealy D.L. ve Hoffnagle J.A., "Beam shaping profiles and propagation," Proc. SPIE., 5876, s. 1-11, 2005.
- [6]. Li Y., "Light beams with flat-topped profiles," Opt. Lett., 27, s. 1007-1009, 2002.

Şekil 1(a) kaynak düzleminde hüzmenin şiddet dağılımını, Şekil 1 (b), (c), (d) ise sırasıyla $L = 1$ km, $L = 2$ km, $L = 8$ km, yayılım mesafeleri için alıcı düzleminde hüzmenin, şiddet dağılımını farklı açılardan göstermektedir. Benzer şekilde yüksek dereceli halkasal Gauss ışık hüzmesinin

$$\lambda = 1.55 \mu\text{m}, \quad \alpha_{\text{sd}1} = \alpha_{\text{sy}1} = 0.03 \text{ m},$$

$$\alpha_{\text{sd}2} = \alpha_{\text{sy}2} = 0.03 \text{ m}, \quad C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-23},$$

$n_1 = n_2 = 1$, $m_1 = m_2 = 0$ değerleri için türbülans altındaki yayılımıyla oluşan ışık şiddet değerlerinin video formatında kayıt edilen profillerinden alınan kesitler de Şekil 2'de verilmiştir. Burada n_1 , n_2 , m_1 , m_2 parametreleri hüzmenin birincil ve ikincil alanlarının mod