

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Effect of Atmospheric Turbulence on Gaussian Beams

Kholoud Elmabruk^a, Gamze Nur Seçilmiş^b

Submitted: 25.05.2022 Revised: 05.12.2022 Accepted: 08.12.2022 doi:10.30855/gmbd.0705051

ABSTRACT

In this study, the effects of operating wavelength, source size and receiver aperture radius parameters on scintillation, which is the most important noise source of free-space optical communication systems, were analyzed by using the field expression of Gaussian beams propagating in the atmospheric turbulent environment. In order to model the atmosphere, the random phase screen model was used. In addition, the intensity profiles of Gaussian beams propagated at different distances were investigated in order to examine how the propagation distance affects the received intensity of the beam and the parameters that would contribute to the transmission of the information carried by this beam to long distances in the turbulent atmosphere were studied. The results show that Gaussian beams with large source size and operating at low wavelength, have low scintillation values while propagating in a turbulent atmosphere, and the beam preserves its original profile. The increase in the radius of the receiver aperture provides a decrease in the scintillation value, since more beams are detected in the system. It is foreseen that these results may be the starting point for free space optical communication system designs, which are an example of wireless optical communication systems and operate in turbulent atmosphere, and may contribute to the improvement of system performance.

Keywords: Gaussian beam, Random phase screen method, Turbulence, Optical Communication

^aSivas University of Science and Technology, Dept. of Electric Electronic Engineering 58000- Sivas, Türkiye
Orcid:0000-0002-8873-584X
e mail: elmabruk@sivas.edu.tr

^bSivas University of Science and Technology, Defense Technologies Program, 58000- Sivas, Türkiye
Orcid:0000-0003-0207-4516

*Corresponding author: elmabruk@sivas.edu.tr

Atmosferik Türbülansın Gauss Işının Üzerindeki Etkisi

ÖZ

Bu çalışmada atmosferik türbülans ortamında yayılan Gauss ışınlarının alıcı düzleme ulaşan alan ifadesi kullanılarak, çalışma dalga boyu, kaynak boyutu ve alıcı açıklığı yarıçap uzunluğu parametrelerinin, serbest alan optik haberleşme sistemlerinin en önemli gürültü kaynağı olan parıldama üzerinde etkileri analiz edilmiştir. Atmosferi modelleyebilmek için dalga optiğinde yar alan rastgele faz ekran modeli kullanılmıştır. Ayrıca yayılma mesafesinin ışının alıcı düzlem yoğunluğunu nasıl etkilediğini incelemek amacıyla farklı mesafelerde yayılan Gauss ışınlarının yoğunluk profilleri incelenmiştir ve türbülanslı atmosferde bu ışının taşıdığı bilginin uzak mesafelere iletilmesine katkı sağlayacak parametreler üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, türbülanslı bir atmosferde yayılan, büyük kaynak boyutuna ve düşük çalışma dalga boyuna sahip Gauss ışınlarının parıldama değerlerinin az olması, ışının orijinal profilini koruduğu sonucuna ulaştırmaktadır. Alıcı açıklığı yarıçapının artması, sistemde daha fazla ışının algılanmasını sağlamasından dolayı parıldama değerinde azalmayı sağlamaktadır. Bu sonuçların kablosuz optik haberleşme sistemlerinin bir örneği olan ve türbülanslı atmosferde çalışan serbest alan optik haberleşme sistem tasarımları için çıkış noktası olabileceği ve sistem performansını iyileştirilmesine katkı sağlayabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gauss ışını, Rastgele faz ekran modeli, Türbülans, Optik iletişim

1. Giriş (Introduction)

Mevcut kablosuz radyo frekansı haberleşme sistemleri için alternatif ve tamamlayıcı bir teknoloji olarak ortaya çıkan serbest alan optik kablosuz haberleşme sistemleri, büyük bant genişliği ve daha yüksek veri hızları için artan taleplere çözüm olabileceği düşüncesiyle son zamanlarda oldukça ilgi görmektedir [1,2]. Askeri uygulamalarda, uzaktan algılama sistemlerinde, doğal felaket durumlarında, radyo astronomi uygulamaları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılan serbest alan optik kablosuz haberleşme sistemleri, fiber ya da koaksiyel kablolu sistemlere göre büyük bant genişliği ve yüksek hızda veri iletimi sağlanmasının yanında network ekipmanlarına direkt bağlanabilme, düşük güç tüketimi, yüksek güvenilirlik olması bu haberleşmeyi daha da popüler hale getirmektedir [3,4].

Serbest alan optik haberleşme sistemlerinde veri iletimi için yayılma ortamı olarak atmosferin kullanılması, sistemin performansını ciddi derecede etkilemektedir. Atmosfer ortamında hareket eden optik ışınlar, atmosfer boyunca yağmur, kar, rüzgâr ve sis gibi hava koşullarına maruz kalarak sistem performansını olumsuz yönde etkileyen emilme, saçılma ve kırılma indisi dalgalanmalarından olumsuz etkilenmektedir [4,5]. Sıcaklık ve rüzgâr hızındaki ani değişim, atmosferin kırılma indisinde rastgele değişikliklere sebep olarak, serbest alan optik haberleşme sistemlerinin menziline ve alıcıda ışın yoğunluğunun azalmasına neden olarak sistem performansını önemli ölçüde sınırlandıran atmosferik türbülansa yol açmaktadır [6,7]. Sistem performansını tespit etmek amacıyla çeşitli atmosferik koşullar altında optik parıldama indisi araştırılmaktadır [8]. Araştırmacılar, optik haberleşme uygulamalarında türbülans kaynaklı olumsuzlukları en aza indirebilmek ve sistem performansını arttırabilmek için birçok çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde en çok tercih edilen ışın çeşidi, ışın türlerinin çoğunluğunun genlik profillerinin çekirdeğini oluşturan, bir lazer kaynağı tarafından kolaylıkla sağlanabilen, iyi karakterize edilebilen ve üzerinde değişim yapmanın kolay olduğu Gauss ışınlarıdır [9].

Serbest alan optik iletişim sistemlerinde kullanılan ışınların, optik sistemler aracılığıyla yayılım özelliklerinin bilinmesi ve karakteristik parametrelerinin net bir şekilde tanımlanması, lazer kaynaklarının uygulamalarının başarısında önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden araştırmacılar haberleşme sistemi performansını iyileştirmek adına kullanılan ışınlara etki eden parametreleri incelemektedir [9]. Literatürde, birçok farklı optik ışın türünün parıldama değeri üzerinde ışın parametrelerinin etkileri araştırılmış olmasına rağmen [3, 10] Gauss ışınlarının parıldama indisine bu parametrelerin etkisini ayrıntılı inceleyen çalışmalar yer almamaktadır. Bu çalışmada, atmosferik türbülans ortamında yayılan Gauss ışının parıldama değeri üzerinde, kaynak boyutu, dalga boyu ve alıcı açıklığı yarıçap uzunluğu gibi sistem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Ayrıca farklı yayılma mesafelerinde Gauss ışının alıcı düzlemdeki yoğunluğunun nasıl etkilendiği analiz edilmiştir.

2. Teorik Formülasyon (Theoretical Formulation)

Gauss ışınının, kaynak düzlemdeki modellenmesi silindirik koordinat sisteminde denklem 1'de verilmiştir [12].

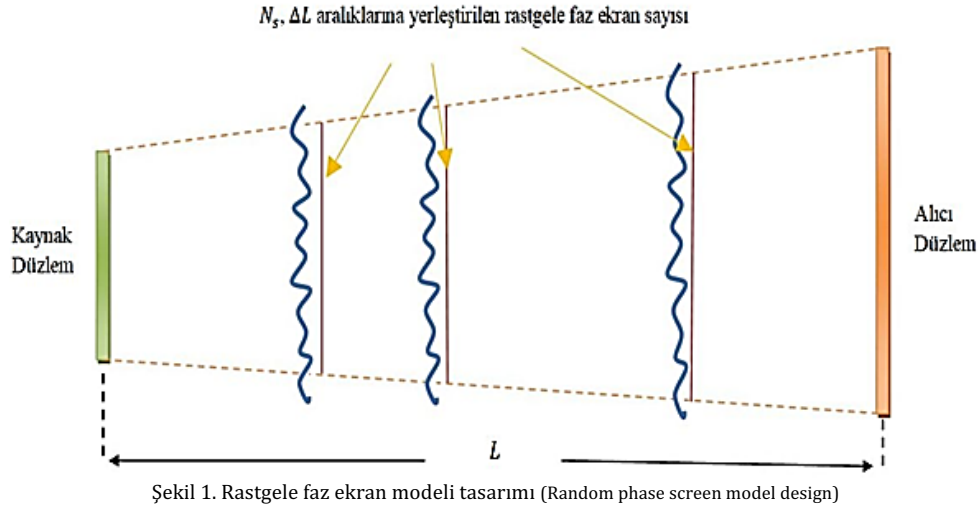
$$u_s(\mathbf{s}, \phi_s) = \exp\left(-\frac{s^2}{\alpha_s^2}\right) \quad (1)$$

Denklem 1'de yer alan (\mathbf{s}, ϕ_s) kaynak düzlem enine koordinatlarını, $u_s(\mathbf{s}, \phi_s)$ ışınların kaynak düzlem alanını, α_s kaynak boyutunu temsil etmektedir.

Rastgele ve homojen olmayan bir yapıya sahip olan atmosferik türbülansı modellemek analitik yaklaşımlar kullanılarak zor ve uzun formülasyonları çözmeyi gerektirmektedir. Birçok araştırmacı, bu durumu hafifletmek amacıyla rastgele faz ekran modelini geliştirmişlerdir. Bu metot, her ışın türüne rahatlıkla uygulanabilen, verici ve alıcı arasındaki mesafeyi Şekil 1' de gösterildiği gibi yeterli sayıda ince faz ekranlarıyla daha kısa aralıklara bölerek türbülanslı atmosferi modellemeyi amaçlamaktadır [10,11]. Bu ekranlar arasındaki mesafe, birikmiş türbülansın Rytov varyansını zayıf türbülans aralığında tutacak kadar kısa belirlenmelidir [12,13]. Atmosferin, Fourier dönüşümü ve rastgele faz ekran modelinin birleşimiyle modellenebildiği dalga optiği, atmosferik türbülans yoluyla optik ışının yayılımını modellemek içinde kullanılmaktadır [14].

Rastgele ortamda yayılan optik ışınların davranışı, ortamı nitel ve nicel olarak karakterize ederek

anlaşılmaktadır. Huygens-Fresnel integrali, türbülanslı ortamda ışın yayılımını karakterize etmek için en önemli modelleme türlerinden biridir [15]. L yayılma mesafesini alarak alıcı tarafa ulaşan ışın denklem 2'deki gibi modellenmektedir.



Rastgele ortamda yayılan optik ışınların davranışı, ortamı nitel ve nicel olarak karakterize ederek anlaşılmaktadır. Huygens-Fresnel integrali, türbülanslı ortamda ışın yayılımını karakterize etmek için en önemli modelleme türlerinden biridir [15]. L yayılma mesafesini alarak alıcı tarafa ulaşan ışın denklem 2'deki gibi modellenmektedir.

$$u_{rfs}(\mathbf{r}, L) = \frac{-jk}{2\pi L} \exp(jkL) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_s(\mathbf{s}) \exp\left[\frac{jk}{2L}(\mathbf{r} - \mathbf{s})^2\right] d^2\mathbf{s} \quad (2)$$

$u_{rfs}(\mathbf{r}, L)$ türbülans olmayan ortamda yayılan ışınların alıcı düzlemdeki alanını, (\mathbf{r}) alıcı düzlemin enine koordinatın, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ise dalga numarasını ifade etmektedir. Denklem 2, iki boyutlu Fourier dönüşüm işlemine sahip olduğundan aşağıda verilen denklemde yeniden yazılmaktadır [15].

$$u_{rfs}(\mathbf{r}, L) = \mathbf{F}^{-1}[U_s(\mathbf{f})H(\mathbf{f})] \quad (3)$$

Denklem 3'te, \mathbf{F}^{-1} ters Fourier dönüşümünü, \mathbf{f} uzaysal frekansı temsil etmektedir. $H(\mathbf{f})$ ise transfer fonksiyonunu ifade eder ve denklem 4'teki gibi gösterilmektedir.

$$H(\mathbf{f}) = \exp\left[jL\left(k - \frac{2\pi^2}{k}|\mathbf{f}|^2\right)\right] \quad (4)$$

Kullanılan rastgele faz ekran modeli, yayılma mesafesinin ince faz ekran düzlemleriyle ayrılmış N_s aralıklarına $\Delta L = L/N_s$ bölünmesi yoluyla türbülansın etkisini temsil eder. Böylece n . düzlemdeki alıcı alanı denklem 5'teki gibi ifade edilmektedir [11, 15, 16].

$$u_r(\mathbf{r}, n\Delta L) = \mathbf{F}^{-1}[\mathbf{F}[u_s(\mathbf{r}, (n-1)\Delta L)\exp(j\phi(\mathbf{r}))]H(\mathbf{f})] \quad (5)$$

Burada $\phi(\mathbf{r})$ bireysel ekranların faz güç spektral yoğunluğunu, \mathbf{F} Fourier dönüşüm operatörünü belirtmektedir. Von-Karman spektrumunun güç spektral yoğunluğu denklem 6 ile ifade edilir [11, 12, 15].

$$\Phi_\phi(\mathbf{f}) = \frac{0.0036LC_n^2k^2L_0^{11/3}}{(L_0^2|\mathbf{f}|^2+1)^{11/6}} \exp[-1.1265l_0^2|\mathbf{f}|^2] \quad (6)$$

Denklem 6'da yer alan, L_0, l_0 türbülanslı ortamın sırasıyla dış ve iç ölçeklerini temsil etmektedir. Son olarak, ışının alıcı düzlem üzerindeki yoğunluğu, alıcı düzlemin kompleks eşleniği ile çarpılmasıyla denklem 7 'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\langle I_r(\mathbf{r}, L) \rangle = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} u_r(\mathbf{r}, L) u_r^*(\mathbf{r}, L) \quad (7)$$

Denklem 7'de, $\langle \rangle$ ifadesi ortalamayı belirtmektedir ve $I_r(\mathbf{r}, L)$ alıcı alan yoğunluğunu temsil etmektedir. $u_r(\mathbf{r}, L)$ bir dizi faz ekranından geçtikten sonra alıcıya ulaşan ışınların alıcı düzlem alanını ifade etmektedir. Denklem 7'deki pratikte türbülans seviyesine bağlı olan, üst ortalama limiti N_r , teorik olarak sonsuza yaklaşır ve güvenilir sonuçlar alabilmek için 500'e ayarlamak yeterli olmaktadır [11,15,16].

Serbest alan optik sistem haberleşmesinde, optik ışınların atmosfer boyunca yayılmasına etki eden kırılma indisindeki ani değişimlerin sebep olduğu parıldama sistem performansını büyük ölçüde etkilemektedir [2]. Bu durumdan dolayı sistem performansını tespit etmek amacıyla parıldama bilgisinden yararlanılmaktadır. Alıcı düzlemin belirli bir konumdaki parıldama indisi denklem 8'de verilmiştir [10,16].

$$b^2(\mathbf{r}, L) = \frac{\langle I_r^2(\mathbf{r}, L) \rangle}{\langle I_r(\mathbf{r}, L) \rangle^2} - 1 \quad (8)$$

$b^2(\mathbf{r}, L)$ parıldama indisini temsil etmektedir. Nokta benzeri parıldama (point-like scintillation) indisi denklem 8 aracılığıyla hesaplanır. Alıcı açıklık yarıçapının r_r , $(0,5\lambda L/\pi)^{0,5}$ ifadesinden büyük olduğu durumda, açıklık ortalamalı parıldama (aperture averaged scintillation or power scintillation) indisine geçiş yapılır ve denklem 9 ve 10'daki gibi ifade edilir [16].

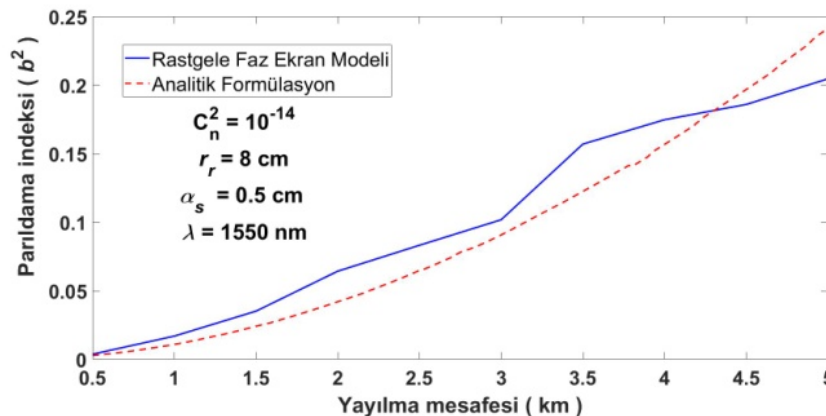
$$b^2(L) = \frac{\langle P_r^2(L) \rangle}{\langle P_r(L) \rangle^2} - 1 \quad (9)$$

$$P_r(L) = \int_{-0,5\sqrt{\pi}r_r}^{0,5\sqrt{\pi}r_r} \int_{-0,5\sqrt{\pi}r_r}^{0,5\sqrt{\pi}r_r} I_r(r_x, r_y, L) dr_x dr_y \quad (10)$$

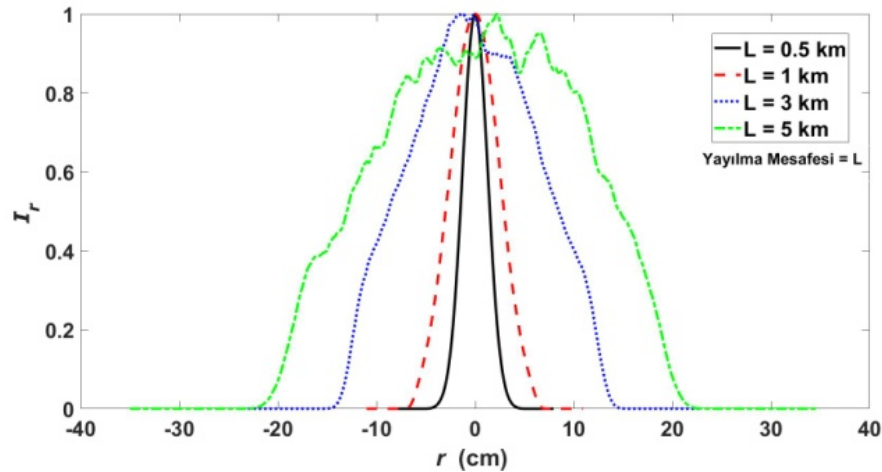
$P_r(L)$, dairesel açıklık yarıçapı uzunluğu r_r olan alıcı düzlemdeki ışının, anlık gücünü göstermektedir [16].

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Güvenilir ve doğru sonuçlar elde edebilmek için yapılan çalışmalarda belirtilen kısıtlamalara göre rastgele faz ekran modeli kullanılmıştır [13, 17]. Kullanılan rastgele faz ekran modelinin sonucu, Ref 19'un analitik formülasyonuna karşı test edilmiştir ve sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Kaynak ile alıcı düzlem arası 512×512 ızgara boyutu, 30 adet rastgele ara faz ekranına bölünmüştür. Sonuçlar, eğrilerin genel eğilimlerini ortaya çıkarmak için yeterli olduğu düşünülen 500 gerçekleştirme sayısı kullanılarak elde edilen grafiklerde sunulmuştur. Von-Karman spektrumu iç ölçeği ve dış ölçeği sırasıyla sıfıra ve sonsuza ayarlanmıştır. Işının içerdiği yaklaşık olarak tüm gücün uyumunu sağlamak için kaynak düzlem boyutlarını $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ olarak seçilmiştir. 0.5 cm kaynak boyutuna, 1550 nm çalışma dalga boyuna sahip, kırılma indisi yapı sabiti $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ olduğu parametreler dahilinde yapılan karşılaştırma sonucunda birbirine yakın eğriler elde edilmiştir. Bu sonuç kullanılan rastgele faz ekran modelinin doğruluğunu ispat etmektedir.

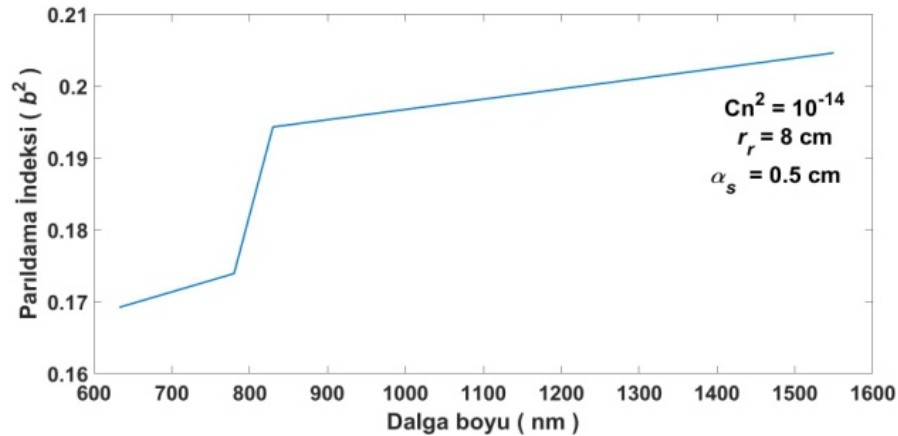


Şekil 2. Rastgele faz ekran modeli ve analitik formülasyon ile Gauss ışının parıldama değeri (Scintillation value of Gaussian beam using random phase screen method and analytical formulation)



Şekil 3. Atmosfer boyunca yayılan Gauss ışınların farklı yayılma mesafesinde ortalama yoğunluk grafikleri (Average intensity of Gaussian beam propagating in turbulence at different propagation distances (L))

Şekil 3’de, 1550 nm çalışma dalga boyuna, 8 cm alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna ve 0.5 cm kaynak boyutuna sahip Gauss ışınlarının 0.5, 1, 3 ve 5 km yayılma mesafesinde alıcı düzlemdeki normalize edilmiş yoğunluk değerinin iki boyutlu hali yer almaktadır. Bu grafiğe göre, artan yayılma mesafesiyle, optik ışının daha çok genişlediği, orijinal profilinin bozulduğu sonucuna ulaşılmaktadır [18]. Serbest alan optik sistem haberleşmesinde iletim ortamının mesafesi arttığında, optik ışın türbülanslı atmosferden ve diğer ışın parametrelerinden daha fazla etkilendiği için sistem performansı olumsuz etkilenmektedir.



Şekil 4. Dalga boyunun Gauss ışınların parıldama indisine etkisi (Scintillation variation of Gaussian beam with different operating wavelengths)

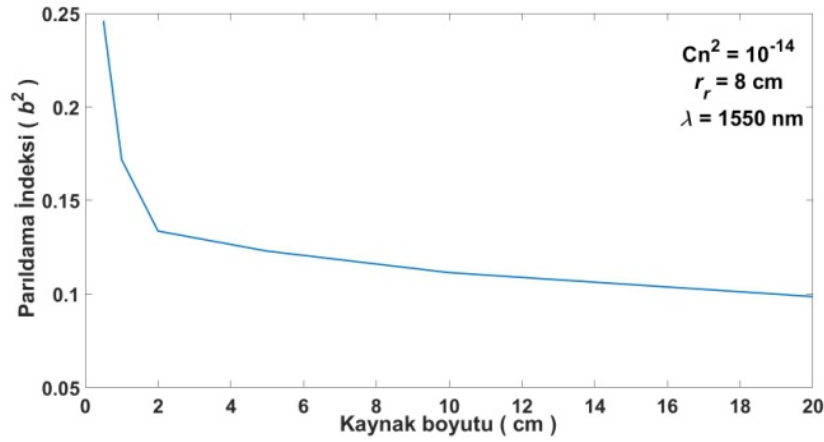
Şekil 4’te, haberleşme sistemleri için büyük öneme sahip çalışma dalga boyunun atmosferik türbülansla yayılan Gauss ışınlarının parıldama değeri üzerinde etkileri incelenmiştir. 0.5 cm kaynak boyutuna ve 8 cm alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna sahip Gauss ışının parıldama değeri 5 km yayılma mesafesi dahilinde hesaplanmıştır. Dalga boyu arttıkça Gauss ışınların parıldama seviyelerinde artış olduğu Şekil 3’te gözlemlenmektedir. Bu sonuca sebep olan durum, türbülansın etkilerinden daha çok ışının kırınım etkileridir [3].

Türbülanslı bir ortamda yayılan optik ışınların parıldama değerini etkileyen bir diğer parametre ışının kaynak boyutudur. 5 km yayılma mesafesinde, 1550 nm çalışma dalga boyuna, 8 cm alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna sahip Gauss ışınlarının parıldama değerini içeren grafik Şekil 5’te yer almaktadır.

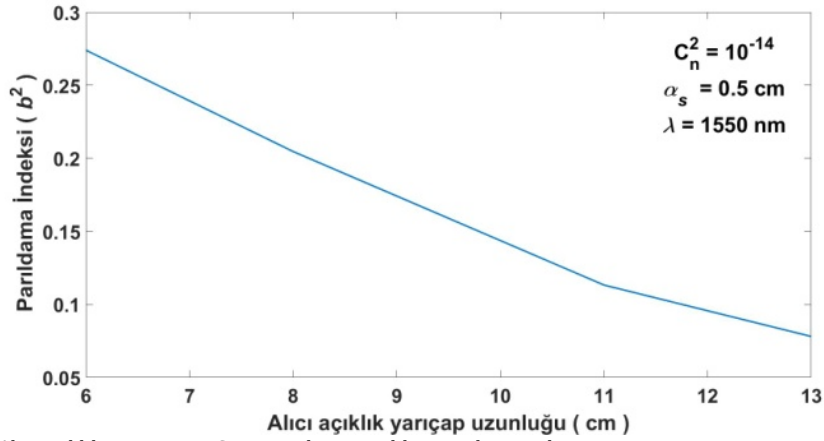
Elde edilen grafiğe göre, artan kaynak boyutuna göre, parıldama değerinin azalması, güçlü türbülanslı ortamda yayılan Gauss ışınların daha az bozulmaya uğrayarak alıcı düzlemde bu ışınların orijinal profillerine yakın elde edildikleri sonucuna ulaşmaktayız [15].

Şekil 6’te, 1550 nm çalışma dalga boyuna, 0,5 cm kaynak boyutuna sahip Gauss ışının parıldama

indisinin alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna göre nasıl değiştiği incelenmektedir. Elde edilen sonuca göre, alıcı açıklığı yarıçap uzunluğunun artırılmasıyla alıcının daha fazla dolaşan yükü algılaması sağlanacağından, parıldama değerinde bir azalış gözlemlenmektedir [3,15].



Şekil 5. Kaynak boyutunun Gauss ışınların parıldama indisine etkisi (Scintillation variation of Gaussian beam with different source sizes)



Şekil 6. Alıcı açıklık yarıçapının Gauss ışınların parıldama indisine etkisi (Scintillation variation of Gaussian beam with different receiver aperture radius)

Şekil 6'te, 1550 nm çalışma dalga boyuna, 0,5 cm kaynak boyutuna sahip Gauss ışının parıldama indisinin alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna göre nasıl değiştiği incelenmektedir. Elde edilen sonuca göre, alıcı açıklığı yarıçap uzunluğunun artırılmasıyla alıcının daha fazla dolaşan yükü algılaması sağlanacağından, parıldama değerinde bir azalış gözlemlenmektedir [3,15].

4. Değerlendirme (Conclusion)

Bu çalışmada, atmosferik türbülans ortamında yayılan Gauss ışınlarının sistem parametrelerinin parıldama üzerindeki etkileri rastgele faz ekran metodu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, güçlü türbülans atmosfer ortamında ve büyük alıcı açıklığa sahip sistemlerde, Gauss ışınlarının kaynak boyutu arttıkça daha az bozulmaya uğrayarak orijinal profillerini koruyabildikleri görülmüştür. Ayrıca güçlü türbülans ortamında, artan yayılma mesafesine bağlı olarak optik ışın daha fazla bozulmaya uğramaktadır ve sistem performansı olumsuz olarak etkilenmektedir. Sonuç olarak optik sistem haberleşme sistemlerinin performansını artırmak için alıcı düzlem üzerinde algılanan optik ışının güç miktarının artırılması veya parıldama seviyesinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışma dahilinde haberleşme sistemleri tasarlanırken hangi ışın parametrelerinin hangi sayısal değerlerde daha iyi performans sağladığı sonucuna ulaşılması, serbest alan optik sistem haberleşmesi uygulamaları için büyük önem arz etmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] H. Kaushal, V. K. Jain and S. Kar, *Overview of wireless optical communication systems, In Free space optical communication*, Springer, New Delhi, pp. 1-39, 2017.
- [2] A. Mansour, R. Mesleh, and M. Abaza, "New challenges in wireless and free space optical communications," *Optics and lasers in engineering*, vol. 89, pp. 95-108, 2017, doi:10.1016/j.optlaseng.2016.03.027
- [3] H. T. Eyyuboğlu, "Scintillation behaviour of vortex beams in strong turbulence region," *Journal of Modern Optics*, vol. 63, pp. 2374-2381, 2016, doi:10.1080/09500340.2016.1203465
- [4] P. Pinho, Ed., *Optical Communication Technology: Challenges and Opportunities of Optical Wireless Communication Technologies. Rijeka*: InTechOpen, 2017.
- [5] M. C. Naboulsi, H. Sizun, and F. de Fornel, "Fog attenuation prediction for optical and infrared waves," *Optical Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 319-329, 2004. doi:10.1117/1.1637611
- [6] J. C. Ricklin and F. M. Davidson, "Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication," *JOSA A*, vol. 19, no. 9, pp. 1794-1802, 2002, doi:10.1364/JOSAA.19.001794
- [7] A.N. Kolmogorov, "The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 434, no. 1890, pp. 9-13, 1991, doi:10.1098/rspa.1991.0075
- [8] L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopenand, M. A. Al-Habash, "Theory of optical scintillation," *JOSA A*, vol. 16, no. 6, pp. 1417-1429, 1999, doi:10.1364/JOSAA.16.001417
- [9] J. Alda, Ed., *Optical Communication Technology: Laser and Gaussian Beam Propagation and Transformation*, 2003, (Editor).
- [10] L. C. Andrews, M. A. Al-Habash, C. Y. Hopen and R. L. Phillips, "Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave model," *Waves in Random Media*, vol. 11, no. 3, 2001.
- [11] H. T. Eyyuboğlu, D. Voelz and X. Xiao, "Scintillation analysis of truncated Bessel beams via numerical turbulence propagation simulation," *Applied optics*, vol. 52, no. 33, pp. 8032-8039, 2013, doi:10.1364/AO.52.008032
- [12] A. Ijaz, L. Zhang, M. Grau, A. Mohamed, S. Vural, A. U. Quddus, M. A. Imran, C. H. Foh and R. Tafazolli, "Enabling massive IoT in 5G and beyond systems: phy radio frame design considerations," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3322-3339, 2016, doi:10.1109/ACCESS.2016.2584178
- [13] J. D. Schmidt, *Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB*, Washington: SPIE Press, DC, Chapters 7, 8 and 9, 2010.
- [14] M. Bayraktar, "Comparison of probability of error performance for truncated Bessel and Bessel Gauss Beams," M.Sc. thesis, Çankaya Univ., Ankara, Turkey, 2015.
- [15] H. T. Eyyuboğlu, "Scintillation analysis of hypergeometric Gaussian beam via phase screen method," *Optics communications*, vol. 309, pp. 103-107, 2013, doi:10.1016/j.optcom.2013.07.024
- [16] K. Elmabruk and H. T. Eyyuboglu, "Analysis of flat-topped Gaussian vortex beam scintillation properties in atmospheric turbulence," *Optical Engineering*, vol. 58, no. 6, 2019, doi:10.1117/1.OE.58.6.066115
- [17] R. Rao, "Statistics of the fractal structure and phase singularity of a plane light wave propagation in atmospheric turbulence," *Appl. Opt*, vol. 47, pp. 269-276, 2008, doi:10.1364/AO.47.000269
- [18] E. Jera, and A. Mohamed, "Gaussian Beam Propagation Through Turbulent Atmosphere using Second-Order Split-Step Algorithm," in *Proc. of the 2019 IEEE National Aerospace and Electronics Conference, IEEE, July 2019*.
- [19] H. T. Eyyuboğlu, "Aperture averaged scintillation of fully and partially coherent Gaussian, annular Gaussian, flat topped and dark hollow beams," *Opt. Commun*, vol. 339, pp. 141-147, 2015, doi:10.1016/j.optcom.2014.11.070

This is an open access article under the CC-BY license

