



Lomax sönümlenmeli kanalların etkin verimlilik analizi Effective throughput analysis of Lomax fading channels

Mehmet Bilim¹ , Yasin Kabalcı^{2,*}

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Yakın zamanda önerilen Lomax sönümlenmesinin karakteristik olarak gerçek-zamanlı ortamların sönümlenme koşullarını iyi temsil ettiği ve pratik uygulamaların analizlerinde oldukça faydalı olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada, Lomax sönümlenmeli kanallar altındaki tek giriş tek çıkışlı iletişim sistemlerinin etkin verimlilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Etkin verimlilik analizinin analitik ifadesi, Meijer G fonksiyonu cinsinden kapalı formda türetilmiştir. Meijer G fonksiyonu, kablosuz haberleşme sistemlerinde farklı performans analizleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca çalışmada türetilen analitik ifadelerin doğruluğunu kanıtlamak için tam değer simülasyon sonuçları ile analitik sonuçlar farklı senaryolar göz önünde bulundurularak kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular ile çalışmada önerilen analitik ifadenin doğruluğu teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lomax sönümlenmeli kanal, Etkin verimlilik analizi, Meijer G fonksiyonu.

1 Giriş

Kablosuz iletişim kanallarının istatistiksel modellenme süreci, son yirmi yıl içerisinde önemli ölçüde gelişmiş bir bilim ve mühendislik alanıdır [1-3]. Bu gelişim, büyük ölçüde iletişim ağları ve sistemlerindeki hızlı ilerlemeler ile bu sistemlerin performansına yönelik yüksek doğrulukta öngörülerin gerekliliğinden kaynaklanmaktadır [4, 5]. Bu bağlamda kanal modellemesi; beşinci nesil yeni radyo (fifth generation new radio, 5G NR) [6], altıncı nesil (sixth generation, 6G) [7], araçtan her şeye (vehicular-to-everything, V2X) [8], Wi-Fi 7 [9], Wi-Fi 8 ve sonrası [10] ile insansız hava aracı (unmanned aerial vehicle, UAV) sistemleri [11, 12] gibi kablosuz bağlantı bozulmalarına karşı duyarlı olan özel iletişim sistemlerinin analizi açısından oldukça önem arz etmektedir. Her ne kadar geniş kapsamlı kanal ölçüm deneyleri gerçekleştirilmiş olsa da, yayılım koşullarındaki çeşitlilik ve karakteristikler, iletişim kanal modellerinin istatistiksel tanımlamalarının birleştirilmesini ve genelleştirilmesini zorlaştırmaktadır [13]. Lomax dağılımının avantajlarından bahsedilirse, küçük ölçekli sönümlenme için güzel bir matematiksel tanımlama yapmaktadır. Kablosuz haberleşme alanında küçük ölçekli sönümlenme durumu sıklıkla karşılaşılabilen bir durumdur. Özellikle, şehir içi kablosuz iletişimde ve bina içi kablosuz

Abstract

The recently proposed Lomax fading model is anticipated to effectively represent the fading conditions of real-time environments and be highly beneficial for the analysis of practical applications. In this study, the effective throughput analysis of single-input single-output (SISO) communication systems operating under Lomax fading channels is conducted. The analytical expression for the effective throughput is derived in closed form in terms of the Meijer-G function, which is widely utilized in various performance analyses of wireless communication systems. Furthermore, to validate the accuracy of the derived analytical expressions, the exact simulation results are comprehensively compared with the analytical findings under different scenarios. The obtained results confirm the accuracy of the proposed analytical expression.

Keywords: Lomax fading channel, Effective throughput analysis, Meijer-G function.

kanal ortamlarında pratik uygulamalarda küçük ölçekli sönümlenme karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, Lomax sönümlenmesi önemli bir kablosuz kanal modelidir. Bu alanda önerilen model sayısında önemli bir artış, Yacoub ve çalışma arkadaşlarının öncü çalışmalarıyla başlamış [14-18] ve günümüzde en karmaşık modellerden [19] en basit modellere [20, 21] kadar geniş bir yelpazede devam etmiştir. [14-19]'da önerilen kanal modelleri Lomax sönümlenmesi benzer şekilde pratik uygulamalara yönelik kanal modellemesini amaçlamakta ancak farklı matematiksel tanımlamalara sahiptir. Bu çalışmalar, birbirlerine göre gelişim göstermekte ve farklı özellikleri içeren parametreler içermektedir. Örneğin, [18]'de κ ve μ gibi veya [19]'daki α , η , κ ve μ şeklindedir. Buradaki parametreler her bir kanal modeline göre farklı fiziksel özelliklere aittir. Mevcut modeller, pratikte karşılaşılan birçok kanal türünü kapsamakla (genelleştirilmiş model olmakla) birlikte, yayılım koşullarını temsil eden ağır sönümlenme senaryolarının modellenmesine yönelik yoğun çabalar da sarf edilmiştir. Bu tür senaryolar genellikle ağır kuyruklu dağılımlar ile tanımlanmakta olup, en güncel örneklerden biri Lomax kanal modelidir. Özellikle [20] numaralı çalışmada, kablosuz iletişim için en basit formda modellemeye odaklanılmıştır [13].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yasinkabalcı@ohu.edu.tr (Y. Kabalcı)

Geliş / Received: 08.04.2025 Kabul / Accepted: 09.05.2025 Yayınlanma / Published: xx.xx.20xx

doi: 10.28948/ngumuh.1672185

Lomax kanal modeli, zayıflayan bir kablosuz iletişim kanalının istatistiksel etkilerini tanımlamak amacıyla Sanchez ve López-Martínez tarafından 2024 yılında önerilmiştir [20]. Araştırmacılar çalışmalarında, hem pratik açıdan değerli senaryoları ele alabilecek hem de karmaşık fonksiyonlara başvurmadan kapalı formda analitik olarak çözümlenebilir, basitleştirilmiş bir model türetmeyi hedeflemiştir. Çalışmalarında, sistem performans analizinde gerekli olan tüm temel istatistiksel özelliklerin (olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF), kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF), ters CDF fonksiyonu (inverse CDF, ICDF), ham momentler, moment üreten fonksiyon (moment generating function, MGF) ve genelleştirilmiş MGF (generalized MGF, GMGF) gibi) kapalı formda ifade edilebildiğini göstermişlerdir. Bu yönüyle Lomax modeli; Rician, Nakagami- m ve Hoyt dağılımları gibi klasik sönümleme dağılımlarına kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır [13].

Bununla birlikte, [20] çalışması yalnızca Lomax kanalının istatistiksel tanımını sunmakla kalmamış, aynı zamanda kanal performans metriklerinin çoğunu da incelemiştir. Bu metrikler arasında ortalama bit hata oranı (average bit error rate, ABER), ergodik kapasite (ergodic capacity, EC) ve kesinti olasılığı (outage probability, OP) yer almaktadır. Lomax kanal modelinin en önemli özelliklerinden biri, her zaman hiper-Rayleigh rejiminde (HRR), en azından zayıf HRR durumunda olmasıdır. Bu özelliği sayesinde, özellikle modern kentsel kablosuz haberleşme sistemleri açısından kritik öneme sahip olan ağır sönümleme koşullarını başarılı bir şekilde tanımlayabilmektedir. Bu durum, Lomax modelinin ağır kuyruklu dağılımlar sınıfına ait olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Ağır kuyruklu dağılımlar, genellikle zayıf yayılım koşullarını temsil etme eğilimindedir [13].

Etkin verimlilik (effective throughput, ET), literatürde ilk kez hizmet kalitesi (quality-of-service, QoS) metriği olarak kablosuz bağlantıların performansını tanımlamak amacıyla önerilmiş olup, etkin kapasite olarak da bilinmektedir [22]. Bu doğrultuda, farklı haberleşme ağlarının değişik sönümleme ortamlarındaki ET performansları literatürde farklı kanal modelleri için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [23-29]. Bileşik $\alpha - \eta - \mu$ /gamma sönümleme kanalının ET performansı, karışım Gamma ve karışım Gauss dağılımları kullanılarak analiz edilmiştir [23, 24] numaralı çalışmada, MGF yaklaşımı temel alınarak genelleştirilmiş sönümleme ortamlarında ET performansı incelenmiştir. Zhang ve çalışma arkadaşları, tek girişli tek çıkışlı (single-input single-output, SISO) bir haberleşme sisteminin $\kappa - \mu$ gölgelenmiş sönümleme koşulları altındaki ET performansını analiz etmişlerdir [25, 26] numaralı çalışmada, tipik olarak akıllı şebeke haberleşme sistemleri için ET performansı değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, SISO bir sistemin Fisher-Snedecor F sönümleme kanalları üzerindeki ET performansı incelenmiştir [27]. Çok girişli tek çıkışlı (multiple-input single-output, MISO) iletişim ağları için ise $\alpha - \mu$ ve $\kappa - \mu$ sönümleme kanallarında ET performansları sırasıyla [28] ve [29] numaralı çalışmalarda analiz edilmiştir [30]. [23-30]'daki çalışmalarda farklı küçük

sönümlenmeleri ele alan kanal modellerinin farklı analizleri sunulmuştur. Bu kanal modellerinde birleşik sönümlenme örnekleri de sunulmuştur. Ancak [23-30]'daki çalışmalarda Lomax sönümlenmesi ele alınmamıştır. Daha önce bahsedilen Lomax sönümlü kanalların avantajları göz önüne alındığında ET analizinin yapılması literatüre katkı açısından önemli bir konu ve gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Sunulan çalışmanın yapılma gerekliliğini de bu şekilde izah edilebiliriz.

Daha önceki çalışmalarda, SISO veya MISO ağların ET performansı çeşitli sönümleme kanalları altında incelenmiştir. Yukarıda belirtilen bazı çalışmalar da dahil olmak üzere, $\alpha - \eta - \mu$ /gamma, $\alpha - \mu$, $\kappa - \mu$, $\kappa - \mu$ gölgelenmiş ve Fisher-Snedecor F gibi sönümleme modelleri ele alınmıştır. Ancak, yazarların bildiği kadarıyla, 2024 yılında önerilen Lomax kanalı şartlarında çalışan SISO ağlarının ET performansını inceleyen bir çalışma henüz literatürde bulunmamaktadır. Etkin verimlilik analizi ile Lomax sönümlenmesinin kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılabilirliği ortaya konulmuş olacak ve bu kanal modelinin faydaları daha net bir şekilde anlaşılacaktır. Literatürde etkin verimlilik analizi, temel inceleme parametrelerinden olup, sönümlü kanallarda önemli bir konu olarak araştırmacılar tarafından ele alınmaktadır. Bu çalışma ile bu önemli konu Lomax sönümlenmesinde incelenmiştir. Lomax sönümleme koşulları altında çalışan SISO sistemlerinin ET performansına yönelik analizlerin literatürdeki eksikliğinden hareketle, bu çalışmada söz konusu sistemin ET performansı Meijer G fonksiyonunu kullanılarak incelenmiştir. Meijer G fonksiyonu, kablosuz haberleşme sistemlerinde farklı performans analizleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elde edilen analitik etkin verimlilik ifadesi ile tam simülasyon sonuçlarının kıyaslaması nümerik sonuçlarda verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, sonuçlar birbiri ile tam uyumluluk gösterdiği ve yapılan analizi doğruluğunun ispatlanmış olduğu anlaşılmaktadır.

2 Sistem modeli

Bu çalışmada ele alınan sistem modeli geleneksel SISO tek antenli bir model olup, verici-alıcı arasındaki sönümlenme son dönemlerde popüler ve oldukça yeni bir sönümlü kanal çeşidi olan Lomax sönümlenmesidir. Verici-alıcı arasındaki sönümlenme katsayılarının Lomax dağılımına sahip olduğu ve düz bir sönümlenmeyi içerdiği varsayılmıştır. Lomax sönümlenmesi, son dönemlerde [20] numaralı çalışma ile ortaya çıkmış ve araştırmacılar tarafından ilgi görmeye başlamıştır. Lomax sönümlenmesinin karakteristik olarak gerçek-zamanlı ortamların sönümlenme koşullarını iyi temsil ettiği ve pratik uygulamaların analizlerinde oldukça faydalı olabileceği öngörülmektedir. Bu önemli avantajları üzerinde barındırdığı için Lomax sönümlü kanal ortamı bu çalışmada ele alınan sistem modeli için tercih edilmiştir. Buna göre, düşünülen sistem için ET, bir diğer tabir ile efektif kapasite analizi bu çalışmanın araştırma konusudur. Etkin verimlilik analizi ile Lomax sönümlenmeli durumların etkileri ve sistemde var olan parametrelerin performans üzerindeki etkileri analitik ifadeler ile sunulmuştur.

3 Etkin verimlilik analizi

Bu çalışmada değerlendirilen SISO iletişim sistemi için kanal sönümlenme modeli Lomax olduğundan, anlık işaret gürültü oranının (signal-to-noise ratio, SNR) PDF ($f_\gamma(\gamma)$) ifadesine ihtiyaç duyulmaktadır. $f_\gamma(\gamma)$ ifadesi, Lomax sönümlenmesi için şu şekilde ifade edilir [20]:

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left[1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \right]^{-(\alpha+1)} \quad (1)$$

burada α şekillendirme parametresi, $\gamma \sim \text{Lomax}(\alpha, \lambda)$ Lomax dağılımlı rastgele değişkeni, λ ise ölçeklendirme parametresini ifade ederken, $\lambda = \bar{\gamma}(\alpha-1)$ olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca $\bar{\gamma}$ ortalama SNR'yi temsil eder ve

$$\bar{\gamma} = \frac{P_T S_T}{N_0} \quad (2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada P_T iletim gücünü, S_T de sistemde var olan toplam kayıpları temsil ederken, N_0 ise eklenebilir beyaz Gauss gürültü (additional white Gaussian noise, AWGN) terimini belirtmektedir. ET ise kablolu haberleşmede analitik olarak şu şekilde hesaplanmaktadır [3], [30]:

$$ET = -\frac{1}{A} \log_2 \left(E \left[(1+\gamma)^{-A} \right] \right), \text{ bit/s/Hz} \quad (3)$$

burada $E[\cdot]$ beklenen değer, $A = \delta\phi B / \ln 2$ şeklinde tanımlanmaktadır. ϕ veri blok uzunluğunu, δ ise doluluk oranının azalmasıdır ve B bant genişliğini ifade etmektedir. Sayısal ikili iletim söz konusu olduğu için $\ln 2$ taban dönüşümü kullanılmıştır. O zaman ET ifadesi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$ET = -\frac{1}{A} \log_2 \left(\frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} I \right) \quad (4)$$

Denklem (4) ile sunulan ifadedeki I terimi içerisinde Lomax $f_\gamma(\gamma)$ ifadesinden ötürü bir kısım bileşenleri ihtiva eden bir integrali temsil etmekte ve şu şekilde yazılmaktadır:

$$I = \int_0^\infty (1+\gamma)^{-A} \left[1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \right]^{-(\alpha+1)} d\gamma \quad (5)$$

Denklem (5) ile verilen integralin direkt olarak çözümü yazarların bildiği kadarıyla bulunmamaktadır. Bu sebeple, ilgili ET ifadesini türetebilmek için literatürdeki analitik çalışmaların yaptığı gibi, burada ilgili bazı dönüşümler kullanılmaktadır. Buna göre, integrali oluşturan iki bileşen için şu dönüşümlerden faydalanılmaktadır. Bunlar:

$$(1+\gamma)^{-A} = \frac{1}{\Gamma(A)} G_{1,1}^{1,1} \left(\gamma \left| \begin{matrix} 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (6)$$

$$\left(1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \right)^{-(\alpha+1)} = \frac{1}{\Gamma(\alpha+1)} G_{1,1}^{1,1} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left| \begin{matrix} -\alpha \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (7)$$

şeklinde sıralanmaktadır. Burada $G_{1,1}^{1,1}(\cdot)$ Meijer G fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır ve Mathematica yazılım programında yerleşik tanımlı fonksiyonlardan biridir. Wolfram, yazılım olarak çok önceki Mathematica versiyonlarından beri bu fonksiyonu kullanıcıların hizmetine sunmuştur. Burada $(1+\gamma)^{-A}$ ve $\left(1 + \frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \right)^{-(\alpha+1)}$

ifadelerini Meijer G fonksiyonu cinsinden verilmesinin nedeni, Meijer G ifadesinin kullanımı ile Denklem (5)'in çözülebilir hale getirmek ve daha öncede vurgulandığı gibi Mathematica'da bu fonksiyonun temel olarak tanımlı olması şeklinde belirtilebilir. Bu sayede arzu edilen ET analizinin yapılabilmesi Meijer G fonksiyonu cinsinden tanımlanma ile sağlanabilmektedir. Denklem (6) ve (7)'deki dönüşümler [[31], Denklem (8.4.2.5)]'den eşleştirilerek yazılmıştır. İlgili dönüşümler kullanılarak Denklem (5)'teki I integrali tekrardan aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)\Gamma(\alpha+1)} \int_0^\infty \underbrace{G_{1,1}^{1,1} \left(\gamma \left| \begin{matrix} 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) G_{1,1}^{1,1} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left| \begin{matrix} -\alpha \\ 0 \end{matrix} \right. \right)}_J d\gamma \quad (8)$$

Dönüşüm sonucunda elde edilen Denklem (8)'deki J integrali [[32], Denklem (7.811.1)] ile sunulan forma sahiptir ve çözümü aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{aligned} W &= \int_0^\infty G_{p,q}^{m,n} \left(\eta x \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right) G_{\sigma,\tau}^{\mu,\nu} \left(wx \left| \begin{matrix} c_1, \dots, c_\sigma \\ d_1, \dots, d_\tau \end{matrix} \right. \right) dx \\ &= \frac{1}{\eta} G_{q+\sigma, p+\tau}^{n+\mu, m+\nu} \left(\frac{w}{\eta} x \left| \begin{matrix} -b_1, \dots, -b_m, c_1, \dots, c_\sigma, -b_{m+1}, \dots, -b_q \\ -a_1, \dots, -a_n, d_1, \dots, d_\tau, -a_{n+1}, \dots, -a_p \end{matrix} \right. \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Buna göre Denklem (9) ile verilen çözüm kullanılarak ve Denklem (8)'deki J ifadesinin gerekli eşleştirmeleri matematiksel olarak yapıldığında,

$$J = G_{2,2}^{2,2} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left| \begin{matrix} 0, -\alpha \\ A-1, 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (10)$$

sonucu elde edilir. Denklem (10), Denklem (8)'de yerine yazılarak

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)\Gamma(\alpha+1)} G_{2,2}^{2,2} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \left| \begin{matrix} 0, -\alpha \\ A-1, 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (11)$$

elde edilir. Buna göre Denklem (11)'de elde edilen I ifadesi, Denklem (4)'te yerine konulursa ele alınan sistem için etkin verimlilik ifadesi analitik olarak aşağıdaki gibi türetilmiş olur:

$$ET = -\frac{1}{A} \log_2 \left(\Delta G_{2,2}^{2,2} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}(\alpha-1)} \middle| \begin{matrix} 0, -\alpha \\ A-1, 0 \end{matrix} \right) \right) \quad (12)$$

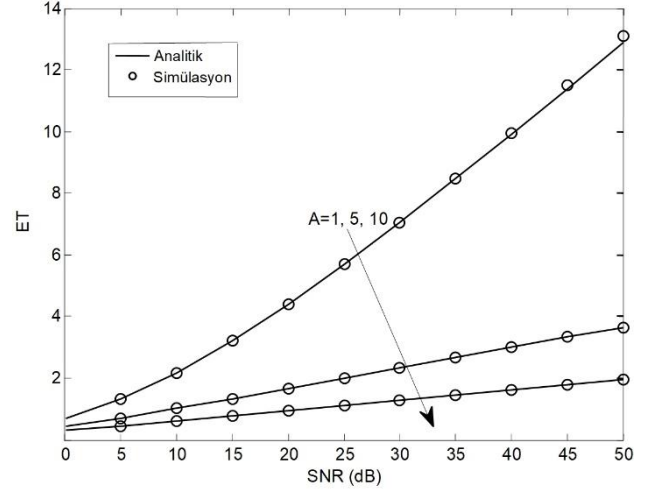
Burada $\Delta = \frac{\alpha}{\bar{\gamma}(\alpha-1)\Gamma(A)\Gamma(\alpha+1)}$ olarak bulunmuştur.

4 Nümerik sonuçlar

Lomax sönümlü kanal modelleri özellikle zor şartlar olarak bilinen yıkıcı sönümlü durumlar için kullanışlıdır. Burada, yıkıcı sönümleme ile iletişim kanalının büyük zayıflama değerlerine sahip olma olasılığının daha yüksek olma durumu kastedilmektedir. Bununla beraber, kablosuz iletişimde gölgeleme etkileri ve çok yollu yayılma gibi durumların modellenmesinde de yine bu dağılımın kullanılabileceği öne sürülmektedir [20]. Lomax dağılımında var olan α şekillendirme parametresi ile λ ise ölçeklendirme parametresi bu etkilerinin analitik olarak ayarlanmasında kullanılmaktadır. Bütün açıklamalar doğrultusunda bu alt bölümde, ET değerinin ortalama SNR'ye bağlı olarak değişimlerini içeren 3 farklı örnek durum ve bunlara ait grafikler sunulmuştur. Sunulan bütün grafiklerde açıkça görülmektedir ki, üçüncü bölümde elde edilen ET analitik ifadesinin kullanımı sonucunda elde edilen nümerik değerler ile bu ifadelerin tam değer simülasyon sonuçları birebir uyumlu bir davranış sergilemektedir. Şekillerde analitik sonuçlar düz çizgi ile temsil edilirken, tam bilgisayar simülasyonu sonuçları ise daire simgeleriyle gösterilmektedir.

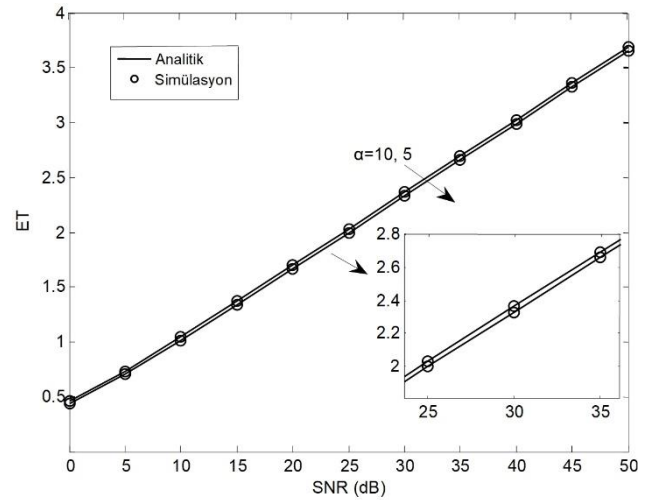
Şekil 1'de ET ifadesinde kullanılan veri blok uzunluğu, doluluk oranının azalması ile bant genişliğine bağlı olarak $A = \delta\phi B / \ln 2$ ifade edilen A değerinin farklı alınması durumları kapsamlı şekilde incelenmiştir. A değeri literatürdeki çalışmalardakilere benzer şekilde sırasıyla 1, 5 ve 10 olarak alınmış ve ET değişimleri sunulmuştur. Buna ek olarak $\alpha = 5$ olarak alınmıştır. Şekil 1 ile sunulan grafikten, A değeri arttıkça ET performansının azaldığı açıkça görülmektedir. Bu durumun nedeni A değerinin azalması, A ifadesindeki pay ifadesinin azalması anlamına gelmekte, bunun sonucunda ise veri blok uzunluğu, doluluk oranı ve bant genişliği terimlerinden birinin azalması durumu meydana gelmektedir. Bu ifadelerin herhangi biri, örnek olarak bant genişliği, azaldığında beklenildiği gibi ET performansı azalmaktadır.

Diğer taraftan, α şekillendirme parametresinin ET üzerindeki etkisinin incelenmesi durumu Şekil 2 ile verilmiştir. Burada $A = 5$ olarak alınmış olup, α değeri ise sırasıyla 10 ve 5 alınmıştır. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, α parametresinin ET üzerindeki etkisi A 'ya göre daha minör bir etkiye sahiptir. Diğer taraftan Şekil 1'de A 'nın değişiminin ET performansına daha fazla etkide bulunduğu gözlemlenmektedir.



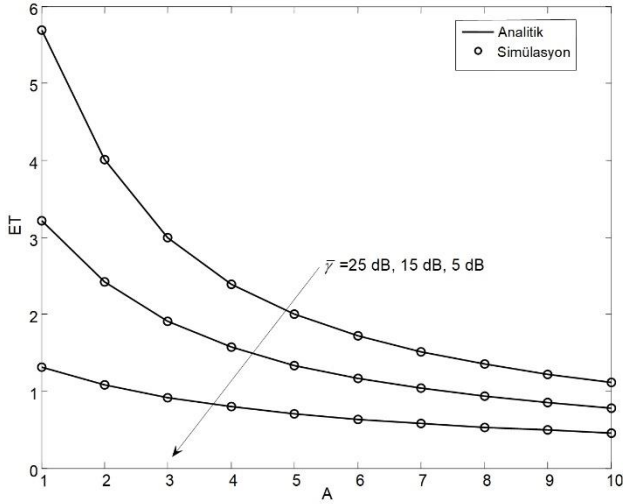
Şekil 1. Farklı A değeri için ET eğrilerinin değişimi.

Bununla birlikte, α değerinin artması ET üzerine olumlu etki göstermiştir. α değeri arttıkça Lomax kanal ortamı daha az sönümlenme etkisine sebep olacağı için ET performansı daha iyi olmaktadır.



Şekil 2. Farklı α değerleri için ET eğrilerinin değişimi.

Son olarak, Şekil 3'te farklı ortalama SNR, $\bar{\gamma}$, değerlerinin ET üzerindeki etkisi A 'ya göre değişimi sunulmaktadır. Buna göre yüksek ortalama SNR değerinde beklenildiği gibi, kullanılan iletim enerjisi fazla olacağından ötürü daha iyi bir ET performansı elde edilmektedir. Şekil 3'te eğrilerin davranışları gözlemsel olarak matematiksel açıdan değerlendirildiğinde iç-bükey şekildedir. Bunun da sebebi, ET- A değişimi ele alındığından ve yatay ekseninde A değeri arttığı için ET performansı yatay eksene asimptotik olarak yaklaşım sergilemesinden dolayıdır.



Şekil 3. Farklı ortalama SNR, $\bar{\gamma}$, değerleri için ET eğrilerinin değişimi.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, ele alınan iletişim sisteminin ET performansı için kapalı formülü bir ifade Lomax sönümlmeli kanal ortam şartlarında türetilmiştir. Çalışmanın temel amacı, yeni bir sönümlenme modeli olan Lomax kanal modelinin ET analizini matematiksel olarak ortaya koymaktır. Türetilen matematiksel ifadenin analizi, A , α , $\bar{\gamma}$ gibi çeşitli parametrelerin ET performansı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Sunulan sonuçlarda, α parametresinin değişiminin $\bar{\gamma}$ ve A parametrelerinin değişimine göre ET performansları üzerindeki etkisi daha minör olarak görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, α parametresindeki değişim ile ET performansı daha az bir değişim sergilerken, $\bar{\gamma}$ ve A değişimleri ET’de daha belirgin bir farklılık göstermektedir. Nümerik olarak bunların gözlemlenmesi, sunulan grafiklerde açıkça görülmesi mümkündür. Farklı Lomax ve ET parametreleri ile Lomax sönümlü kanal modelinin incelenmesi bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Önerilen matematiksel ifade kullanılarak elde edilen analitik bulguların, tam değer simülasyon sonuçları ile son derece tutarlı olduğu elde edilen grafik sonuçları ile açıkça gözlemlenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, çalışmada önerilen analitik ifadenin doğruluğunu teyit etmektedir. Gelecek çalışmalar açısından çalışmanın geliştirilebilir yönleri, güncel ve farklı sönümlü kanal modelleri ile kıyaslamak için farklı kanal modelleri ele alınabilir. Örneğin $\alpha - F$, Pareto, log-normal vs. gibi farklı kanal modellerinin de ET analizi yapıp kıyaslamaları sunulabilir. Buna ilaveten, Lomax sönümlü kanal modelinde gizlilik kapasitesi veya yüksek seviyeli modülasyon incelemeleri de gerçekleştirilebilir. Ayrıca, uyarlanabilir akıllı yüzey teknolojilerini kullanan haberleşme sistemlerinin Lomax sönümlü kanal modellerinde analizlerinin de yapılması mümkündür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] J. F. Paris, Advances in the statistical characterization of fading: From 2005 to present, International Journal of Antennas and Propagation. 2014(1), 1–5, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/258308>.
- [2] P. M. Shankar, fading and shadowing in wireless systems. Cham: Springer International Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53198-4>.
- [3] M. K. Simon and M.-S. Alouini, Digital communication over fading channels, 2. ed. in Wiley series in telecommunications and signal processing. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005.
- [4] S. Liu, X. Yu, R. Guo, Y. Tang, and Z. Zhao, THz channel modeling: Consolidating the road to THz communications, China Commun., 18(5), 33–49, May 2021. <https://doi.org/10.23919/JCC.2021.05.003>.
- [5] D. Serghiou, M. Khalily, T. W. C. Brown, and R. Tafazolli, Terahertz channel propagation phenomena, measurement techniques and modeling for 6G wireless communication applications: A survey, open challenges and future research directions, IEEE Commun. Surv. Tutorials, 24(4), 1957–1996, 2022. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3205505>.
- [6] F. Launay, NG-RAN and 5G-NR: 5G radio access network and radio interface. in Networks and telecommunications series. London Hoboken: ISTE Ltd, 2021.
- [7] W. Jiang and F.-L. Luo, 6G key technologies: a comprehensive guide. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, Wiley, 2023.
- [8] A. Alalewi, I. Dayoub, and S. Cherkaoui, On 5G-V2X use cases and enabling technologies: A comprehensive survey, IEEE Access, 9, 107710–107737, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100472>.
- [9] C. Chen, X. Chen, D. Das, D. Akhmetov, and C. Cordeiro, Overview and performance evaluation of Wi-Fi 7, IEEE Comm. Stand. Mag., 6(2), 12–18, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.0001.2100082>.
- [10] E. Reshef and C. Cordeiro, Future directions for Wi-Fi 8 and beyond, IEEE Commun. Mag., 60(10), 50–55, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2200037>.
- [11] K. Mao et al., A UAV-aided real-time channel sounder for highly dynamic nonstationary A2G scenarios, IEEE Trans. Instrum. Meas., 72, 1–15, 2023. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3301592>.
- [12] Y. Lyu, W. Wang, Y. Sun, and I. Rashdan, Measurement-based fading characteristics analysis and modeling of UAV to vehicles channel, Vehicular Communications, 45, 100707, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100707>.
- [13] A. S. Gvozdev, Closed-form performance analysis of the inverse power lomax fading channel model, Mathematics, 12(19), 3103, Oct. 2024. <https://doi.org/10.3390/math12193103>.

- [14] G. Fraidenraich and M. Yacoub, The α - η - μ and α - κ - μ fading distributions, In 2006 IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, pp. 16–20, Manaus-Amazon, Brazil, Aug. 2006. <https://doi.org/10.1109/ISSSTA.2006.311725>.
- [15] M. D. Yacoub, The κ - μ distribution and the η - μ distribution, IEEE Antennas Propag. Mag., 49(1), 68–81, Feb. 2007. <https://doi.org/10.1109/MAP.2007.370983>.
- [16] M. D. Yacoub, The α - μ distribution: A physical fading model for the stacy distribution, IEEE Trans. Veh. Technol., 56(1), 27–34, Jan. 2007. <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.883753>.
- [17] G. S. Rabelo and M. D. Yacoub, The κ - μ extreme distribution, IEEE Trans. Commun., 59(10), 2776–2785, Oct. 2011. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2011.081211.090747>.
- [18] J. F. Paris, Statistical characterization of κ - μ shadowed fading, IEEE Trans. Veh. Technol., 63(2), 518–526, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2281213>.
- [19] M. D. Yacoub, The α - η - κ - μ fading model, IEEE Trans. Antennas Propag., 64(8), 3597–3610, Aug. 2016. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2570235>.
- [20] I. Sánchez and F. J. López-Martínez, The Lomax distribution for wireless channel modeling: Theory and applications, IEEE Open J. Veh. Technol., 5, 162–171, 2024. <https://doi.org/10.1109/OJVT.2023.3342074>.
- [21] O. S. Badarneh and D. B. D. Costa, Fluctuating Nakagami-m fading distribution, IEEE Wireless Commun. Lett., 13(4), 959–963, Apr. 2024, <https://doi.org/10.1109/LWC.2024.3353620>.
- [22] D. Wu and R. Negi, Effective capacity: A wireless link model for support of quality of service, IEEE Trans. Wireless Commun., 24(5), 630–643, May 2003. <https://doi.org/10.1109/TWC.2003.814353>.
- [23] H. Al-Hmood and H. S. Al-Raweshidy, Unified approaches based effective capacity analysis over composite α - η - μ /gamma fading channels, Electronics Letters, 54(13), 852–853, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1049/el.2018.1006>.
- [24] Z. Ji, Y. Z. Wang, and J. H. Lu, MGF-based effective capacity for generalized fading channels, AMM, 929–933, Feb. 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.929>.
- [25] J. Zhang, L. Dai, W. H. Gerstacker, and Z. Wang, Effective capacity of communication systems over κ - μ shadowed fading channels, Electronics Letters, 51(19), 1540–1542, Sep. 2015. <https://doi.org/10.1049/el.2015.1032>.
- [26] M. You, X. Mou, and H. Sun, Effective capacity analysis of smart grid communication networks, in 2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 196–200, Guildford, United Kingdom, Sep. 2015. <https://doi.org/10.1109/CAMAD.2015.7390508>.
- [27] F. S. Almeshmadi and O. S. Badarneh, On the effective capacity of Fisher–Snedecor F fading channels, Electronics Letters, 54(18), 1068–1070, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1049/el.2018.5479>.
- [28] J. Zhang, L. Dai, Z. Wang, D. W. K. Ng, and W. H. Gerstacker, Effective rate analysis of MISO systems over α - μ fading channels, in 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 1–6, San Diego, CA, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7417005>.
- [29] J. Zhang, Z. Tan, H. Wang, Q. Huang, and L. Hanzo, The effective throughput of MISO systems over κ - μ fading channels, IEEE Trans. Veh. Technol., 63(2), 943–947, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2277992>.
- [30] M. Bilim, Effective throughput of alternate rician shadowed fading links, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 15(6), 928–930, 2020. <https://doi.org/10.1002/tee.23135>.
- [31] A. P. Prudnikov, J. A. Brychkov, and O. I. Marichev, Integrals and series. 3: More special functions, Moscow, Russia: Science, 1983.
- [32] I. S. Gradshteyn, J. M. Ryzhik, A. Jeffrey, D. Zwillinger, and I. S. Gradshteyn, Table of integrals, series and products, 7. ed., [3. Nachdr.]. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2009.

