



Investigation of indoor Terahertz channel characteristics with deterministic and stochastic approaches

Didem Boran*^{ID}, Selva Muratoğlu Çürük^{ID}

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Iskenderun Technical University, 31200, Iskenderun, Hatay, Türkiye

Highlights:

- Indoor Terahertz communication
- THz band channel characteristics
- Deterministic and stochastic modeling

Keywords:

- THz communication systems
- Channel modeling
- Path loss
- Multipath fading

Article Info:

Research Article
Received: 09.10.2023
Accepted: 23.07.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1373204

Correspondence:

Author: Didem Boran
e-mail:
didemboran0@gmail.com
phone: +90 534 874 0301

Graphical/Tabular Abstract

In this study, indoor Terahertz channel properties were examined with deterministic and stochastic approaches. In order to observe the effect of multipath fading on the channel, channel modeling was performed using ray tracing technique in a room to obtain channel impulse response and channel frequency response graphs as in Figure A. As can be seen, when the reflection of all surfaces is reduced, frequency selectivity decreases significantly.

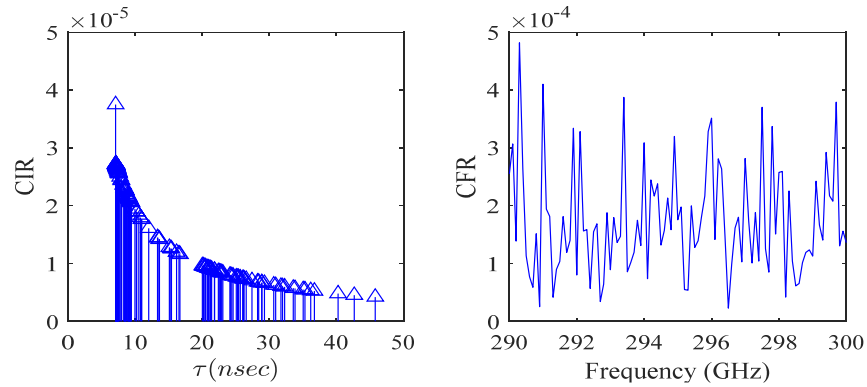


Figure A. Example to channel impulse and frequency responses of THz band channel obtained with Ray tracing technique

Purpose: This study examines the characteristics of indoor multipath THz band channels, and make a contribution to the development of an appropriate statistical model.

Theory and Methods: First, free space path loss and molecular absorption is examined with MATLAB simulations. Then, Ray Tracing technique is used for analyzing the multipath structure of indoor THz communication channels. Finally, Saleh-Valenzuela model is adapted for indoor THz channels.

Results: In the 0.1 - 10 THz band, free space path loss increases as the frequency and/or distance between transceiver and receiver increases. Further molecular absorption is very critical in THz band. There is a direct relationship between temperature and molecular absorption coefficient, the coefficient increases as the temperature increases. The coefficient also increases as humidity increases or as pressure changes. For multipath structure investigation, Ray tracing technique is used where channels are formed considering different shaped and sized rooms, for various transmitter and receiver locations. The results have shown that, when the transmitter is located at the corner (as the usual case in THz communication systems), the channel is critically frequency selective and dependent on the receiver location. Placing the receiver on the ceiling decreases the frequency selectivity and the dependence on receiver location get loose. But for safer communication reflections should be limited. For a 4x5x3 m rectangular room, sample channel impulse and frequency response graphics are given in Figure A. In the first case, there is no reflection from the floor (i.e. there is a carpet) and in the second case reflections from all surfaces are decreased by a constant 0.3, which may obtained by a special paint on the walls. As can be seen from the figure, coating the surfaces to minimize reflections makes the channel flat fading.

Conclusion: THz band communication is basically limited by distance and molecular absorption. In order to get a healthy communication, the sub-bands where molecular absorption is low should be selected. The observed indoor THz channel is also highly frequency selective. For a flat fading channel, the solution is reducing the reflectivity of the surfaces. Further, adapting Saleh-Valenzuela channel model resulted with good performance, with reduced complexity.



Deterministik ve stokastik yaklaşımlarla iç mekan Terahertz kanal karakteristiği incelemesi

Didem Boran*^{ID}, Selva Muratoğlu Çürük^{ID}

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 31200, İskenderun, Hatay, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- İç mekan Terahertz haberleşmesi
- THz bandı kanalların karakteristiği
- Deterministik ve stokastik modelleme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.10.2023

Kabul: 23.07.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1373204

Anahtar Kelimeler:

THz haberleşme sistemleri,
kanal modelleme,
yol kaybı,
çokyollu sönümleme

ÖZ

Günümüz kablosuz haberleşmesinde kullanılan radyo frekansları bandı, hızla artan büyük miktarda veri transferi ihtiyacını karşılamakta zorlanmaktadır. Bu nedenle bilim dünyası elektromanyetik spektrumda Terahertz (THz) boşluğu olarak adlandırılan frekans bandını kullanarak yüksek veri hızına ulaşmayı amaçlamaktadır. Kablosuz THz sistemlerinin karşılaştığı kanal, özellikle iç mekânlarda çokyollu yapısı nedeniyle karmaşıktır, performans açısından incelenmesi gereken öncelikli konulardan birisidir. Bu çalışmada öncelikle 0,1 - 10 THz bandında boş alan yol kaybı ve moleküler soğurma incelenmiştir. Boş alan yol kaybı mesafeyle ilişkilidir. Moleküler soğurmanın sebep olduğu frekans seçicilik kritiktir; ısı ve nemle artış göstermektedir ve özellikle yüksek frekanslarda ani zayıflamalar sıklıkla gözlenmektedir. Verimli bir haberleşme için bu zayıflamaların olmadığı güvenli iletişim pencereleri belirlenmiştir. Ardından, iç mekân çokyollu kanalın modellenmesi için ışın izleme tekniği iç mekân THz kanallarına uyarlanmış, farklı senaryolarda kanal yapıları incelenmiştir. Simülasyonlar güçlü zayıflama nedeniyle yansımaların görüş hattına göre zayıf kaldığını göstermiştir, ancak çokyollu kanal yapısı yine de frekans seçici bir kanala neden olmaktadır. Oda boyutunun artması ve vericinin tavanda konumlanması frekans seçiciliği azaltsa da düz sönümlenmeli bir kanal için yansımaların azaltılması gerekmektedir. Son olarak, ışın izleme modeli ile literatürde bulunan üstel kanal modeli kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda nispeten basit sayılan üstel model ile THz kanalın kolayca modellenebileceği sonucuna varılmıştır.

Investigation of indoor Terahertz channel characteristics with deterministic and stochastic approaches

HIGHLIGHTS

- Indoor Terahertz communication
- THz band channel characteristics
- Deterministic and stochastic modeling

Article Info

Research Article

Received: 09.10.2023

Accepted: 23.07.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1373204

Keywords:

THz communication
systems,
channel modeling,
path loss,
multipath fading

ABSTRACT

The radio frequency band used in today's wireless communication has difficulties in meeting the rapidly increasing need for big data transfer. Therefore, the scientific world aims to reach high data rates by using the frequency band called Terahertz (THz) gap in the electromagnetic spectrum. The channel that wireless THz systems encounter, especially for indoors the channel is complex due to its multipath structure, is one of the priority issues to be examined for the performance. In this study free space path loss and molecular absorption in 0.1 - 10 THz band, are investigated first. Free space path loss is related to distance. The frequency selectivity caused by molecular absorption is critical, it increases with temperature and humidity and sudden gaps are often observed especially in high frequencies. The safe communication windows without sudden attenuations are determined. Following, the ray tracing technique is adapted to indoor THz channels, and the channel structures for various scenarios were examined. The simulations have shown that because of strong attenuation in the waves, the reflections are weak relative to the line of sight, nevertheless, the multipath channel results in a frequency selective channel. Although increasing the room size and positioning the transmitter on the ceiling reduces frequency selectivity, for a flat fading channel surface reflections need to be reduced. Finally, the ray tracing model is compared with the exponential channel model found in the literature. It was concluded that the THz channel can be modeled easily with the exponential model, which is considerably simple relative to other method.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *didemboran0@gmail.com, selva.curuk@iste.edu.tr / Tel: +90 534 874 0301

1. Giriş (Introduction)

Kablosuz haberleşme sistemlerinin iletmesi gereken veri miktarı ve hızı her gün ciddi oranda artmaktadır. Bu artış kablosuz ağlarda veri trafiğinde yüksek yoğunluk meydana getirmektedir. Farklı modülasyon yöntemleri, çoğullama, veri sıkıştırma gibi tekniklerle spektral verimliliği artırmayı amaçlayan yaklaşımlar bulunmaktadır, ancak radyo frekansı bandının yakın zamanda yetersiz kalacağı açıktır. Bu darboğazın aşılması için alternatif frekans bantları araştırılmaktadır. Bu alternatifler arasında mikrodalga ile kızılötesi dalga frekans bantları arasında bulunan Terahertz (THz) bandı öne çıkmaktadır [1-4]. Bu bandın kullanılmasıyla terabit seviyelerinde veri iletim hızına ulaşılması amaçlanmaktadır. THz boşluğu olarak bilinen bu aralıkta frekans üretiminin zor olması uzun yıllar bu bandın kullanılmasını engellemiştir. Teknolojideki yeni gelişmelerle beraber grafen gibi nano malzemelerin kullanımıyla bu frekansların üretilmesi mümkün olmuştur [2]. THz haberleşmesine artan ilgi standartların oluşmasını tetiklemiştir [1, 2]. 2017 yılında 300 GHz için tanımlanan ilk standart IEEE 802.15.3d-2017 onaylanmıştır [1], bu konudaki çalışmalar hızla devam etmektedir.

THz haberleşmesi iç ve dış mekanlarda farklı alanlara uygulanabilir. Ancak yağmur, rüzgâr, sis, bulut gibi atmosferik koşulların etkisiyle THz dalgalarında oluşan ağır zayıflama (yüksek yol kaybı) iletim mesafesini kısaltır [5], bu da THz haberleşmesinin kapalı alanlarda daha çok yaygınlaşmasına neden olmuştur. THz dalgalarının kullanım alanları arasında hava limanı güvenliği, tıbbi görüntüleme, savunma endüstrisi, spektroskopi, mikro elektronik mekanik sistemler (MEMS) sayılabilir. Kimlik işlemlerinde yaygınlaşan mikro işlemci kontrollü bilgisayar ve dokunmatik ekrandan oluşan kiosklar ve veri iletim hızının büyük önem taşıdığı Veri Merkezleri için de THz teknolojisinin kullanımı planlanmaktadır [1]. THz dalgaların 5. Nesil Ötesi ve 6. Nesil hücresele yerel ve kişisel alan ağlarında kullanılması ile ultra yüksek hızlı terabit haberleşmesi amaçlanmaktadır [2]. Bunlara ek olarak, THz haberleşmesinin çip içi ve çipler arası iletişimde kullanılabileceği öngörülmektedir [1].

Sağlıklı bir haberleşme için, iletişim yapılan fiziksel ortamın ölçümlerinin yapılması, ardından kanalın matematiksel olarak modellenmesi gereklidir. Bilindiği üzere, büyük ölçekli sönümlenme deterministik modellenirken, küçük ölçekli sönümlenme stokastik modellenir [6]. Deterministik modellerin doğruluğu yüksektir, ancak ortam tamamen tanımlı olmalıdır ve değişiklik olduğunda hesaplamaların tekrar yapılması gerekir [7]. Bu nedenle çevresel etkenlerin sürekli değiştiği, mobil haberleşmede olduğu gibi, uygulamalarda tercih edilmezler. Stokastik modellemelerde işlem karmaşıklığı daha azdır, kanal parametreleri deneysel ölçümlere dayanarak çevre etkilerinin ortalaması alınarak rastgele dağılımlar ile modellenir [7]. Literatürde farklı ortamlar ve senaryolar için THz kanallarının ölçümleri ve modelleri oluşmaya başlamıştır. Örneğin, [8]'da vektör ağ analizörüne ile frekans düzlemi kanal ölçümü, kayan korelasyona dayalı zaman düzlemi kanal ölçümü ve spektroskopiden elde edilen darbelerle zaman düzlemi kanal ölçümü metodolojileri karşılaştırılmaktadır. [9] de tekdüze düzlemsel dizi yapısına sahip anten kullanılarak çok girişli tek çıkışlı THz kanalın özelliklerinin analizi sunulmaktadır. [10]'in yazarları milimetrik dalga ve THz bantlarında kanal parametresi kestirimi için genelleştirilmiş bir beklenti maksimizasyon algoritması önermektedir. [11]'de çoklu giriş çoklu çıkış ve akıllı yansıtıcı yüzey sistemlerinin kanalı için bir kanal modeli tanıtılmıştır. [12]'un yazarları akıllı olmayan yansıtıcı yüzeylerin etkinliğini iç mekânlarda 306-321 GHz ve 356-371 GHz bantlarında kanal ölçümleri gerçekleştirerek göstermiştir. [13]'de Kiosk indirme, ofis, salon ve tipik endüstriyel ortamlar gibi seçili iç mekânlarda kanal ölçümleri yapılmıştır.

Kanal modellemesi için yapılan çalışmalarda, [14]'ün yazarları iç ve dış mekânlar için THz kanalı deterministik olarak karakterize etmişlerdir. [15]'de geniş bant THz haberleşmesi için bir kanal

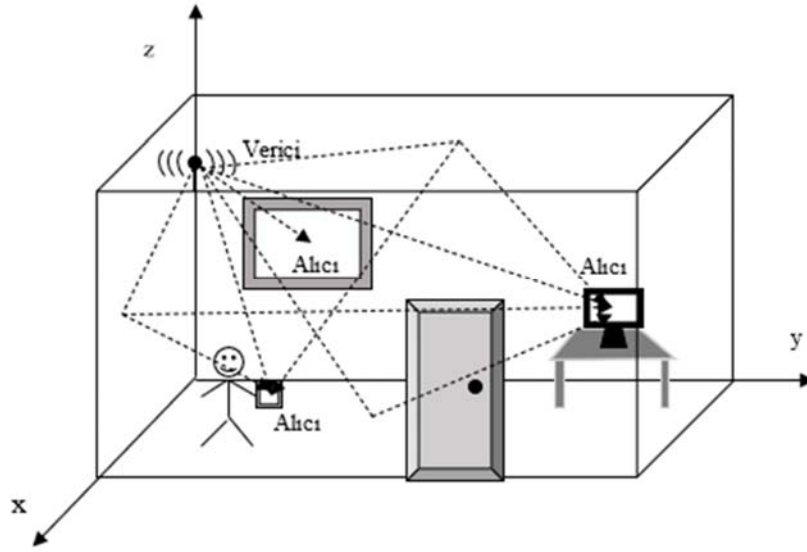
simülatörü önerilmektedir. 130 – 143 GHz için tipik bir toplantı odasının kanal ölçümlerini inceleyen [16]'te, THz sinyallerinin dalga yayılımı deterministik Işın izleme (Ray Tracing, RT) tekniğini kullanılarak incelenmiştir. [17]'te kent ortamında 300 GHz'de araç ile altyapı arası kanalı analiz etmek için yine Işın İzleme tekniği kullanılmıştır. Diğer ışın izleme metodunun kullanıldığı çalışmalarda [18 - 20], farklı frekanslarda atmosferik zayıflama ve dağılım yansımalarının etkileri incelenmiştir. [21]'de yazarlar geliştirdikleri üç boyutlu ışın izleme algoritması ile ofis ortamında THz frekanslarında çokyollu yayılımı incelemiştir. Yine iç mekânda yapılan bir çalışmada, ışın izleme tekniğine dayanan bir model ile farklı malzemelerle oluşan yansıma yolları incelenmiştir [22]. Işın izleme ve stokastik yöntemleri birleştiren [23]'de düşük THz frekanslarında (201-209 GHz) tipik iç mekânlara ait kanal ölçümleri yapıldıktan sonra hibrit bir kanal modeli geliştirilmiş, küçük ölçekli kanal parametreleri uygun dağılımlarla modellenmiştir.

Stokastik modelleme yapılan çalışmalarda [24-27], alışveriş merkezi, havaalanı ve bir üniversitenin giriş salonunda yapılan ölçümlere dayanarak THz kanal Rayleigh, Rice, Nakagami-m ve α - μ dağılımlarıyla modellenmiş, ölçümlerle en uyumlu sonucu α - μ dağılımının verdiği gösterilmiştir. Yansıma kaybı, çokyollu sönümlenme veya blokaj gibi değişken etkenlerden dolayı yayılımı istatistiksel olarak karakterize etmeyi tercih eden [28]'nin yazarları, duvarların, nesnelerin ve insan vücudunun sebep olduğu etkileri analiz ettikten sonra kanal modellerini araştırmıştır. Saleh-Valenzuela (SV) stokastik modelini THz bandına uyarlayan bir çalışma, verici ve alıcı arasındaki mesafenin etkisinin frekans bandında değişikliklere neden olduğu göstermiştir [29]. Aynı yaklaşımı kullanan [30, 31]'un yazarları 28 ve 140 GHz'de yapılan çalışmalarla yol kaybı, kümelerin sayısı ve gecikmeleri incelemiştir. Bir veri merkezindeki THz kanalı ele alan bir çalışmada küme tabanlı yayılma modeli kullanılmıştır [32]. THz ağlarda stokastik kanal modellemenin performansını inceleyen [33]'de analitik sonuçlar Monte-Carlo simülasyonları ile doğrulanmıştır. Kanalın çokyollu bileşenlerini inceleyen [34]'de yol kaybı, gölge sönümlenmesi, gecikme yayılması ve küme parametreleri analiz edilmiştir. Ofis ortamında yapılan diğer bir çalışmada 140 GHz merkez frekansında kanal incelenerek bir simülatör tasarlanmış, yayılma gecikmesi ve yol kaybı parametreleri incelenmiştir [35].

Bu çalışmanın amacı, iç mekân THz sistemlerin kanal karakteristiklerini incelemek ve uygun modelin belirlenmesine katkı sağlamaktır. Bu amaçla Bölüm 2'de iç mekân THz kanalları üzerine bilgi verildikten sonra, Bölüm 3'te simülasyon sonuçları verilmiştir. Literatürde günümüzde kullanılan düşük THz bantları için yol kaybı ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada ileriye yönelik olarak geniş THz bandı (0,1 – 10 THz) için yol kaybı incelenmiş, moleküler soğurmanın sebep olduğu pikler göz önünde tutularak iletişim pencereleri belirlenmiştir. Ardından çokyolluluğun modellenmesi için kanal ışın izleme modeli ile Saleh-Valenzuela modeli iç mekân THz kanalları için uyarlanmış, farklı konfigürasyonlarda (kullanılan frekans, ortamın boyutu, alıcı/verici arasındaki uzaklık vs.) oluşan kanalın özellikleri incelenmiştir. Yapılan analizlerle yansımaların etkisi ile oluşan frekans seçiciliği azaltmak için verici konumu önerilmiştir. Ardından üstel dağılımlı stokastik bir modelin kullanılarak kanalın modellenebileceği gösterilmiştir.

2. İç Mekân Terahertz Haberleşmede Kanal (Indoor Terahertz Communication Channel)

İç mekân THz haberleşmesinde, verici ve alıcı antenlerin birbirlerini direkt gördüğü durumda görüş hattı (LoS) ve çevredeki nesnelere yansıma, saçılma ve kırınım sonucunda görüş hattı olmayan (NLoS) yayılım gerçekleşir (Şekil 1). NLoS hatlardan gelen sinyal zayıf olsa da özellikle verici alıcı arasında engelleme olduğunda haberleşme için kritik önem taşır. Literatürde THz bandında kontrollü yansımalar kullanılarak NLoS iletim ile yüksek veri hızlarına ulaşılacağı



Şekil 1. İç mekan THz kanal simülasyon ortamı (Indoor THz channel simulation medium)

gösterilmiştir [36]. NLoS yayılımında iletilen sinyal, farklı yayılım yollarında farklı gecikme ve zayıflama ile ilerleyerek alıcıya ulaşır. Neticede çokyollu kanal yapısı oluşur ve kanal dürtü tepkisi (Channel Impulse Response, CIR) Eş. 1’de verildiği şekilde ifade edilir:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \delta(\tau - \tau_i) \quad (1)$$

Eş. 1’de N yol sayısı, a_i ve τ_i sırasıyla i . inci yayılımın zayıflamasını ve gecikmesini ifade eder. Teorik olarak sonsuz sayıda yansıma alıcıya ulaşacaktır, ancak belli bir yansıma sonrası zayıflamanın etkisi ile alıcıya ulaşan bileşenlerin gücü ihmal edilecek seviyede olacaktır. Bu nedenle N sonlu bir sayı olarak alınır. LoS iletimde CIR tek bileşenli ($N=1$) olacaktır.

Çokyollu bir kanalda haberleşmenin sağlıklı yapılabilmesi için zaman karakteristiğinin yanında bant karakteristiğini gösteren kanal frekans tepkisi (Channel Frequency Response, CFR) de ele alınmalıdır. CFR Eş. 2’de verildiği üzere kanal dürtü tepkisinin Fourier dönüşümü ile elde edilir (Δt zaman dilimi genişliği):

$$h(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n, \Delta t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t} \quad (2)$$

THz kanallarının frekans tepkisi Eş. 3’de görüldüğü üzere hem büyük hem de küçük ölçekli sönümlenmeyi içeren bileşenlerden oluşur [37]:

$$h(f) = h_{bl}(f) \cdot h_{mis}(f) \cdot h_{pl}(f) \cdot h_{sh}(f) \cdot h_{mf}(f) \quad (3)$$

Eş. 3’de $h_{bl}(f)$, $h_{mis}(f)$, $h_{pl}(f)$, $h_{sh}(f)$ ve $h_{mf}(f)$ sırasıyla blokaj (blockage), yanlış hizalama (misalignment), yol kaybı (path loss), gölgeleme (shadowing) ve çokyollu (multipath fading) sönümlenmeleridir. Yol kaybı ve çokyollu sönümlenmesi iç mekân uygulamalarında mutlaka yaşanır, ancak diğer sönümlenmeler senaryoya bağlı olarak oluşmayabilir veya çözümlenebilir. Bu nedenle bu çalışmada sadece yol kaybı ve çokyollu sönümlenmesi ele alınmıştır.

2.1. Terahertz Kanallarda Yol Kaybı Sönümlenmesi (Path Loss in Terahertz Channels)

THz kanallarda yol kaybı $h_{f_{spl}}(f)$ boş alan yol kaybı (Free Space Path Loss, FSPL) ve $h_{ma}(f)$ moleküler soğurma kaybindan oluşur (Eş. 4):

$$h_{pl}(f) = h_{f_{spl}}(f) \cdot h_{ma}(f) \quad (4)$$

Frekans ve iletim mesafesine bağlı olan boş alan yol kaybı alıcı ve verici antenler arasında herhangi bir engel olmadan alıcıya ulaşan sinyal gücündeki zayıflamayı ifade eder ve Friis denklemi yardımı ile Eş. 5’de verildiği şekilde bulunur [38]:

$$h_{f_{spl}}(f) = \frac{c \cdot \sqrt{G_T \cdot G_R}}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d} \quad (5)$$

c ışık hızını, d alıcı/verici arasındaki mesafeyi, G_T ve G_R sırasıyla verici ve alıcı anten kazançlarını temsil etmektedir.

Moleküler soğurma, dalga enerjisinin atmosferdeki moleküller tarafından emilmesinden kaynaklanır [39]. Elektromanyetik dalga yayılma yolu boyunca belirli moleküllerde titreşime neden olur, bu hareketlilik moleküllerin enerji seviyelerinde değişikliklere neden olur. Titreşimlerin olduğu bölgelerde THz dalgaların emilimi artar, ortaya çıkan bu enerji kaybına moleküler soğurma etkisi denir. Her molekül farklı frekanslarda, farklı titreşimler gösterir, bir çok rezonans frekansı THz bandı içindedir. Ortamı oluşturan bileşenlere bağlı olarak bazı noktalarda soğurma kaybı çok büyük değerlere ulaşır (soğurma pikleri) sonuçları etkileyebilecek büyüklüklere gelebilir. THz dalgalarda su buharı soğurmaya neden olan en etkili moleküllerdendir. Moleküler soğurma kaybını hesaplamak için literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanları Eş. 6’da verilen Beer-Lambert yasasından yararlanır [40]:

$$h_{ma}(f) = e^{-\frac{d}{2} \cdot k(f)} \quad (6)$$

Eş. 6’da $k(f)$ moleküler soğurma katsayısı olup ortamın basınç, sıcaklık, nem ve moleküler yapısına göre değişiklik gösterir. Katsayılar işlem karmaşıklığının yoğun olduğu HITRAN veri tabanından elde edilmektedir. Literatürde HITRAN veri tabanına alternatif olarak 100 - 450 GHz bandı için [40] moleküler soğurma katsayısını basitçe hesaplayan ve standart atmosfer koşullarında doğru sonuçlar verdiği gösterilen bir yaklaşım da bulunmaktadır.

2.2. Terahertz Kanallarda Çokyollu Sönümlenmesi (Multipath Fading in Terahertz Channels)

Çokyollu kanalların deterministik modellenmesinde Işın İzleme metodu yaygın olarak kullanılır [41]. Bu teknikte kaynaktan üretilen

ışınlar odada rastgele şekilde ilerlemeye devam ederken yüzeylere çarpıp. Dalganın dalgaboyuna ve çarpıtığı nesnenin ilişkisine göre yansımaya, saçılma veya kırınım olayları gerçekleşebilir. Yüzeyden yansımaya kayıpları nesnenin materyaline, şekline ve pürüzlülük katsayısına bağlıdır. Ardından, güçleri yüzeylerin yansımaya bağlı olarak azalan dalgalar rastgele yönlerde yeni ışınlar oluşturur. Oluşan ışınlar oda boyunca izlenir ve alıcıya ulaşan bütün ışınlar ile kanal dürtü tepkisi elde edilir. Işın izleme metodunun ilk uygulama tekniklerinden olan Monte Carlo Işın İzleme tekniğinde [42] rastgele yayılan ışınlar yüzeylere çarpıtığında güçleri yüzeylerin yansımaya katsayısıyla azalır, ardından yönleri olasılıksal bulunan yeni ışınlar üretir. Rastgele yönlerde üretilen bu ışınlar oda boyunca izlenir ve alıcıya ulaşan ışınlarla CIR elde edilir. Ancak bu algoritmada alıcıya ulaşabilen ışın sayısı düşüktür. Kanal modellenmesinin süresini kısaltmak için geliştirilen Modifiye Monte Carlo (MMC) algoritmasında [43] her yansımaya noktasından alıcıya LoS olduğu varsayılır. Bu yöntemle elde edilen dürtü tepkileri ışınların yönünün rasgele yapısından dolayı farklılıklar içerebilir, izlenen ışınların sayısı artırılarak varyans azaltılabilir. Bu çalışmada THz kanalının deterministik modellemesi için MMC'nin bir versiyonu [44] uyarlanmıştır.

Literatürde THz kanallarda çokluyol sönümlemesi Üstel, Gama, Nakagami-m, Rayleigh veya α - μ gibi dağılımlar kullanılarak stokastik olarak modellenmiştir [24-27], ama Üstel dağılım kolaylığı nedeniyle daha yaygındır. Stokastik kanal modeli öneren çalışmalar, iç mekân THz yayılımını Saleh-Valenzuela (SV) modeline dayandırmaktadır. İç mekânlarda yayın kullanılan bu modele göre, işaretler ışınlardan (ray) oluşan kümeler (cluster) halinde alıcıya ulaşır. Kümeler binanın temel yapısı tarafından oluşturulurken, ışınlar çevredeki nesnelere tarafından oluşturulur [15]. Bu modele göre NLoS yansımaların olduğu bir kanalda sırasıyla küme ve ışın varış zamanları bir öncekilerin varış zamanlarıyla ilişkili olarak üstel dağıtılmış rastgele değişkenlerdir. Kümeler ve küme içindeki ışınların sayısı varış zamanlarıyla ilişkili olarak iki bağımsız Poisson süreci ile belirlenir. Literatürde önerilen bu stokastik modelin THz kanalları için doğruluğu 550 GHz'e kadar onaylanmıştır [15].

Çokyollu kanalların zaman yayılım özelliklerini ölçmek için literatürde sıkça kullanılan anahtar parametre rms gecikme yayılımıdır. Gecikme yayılımı, alıcıya ulaşan ilk bileşen olan LoS ile çokyollu son bileşenin varış zamanları arasındaki farktır. Rms gecikme yayılımı ise yansımaların gecikme değerlerinin standart sapmalarının normalize edilmiş halidir [45] ve matematiksel olarak Eş. 7'deki gibi ifade edilir:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t-\bar{\tau})^2 h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}} \quad (7)$$

Burada ortalama gecikme yayılımı $\bar{\tau}$ Eş. 8'de tanımlanmıştır:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (8)$$

τ_{rms} kanal (verici ve alıcı pozisyonları, ortam vs.) değişmedikçe sabit olacaktır. Bir haberleşme sisteminde sembol süresi kabaca gecikme yayılımından 10 kat daha büyük ise simgeler arası girişim olmadan iletişim olması beklenir [45]. Kullanılabilen maksimum bant genişliğinin bir tahmini olan uyumluluk bant genişliği B_c sinyal zayıflamasının sabit kabul edilebileceği frekans aralığıdır. Kanal korelasyonunun 0,5'i geçtiği maksimum frekans aralığında B_c Eş. 9 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir [45]:

$$B_c \approx \frac{1}{5 \cdot \tau_{rms}} \quad (9)$$

Rms gecikme yayılımı kullanılarak bulunan bir diğer parametre ise Eş. 10'da verilen veri aktarım hızının üst sınırıdır [45]:

$$R_b \leq \frac{1}{10 \cdot \tau_{rms}} \quad (10)$$

Çokyollu bir kanalda LoS bileşeninin baskınlığını gösteren diğer bir parametre, LoS ve NLoS hatlarının güçleri arasındaki oran olarak tanımlanan ve çokyolluluğun seviyesini gösteren Rician faktörüdür [45], Rician faktör Eş. 11'de verilmiştir:

$$K_{rf} = \frac{P_{LoS}}{P_{NLoS}} \quad (11)$$

K_{rf} 'in sıfır değerini alması LoS olmayan en şiddetli durumu gösterirken, sonsuz değeri alması NLoS olmadığını ifade eder.

3. Simülasyon Bulguları (Simulation Results)

Bu çalışmada iç mekân THz kanallarında yol kaybı ve çokluyol sönümlemesi bilgisayar ortamında MATLAB yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Simülasyonlarda sadece kanalın etkisini görebilmek amacıyla alıcı ve verici antenleri ideal kabul edilmiş, anten kazançları G_T ve G_R 'nin değeri 1 alınmıştır. Alıcı ve verici blokaj olmayacak ve birbirlerini görecektir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 1).

3.1. Yol Kaybı (Path Loss)

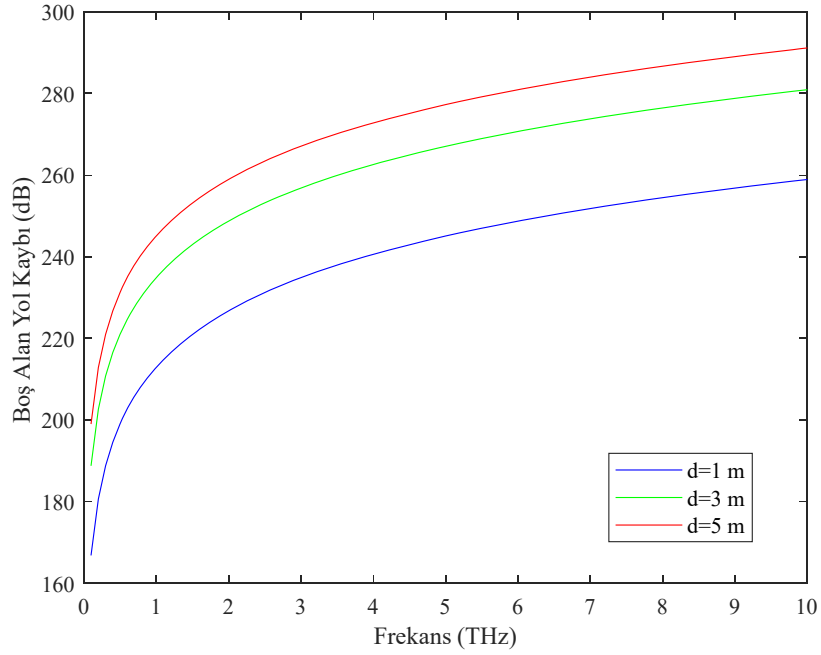
THz kanalları için boş alan yol kaybı ile iletim mesafesi arasındaki ilişki Şekil 2'de verilmektedir. Sinyal üreticilerinin sınırları nedeniyle literatürdeki araştırmaların çoğu düşük THz bandına, 300 GHz'in altındaki banda, odaklanmaktadır. Ancak ileriki çalışmalara ışık tutması amacıyla bu çalışmada HIRTRAN veri tabanının tanımlı olduğu 0,1 - 10 THz bant aralığı için simülasyon yapılmıştır. Alıcı ile verici arasındaki mesafe iç mekân olması nedeniyle 1 m, 3 m ve 5 m olarak seçilmiştir. Beklendiği üzere, frekans ve/veya alıcı verici arasındaki mesafe arttıkça boş alan yol kaybı artmaktadır. Bu da THz bandında iletim mesafesinin haberleşmeyi sınırlayan bir faktör olduğunu göstermektedir.

THz bandında sinyal gücünün zayıflamasında en büyük etki moleküler soğurmadır. Şekil 3'te 100 GHz - 450 GHz için sıcaklık, nem ve basıncın moleküler soğurma katsayısına etkisi verilmiştir. Sıcaklık ile moleküler soğurma katsayısı arasında doğru bir ilişki vardır, sıcaklık arttıkça katsayı artmaktadır. Benzer şekilde nem arttıkça moleküler soğurma katsayısı yine artmaktadır. 1 atm basınçtan düşüş moleküler soğurma katsayısının hafif artmasına sebep olmaktadır, ancak basıncın yükselmesi durumunda katsayıda hafif düşüş gözlemlenmektedir. (Basıncın değerleri ölçülen minimum ve maksimum değerlerine göre belirlenmiştir.)

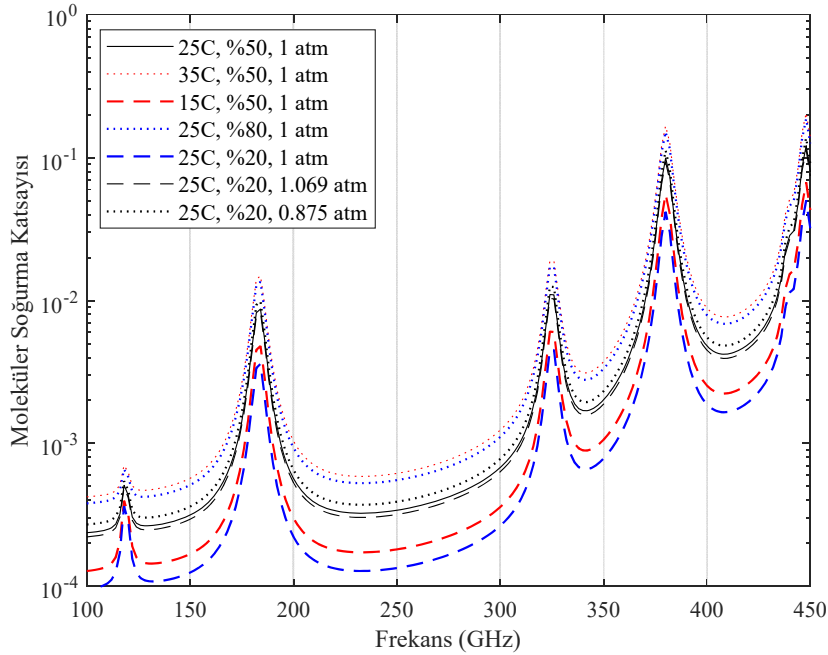
HIRTRAN veri tabanı ile 0,1 - 10 THz bandı incelendikten sonra soğurmanın daha az yaşandığı 0,1 - 1,6 THz, 6,9 - 8,5 THz ve 8,4 - 10 THz alt bantlarına ait moleküler soğurma kaybı farklı alıcı verici mesafeleri için sırasıyla Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir. Şekil 4 incelendiğinde, 1,5 THz e kadar soğurmanın çok belirgin olmadığı, sadece birkaç frekansta anlık artış yaşandığı görülmektedir. Ancak alıcı verici arasındaki mesafenin artmasıyla, moleküler soğurma ciddi boyutta artmaktadır. Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, 7 - 10 THz bandında bazı frekanslarda ciddi soğurma olmasına rağmen, 7,0 - 7,3 THz, 7,7 - 7,95 THz, 8,0 - 8,25 THz ve 8,5 - 8,65 THz, 8,7 - 9,0 THz, 9,1 - 9,65 THz aralarının iletişim için kullanılabilir alt bantlar olduğu görülmektedir. Bu frekanslarda çalışacak sistemlerin, durağan olan bu bantları tercih etmesi ve iletimin kısa mesafeli olması gerektiği açıktır.

3.2. Çokluyol Sönümlemesi (Multipath Fading)

Bu çalışmada vericinin alıcılara LoS oluşturması amacıyla yüksek bir yere sabitlendiği, alıcının ise bir masanın üzerinde veya bir kişinin elinde olduğu düşünülerek zeminden belli bir yükseklikte olduğu



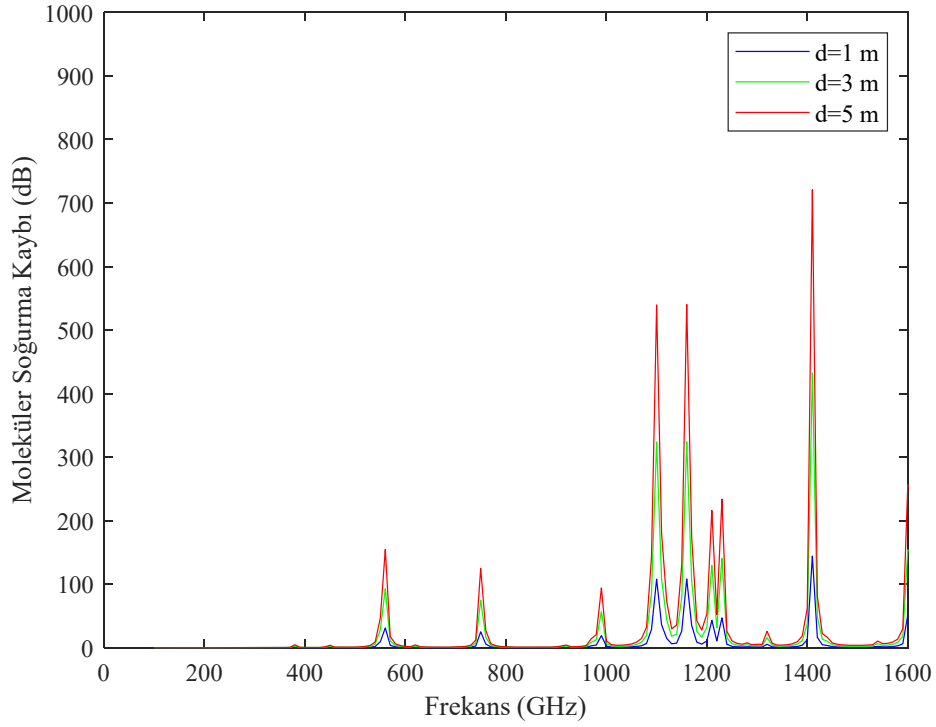
Şekil 2. Boş alan yol kaybı, 1 m, 3 m, 5 m (Free space path loss, 1 m, 3 m, 5 m)



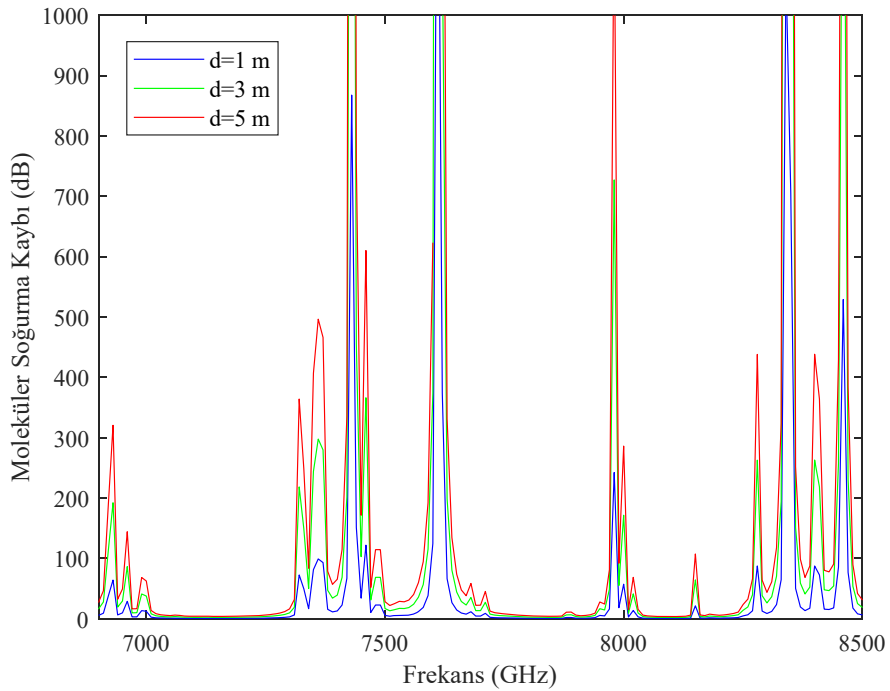
Şekil 3. Moleküler soğurma katsayısı değişimi (Molecular absorption coefficient variation)

varsayılmıştır. Alıcı ve verici antenleri çokyollu kanal yapısının oluşması amacıyla çokyönlü seçilmiş, bu nedenle alıcının her yönden gelen dalgaları aldığı varsayılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan senaryolarda saçılma ve kırılmalar ihmal edilmiş, sadece yansımalar ele alınmıştır. Bir diğer varsayım odanın boş olduğudur. Odada eşya olma durumunda yansıma sayısı artacaktır, ancak güçleri çok düşük olacaktır. Dolayısıyla bu yansımalar ihmal edilmiş, sadece duvarlardan, tavadan ve zeminden olan güçlü yansımalar ele alınmıştır.

Oda boyutunun ve alıcı verici konumlarının CIR üzerindeki etkisini gözlemlemek için, yükseklikleri 3 m olan iki farklı oda ele alınmıştır. Bu odalardan Oda-1 (3 x 3) m² boyutunda kare, Oda-2 ise (4 x 5) m² boyutunda dikdörtgen şeklindedir. Vericinin odanın köşesinde tavadan 0,20 m aşağıda veya tavanda tam ortada monte edildiği, alıcının ise zeminden 0,80 m yukarıda olduğu varsayılmıştır. Çokyollu sönümlenmesinin etkisini gözlemlemek amacıyla farklı alıcı konumlarında simülasyonlar yapılmış, ancak şekil sayısını çok artırmamak amacıyla verilen sonuçlar köşeye yakın ve odanın ortasına



Şekil 4. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm (Molecular absorption, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm)



Şekil 5. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm (Molecular absorption, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm)

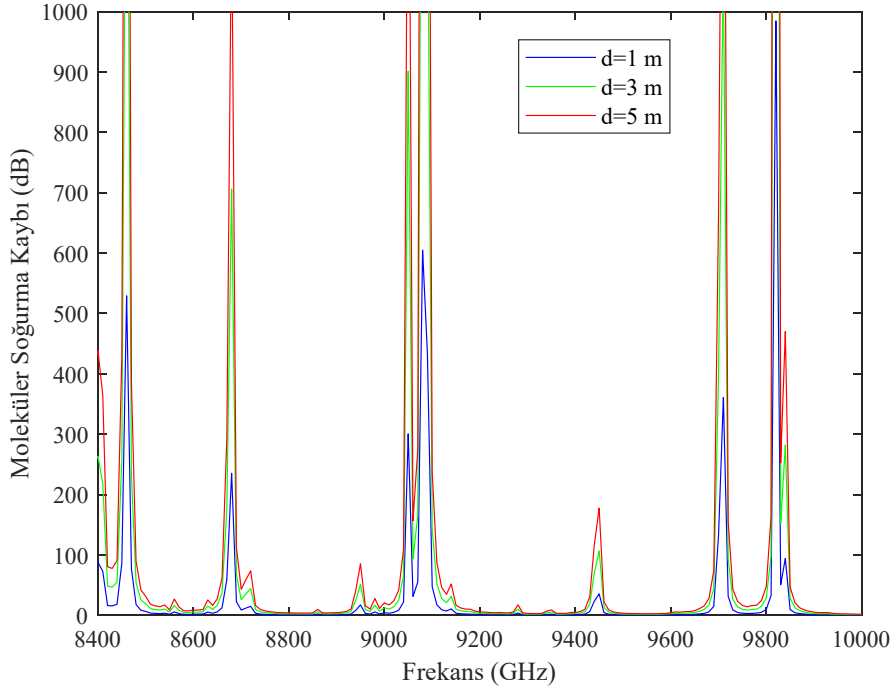
yakın olacak şekilde iki konumla sınırlandırılmıştır. Bu odalarda belirtilen alıcı konumlarında merkez frekans 300 GHz için kanalın dürtü ve frekans tepkileri incelenmiştir. 1 atm basınç, 25°C sıcaklık ile %50 nemli ortamlar ele alınmıştır. Üretilen ışın sayısı 50, yansımaya sayısı 3'tür. Yansımaya sayısını artırmak, maksimum yansımaya süresini

ve oluşan yansımaya sayısını artırsa da güçler azalacağından ihmal edilecek seviyededir. Pürüzlü yüzeylerde yansımaya katsayısı düştükçe yansımalar daha da zayıflamaktadır. Simülasyonlarda yansımalarındaki zayıflamanın etkisini görmek amacıyla her ışının 1 birim güçte olduğu varsayılmış, her iki oda için biri köşeye yakın diğeri merkeze yakın

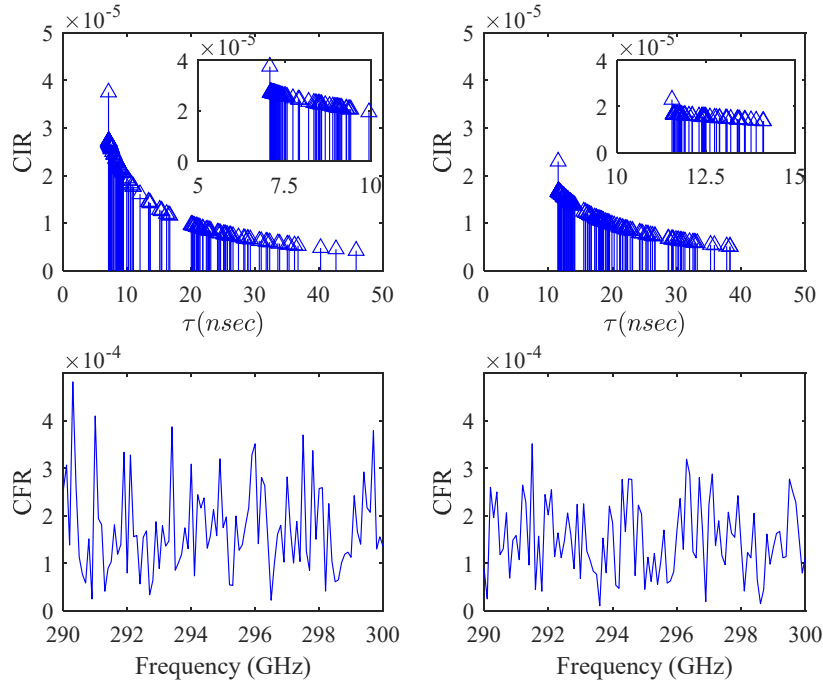
olacak şekilde iki farklı alıcı konumuna bağlı CIR ve CFR grafikleri elde edilmiştir.

Oda-1 için verici köşede konumlanmışken iki farklı alıcı konumu Rx-1 = [0,50 0,50 0,80] m ve Rx-2 = [2,00 2,00 0,80] m için CIR ve CFR grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. (CIR grafiklerini daha iyi gözlemlemek için şekillerin sağ üst köşelerinde ilk yansımalar

yakınlaştırılarak gösterilmektedir.) Yansımaların etkisini maksimum oranda görebilmek adına yansımalarda dalganın gücünün %90 yansıdığı varsayılmıştır. Alıcı Rx-1 konumunda iken verici ile arasındaki mesafe 2,12 m, alıcı Rx-2 konumunda iken ise alıcı verici mesafesi 3,46 m'dir. Beklendiği üzere, alıcı vericiden uzaklaştıkça LoS ve tüm yansımaların genlikleri belirgin şekilde düşmekte, gecikmeleri artmaktadır. THz dalgalarda mesafeyle yol kaybının ciddi



Şekil 6. Moleküler soğurma, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm (Molecular absorption, HITRAN, 25°C, %50 nem, 1 atm)



Şekil 7. Kanal dürtü ve frekans tepkileri, Oda-1, verici köşede, ışın izleme tekniği (Channel impulse and frequency responses, Room1, transmitter is at the corner, ray tracing technique)

artması bu sonucu doğurmuştur. Yansımaların LoS a yakın yoğunlaştığı ve bu nedenle yansımaların baskın olduğu görülmektedir.

Aynı oda ve alıcı konumları için verici tavanda merkezde konumlanmışken oluşan CIR ve CFR grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. Bu durumda alıcı Rx-1 konumunda iken verici ile arasındaki mesafe 2,45 m, alıcı Rx-2 konumunda iken 2,12 m’dir. Görüldüğü üzere, verici tavanda iken verici alıcı arasındaki mesafe konuma bağlı çok değişmediğinden LoS genliği çok değişmemektedir. Vericinin duvarlardan uzak olması yansımaların LoS dan daha uzak başlamasına ve yansımaların daha seyrek olmasına, kümelenme olmamasına neden olmaktadır. Her iki şekilde Oda-1 için farklı verici alıcı konumları için çalışma frekansı etrafında kanal frekans tepkisi incelendiğinde, bütün verici/alıcı konumları için oluşan kanallarda ciddi bir frekans seçicilik görünmemektedir, ancak verici tavanda olduğunda frekans seçicilik biraz hafiflemektedir.

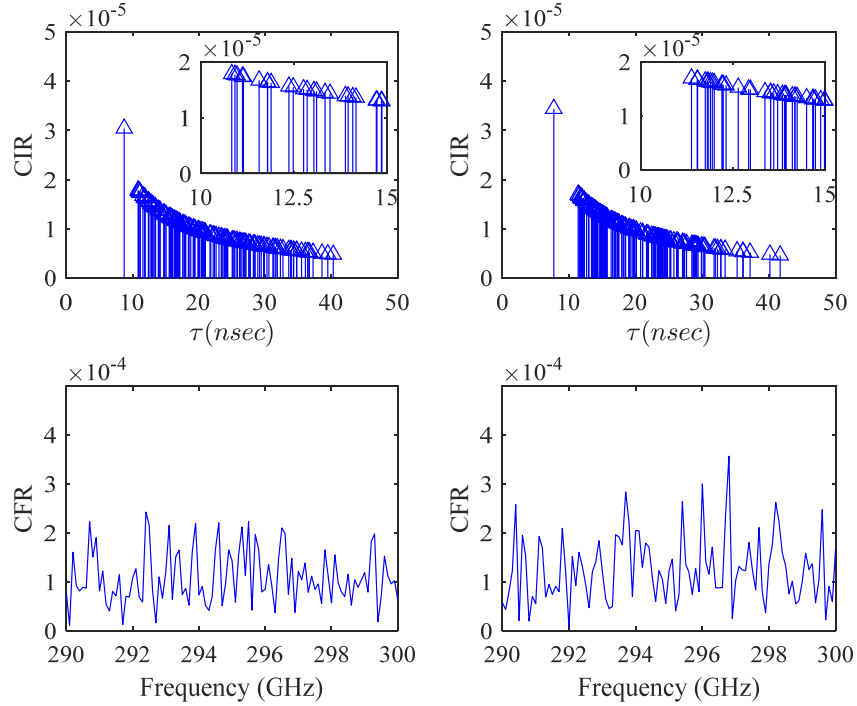
Büyük olan Oda-2 için verici köşede ve tavanda konumlanmışken iki farklı alıcı konumuna ait CIR ve CFR grafikleri sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir. Verici köşede alıcı Rx-1 konumunda iken verici ile arasındaki mesafe Oda-1 ile aynıdır. Ancak oda boyutu arttığında yansımalarda kümelenmelerin belirginleşmesi dikkat çekmektedir. Bunun nedeni yakın yüzeyler (duvar, tavan ve zemin) kaynaklı yansımaların alıcıya daha hızlı ulaşması, uzak yüzeylerin yansımaların gecikmesinin ise daha fazla olmasıdır. Verici tavana merkeze yerleştirilmişken, Rx-1 konumunda alıcı verici arasındaki mesafe 3,03 m, Rx-2 konumunda ise 2,06 m’dir. Burada dikkat çeken nokta verici tavanda iken LoS ile yansımalar arasında oluşan gecikmenin oda boyutu büyüdükçe ve alıcı merkeze dolayısıyla vericiye yaklaştıkça (duvarlardan uzaklaştıkça) artmaktadır. Bu da yansımaların uzaklaşması nedeniyle yansımaların gecikmelerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu oda boyutunda da kanallarda frekans seçicilik belirgindir, ancak yine verici tavandayken frekans seçicilik azalmaktadır. Bu nedenle özellikle mobilite

olabilecek durumlarda zayıflamayı minimize etmek amacıyla vericiyi alışageldiği üzere köşeye yerleştirmek yerine tavana merkeze konumlandırmak daha doğru olacaktır. Bu yerleşim blokaj ihtimalini de azaltacaktır.

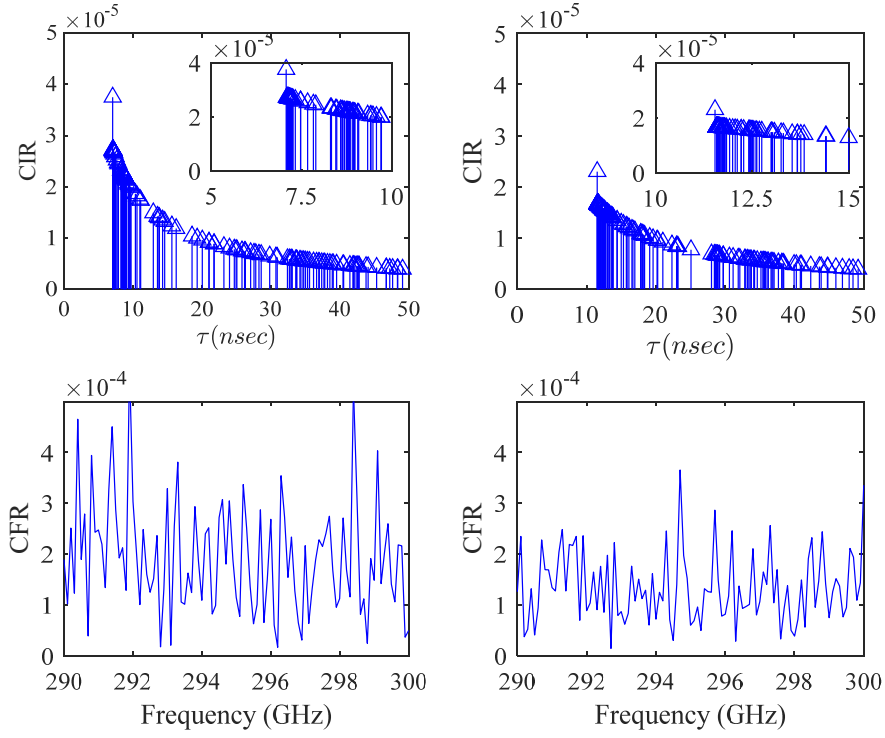
Şekillerden anlaşıldığı üzere vericinin tavana yerleştirilmesi frekans seçiciliği azaltmakla birlikte düz sönümlenmeli kanal oluşması için yeterli gelmemektedir. Yüzeylerin yansımalarını azaltmak bir çözüm olabilir. Şekil 11’de Oda-2 de verici tavanda ve alıcı Rx-2 konumunda iken zeminin yansıtmadığı durum (halı kaplı) veya tüm yüzeylerin yansımaya katsayısı 0,3 için CIR ve CFR grafikleri verilmiştir. Görüldüğü üzere tüm yüzeylerin yansımaları azaltıldığında frekans seçicilik ciddi boyutta azalmaktadır. Yansımaları daha da güçülecek şekilde yüzeylerin kaplanması kanalı düz sönümlenmeli yapacaktır.

Verilen alıcı konumları için rms gecikme yayılımı, uyumluluk bant genişliği ve Rician faktör değerleri hesaplanmış, kanalların karakteristiğini analiz etmek amacıyla, bulunan değerler Tablo 1’de verilmiştir. Beklendiği üzere alıcı ile verici arasındaki mesafenin artması rms gecikme yayılımının artmasına neden olmuştur. Rms gecikme yayılımı ile ters orantılı olan uyumluluk bant genişliği ise mesafeyle beraber azalmaktadır. Rician faktörler incelendiğinde güçlü LoS olduğu durumlarda yüksek değerler görülmektedir. Alıcı/verici mesafesi ile K_{rf} ters orantılıdır, mesafe arttıkça değer düşmektedir.

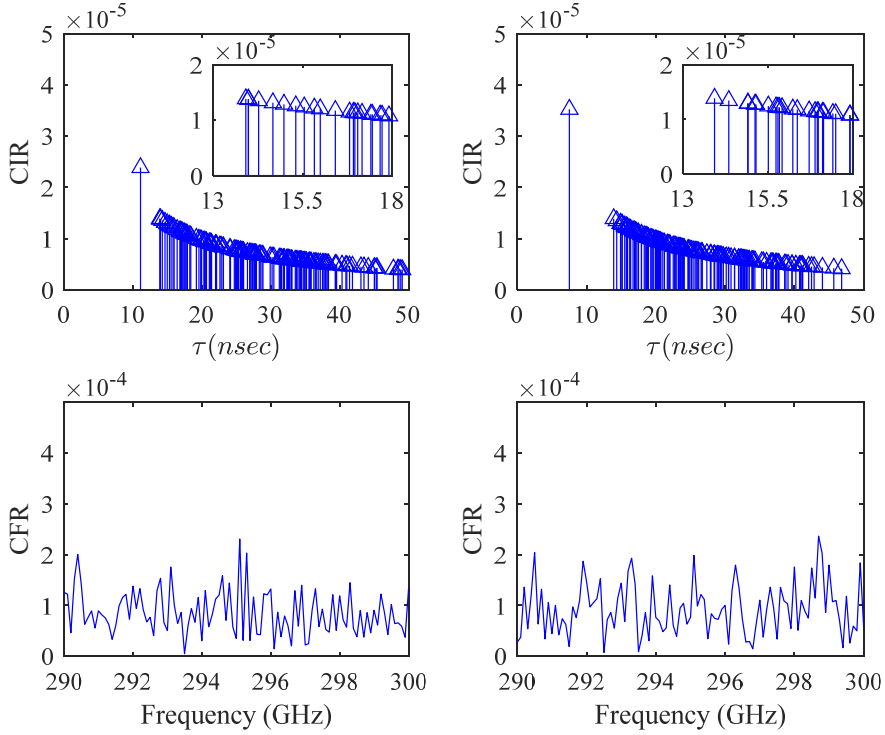
Çalışmada Oda-2 için verici tavanda iken iki farklı yansımaya katsayısı için Saleh-Valenzuela modeline dayanarak stokastik kanal modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Her iki durum için denemeler sonucunda elde edilen parametre değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Tabloda verilen parametrelerle elde edilen CIR ve CFR grafikleri Şekil 12’de verilmiştir. Ancak Şekil 12 Şekil 10 ve Şekil 11 ile kıyaslandığında CIR grafiklerinde LoS ile yansımalar arasındaki zaman farkının verilemediği görülmektedir. Ayrıca daha basit yapıda üstel dağılıma sahip bir modellemenin aynı performansı vereceği de görülmektedir.



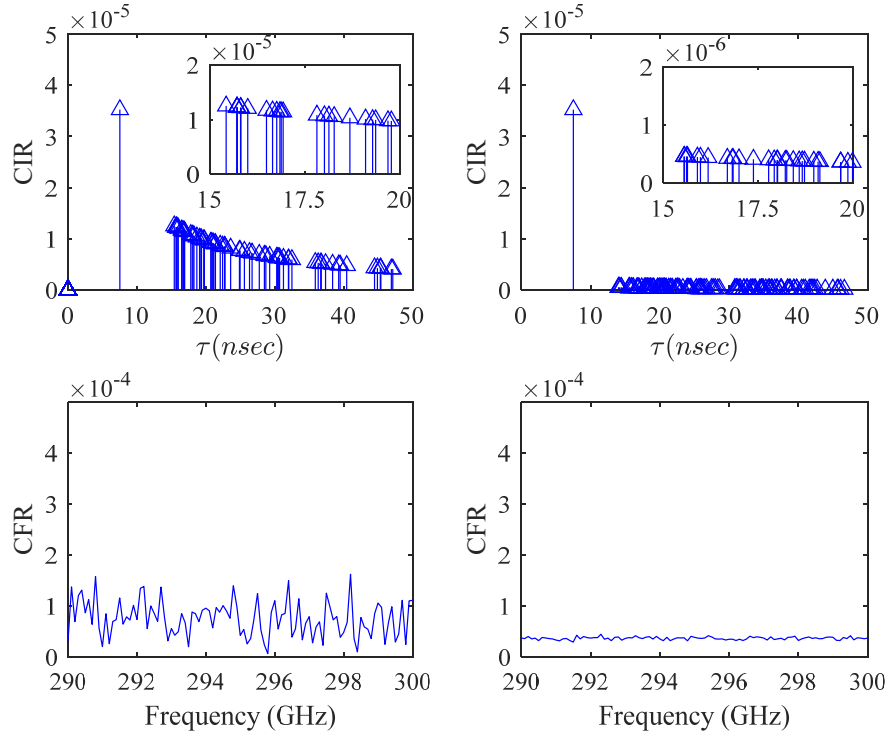
Şekil 8. Kanal dürtü ve frekans tepkileri, Oda-1, verici tavanda, ışın izleme tekniği (Channel impulse and frequency responses, Room1, transmitter is on the ceiling, ray tracing technique)



Şekil 9. Kanal dürtü ve frekans tepkileri, Oda-2, verici köşede, ışın izleme tekniği
(Channel impulse and frequency responses, Room-2, transmitter is at the corner, ray tracing technique)



Şekil 10. Kanal dürtü ve frekans tepkileri, Oda-2, verici tavanda, ışın izleme tekniği
(Channel impulse and frequency responses, Room-2, transmitter is on the ceiling, ray tracing technique)



Şekil 11. Kanal dürtü ve frekans tepkileri, Oda-2, ışın izleme tekniği
(Channel impulse and frequency responses, Room-2, ray tracing technique)

Tablo 1. Işın izleme tekniği τ_{rms} , B_c , K_{rf} değerleri (Ray tracing technique τ_{rms} , B_c , K_{rf} values)

Oda	Alıcı konumları	Verici köşede			Verici tavana		
		τ_{rms} (ns)	B_c (MHz)	K_{rf}	τ_{rms} (ns)	B_c (MHz)	K_{rf}
Oda-2 Yansım=0,9	Rx-1	144.79	1.3814	0.0361	316.34	0.6322	0.0722
	Rx-2	198.87	1.0057	0.0252	282.24	0.7086	0.1288
Oda-2 Yansım=0,3	Rx-1	29.39	6.8039	21.2602	45.98	4.3489	49.6094
	Rx-2	47.98	4.1677	15.9089	31.03	6.4449	88.3976

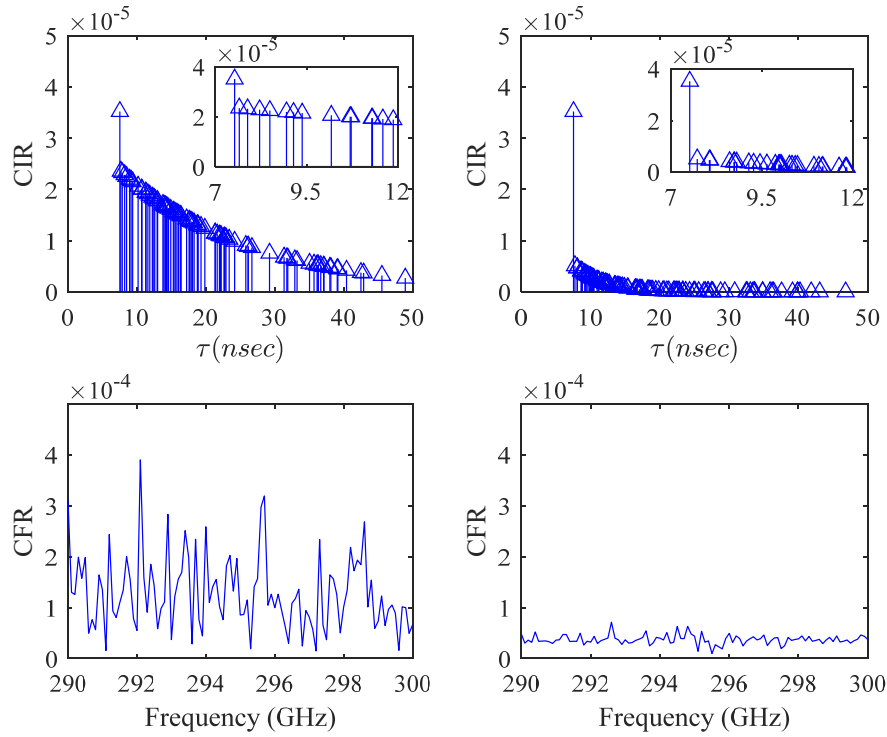
Tablo 2. Oda-2 için Saleh-Valenzuela modeli parametre tablosu (SV model parameters for Room-2)

SV model parametreleri	Yansım = 0,9	Yansım = 0,5
Küme zayıflama faktörü (CDF)	9,5 ns	2 ns
Işın zayıflama faktörü (RDF)	9,5 ns	2 ns
Küme varış oranı (CAR)	0,1 ns ⁻¹	0,1 ns ⁻¹
Işın varış oranı (RAR)	0,1 ns ⁻¹	0,1 ns ⁻¹

4. Sonuçlar (Conclusions)

Artan kablosuz haberleşme talebini karşılamayı amaçlayan THz bandı haberleşmesi yüksek frekans ve atmosfer koşullarının etkisiyle kısa iletim mesafesine sahiptir. THz bandında gönderilen sinyaldeki zayıflamanın faktörleri boş alan yol kaybı ve moleküler soğurmadır. Boş alan yol kaybı alıcı verici arasındaki mesafeye ve iletişim frekansına bağlı iken moleküler soğurma kaybı bunlara ek olarak basınç, sıcaklık ve neme de bağlı olarak değişir. Çalışmada gösterildiği üzere, özellikle 0,1 – 10 THz aralığının üst bantlarında moleküler soğurma ciddi boyutta frekans seçiciliğe neden olmaktadır.

Verimli bir haberleşme için moleküler soğurma piklerinin olmadığı durağan alt bantların iletişim pencereleri olarak tercih edilmesi gerekmektedir. İç mekân uygulamalarında çokyolluluk da iletişimi etkileyecek faktörler arasındadır. Çalışmada çokyol sönümlenmesinin etkisini gözlemlemek amacıyla Işın İzleme tekniğini kullanarak farklı senaryolarda kanal dürtü ve frekans tepkileri incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre alıcı/verici mesafesini artırdıkça LoS ve yansımaların gecikme süreleri artmıştır. Vericinin tavana monte edilmesi durumunda yansımalar ile LoS arasında zaman gecikmesinin olduğu ve yansımalarda belirgin kümelenmelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kanalların frekans tepkileri



Şekil 12. Kanal dürtü ve frekans tepkisi, Oda-2, stokastik model (Channel frequency response, Room-2, stochastic model)

incelendiğinde ise bütün senaryolarda belirgin frekans seçicilik görülmüştür, ancak verici tavana asılı olduğunda ve büyük odalarda frekans seçicilik bir miktar azalmaktadır. Ancak düz sönümlenmeli kanal için yüzeylerin yansıtıcılığının azaltılması asıl çözüm olacaktır. Çalışmada rms gecikme yayılımı, uyumluluk bant genişliği ve Rician faktör değerleri de incelenmiştir. Oda boyut ve şekillerinden bağımsız olarak alıcı/verici arasında mesafe arttıkça rms gecikme yayılımının arttığı ve buna bağlı olarak uyumluluk bant genişliğinin azaldığı görülmüştür. Mesafenin artmasıyla Rician faktör de azalmaktadır. Son olarak stokastik kanal modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Saleh-Valenzuela kanal modelleme ile iyi bir performans elde edileceği ancak kanalı üstel olarak modellemenin de yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Sistem performansı açısından, çalışmada yapılan iç mekân THz kanal analizi ışığında, önerilen kanal modellerine dayanan kanal kestirimi tekniklerinin geliştirmesi ileride yapılması gerekli çalışmalar arasındadır.

Kaynaklar (References)

1. Akyildiz I. F., Han C., Hu Z. F., Nie S. and Jornet J. M., Terahertz Band Communication: An Old Problem Revisited and Research Directions for the Next Decade, *IEEE Transactions on Communications*, 70 (6), 4250-4285, 2022.
2. Shafie A., Yang N., Han C., Jornet J. M., Juntti M. and Kuerner T., Terahertz Communications for 6G and Beyond Wireless Networks: Challenges, Key Advancements, and Opportunities, *IEEE Network Magazine*, 37 (3), 162-169, 2023.
3. Chen Z., Han C., Wu Y., Li L., Huang C., Zhang Z., Wang G., and Tong, W., Terahertz Wireless Communications for 2030 and Beyond: A Cutting-Edge Frontier, *IEEE Communications Magazine*, 59 (11), 66-72, 2021.
4. Ekşim A., Demirci T., Ultimate secrecy in millimeter wave and terahertz communications, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 36 (3), 1733-1745, 2021.
5. Han C., Gao W. J., Yang N., Jornet J. M., Molecular Absorption Effect: A Double-edged Sword of Terahertz Communications, *IEEE Wireless Communications*, 30 (4), 140-146, 2023.
6. Liu S., Yu X., Guo R., Tang Y., and Zhao Z., THz Channel Modeling: Consolidating the Road to THz Communications, *China Communications*, 18 (5), 33-49, 2021.
7. Seyyarer E., Karcı A., Ateş A., Effects of the stochastic and deterministic movements in the optimization processes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 37 (2), 949-965, 2022.
8. Han C., Wang Y., Li Y., Chen Y., Abbasi N., Kurner T., and Molisch A., Terahertz Wireless Channels: A Holistic Survey on Measurement, Modeling, and Analysis, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 24 (3), 1670-1707, 2022.
9. Wang Y. Q., Sun S., and Han C., Far- and Near-Field Channel Measurements and Characterization in the Terahertz Band Using a Virtual Antenna Array, *IEEE Communications Letters*, 28 (5), 1186-1190, 2024.
10. Li Y., Han C., Chen Y., Yu Z., and Yin X., DSS-o-SAGE: Direction-Scan Sounding-Oriented SAGE Algorithm for Channel Parameter Estimation in mmWave and THz Bands, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Early Access, 2024.
11. Chen Y. H., Li R., Han C., Sun S., and Tao M., Hybrid Spherical- and Planar-Wave Channel Modeling and Estimation for Terahertz Integrated UM-MIMO and IRS Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22 (12), 9746-9761, 2023.
12. Li Y. B., Wang Y. Q., Chen Y., Yu Z., and Han C., Channel Measurement and Coverage Analysis for NIRS-Aided THz Communications in Indoor Environments, *IEEE Communications Letters*, 27 (9), 2486-2490, 2023.
13. Salhi M. A., Kleine-Ostmann T., and Schrader T., Propagation Channel Measurements in the MM- and Sub-MM Wave Range for Different Indoor Communication Scenarios, *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 42 (4), 357-370, 2021.
14. Gougeon G., Corre Y., and Aslam M. Z., Ray-Based Deterministic Channel Modelling for Sub-THz Band, *IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-6, 2019.
15. Tarboush S., Sarrideen H., Chen H., Loukil M. H., Jemaa H., Alouini M. S., and Al-Naffouri T. Y., TeraMIMO: A Channel Simulator for Wideband Ultra-Massive MIMO Terahertz Communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70 (12), 12325-12341, 2021.

16. Chen Y., Li Y., Han C., Yu Z., and Wang G., Channel Measurement and Ray-Tracing-Statistical Hybrid Modeling for Low-Terahertz Indoor Communications, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20 (12), 8163-8176, 2021.
17. Li Y. B., Chen Y., Yan D., Guan K., and Han C., Channel Characterization and Ray-tracing Assisted Stochastic Modeling for Urban Vehicle-to-Infrastructure Terahertz Communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72 (3), 2748-2763, 2023.
18. Sheikh F., Alissa M., Zahid A., Abbasi Q. H., and Kaiser T., Atmospheric Attenuation Analysis in Indoor THz Communication Channels, *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2137-2138, 2019.
19. Xing Y., Kanhere O., Ju S., and Rappaport T. S., Indoor Wireless Channel Properties at Millimeter Wave and Sub-Terahertz Frequencies. *IEEE Global Communications Conference*, 1-6, 2019.
20. Shah S., Ashraf M., Saeed N., Jan T., Khalil R., Babar M. I., Ahmad G., and Shah S. W., Path Loss Model for Future Terahertz (THz) Wireless Communication Systems, *Proceedings of the Pakistan Academy of Science: A Physical and Computational Sciences*, 56 (2), 55-65, 2019.
21. Sheikh F., Lessy D., and Kaiser T., A Novel Ray-Tracing Algorithm for Non-Specular Diffuse Scattered Rays at Terahertz Frequencies, *First International Workshop on Mobile Terahertz Systems*, 1-6, 2018.
22. Sheikh F., Zantah Y., Mabrouk I. B., Alissa M., Barowski J., Rolfes I., and Kaiser T., Scattering and Roughness Analysis of Indoor Materials at Frequencies From 750 GHz to 1.1 THz, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69 (11), 7820-7829, 2021.
23. Chen Y., Han C., Yu Z., and Wang G., Channel Measurement, Characterization and Modeling for Terahertz Indoor Communications Above 200 GHz, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Early Access, 2023.
24. Papatotiriou E. N., Boulogeorgos A. A. A., Haneda K., de Guzman M. F., and Alexiou A., An Experimentally Validated Fading Model for THz Wireless Systems, *Scientific Reports*, 11 (1), 1-14, 2021.
25. Yacoub M. D., The α - μ Distribution: A Physical Fading Model for the Stacy Distribution. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56 (1), 27-34, 2007.
26. Papatotiriou E. N., Boulogeorgos A. A. A., and Alexiou A., Fading Modeling in Indoor THz Wireless Systems, *IEEE International Balkan Conference on Communications and Networking*, 161-165, 2021.
27. Boulogeorgos A. A. A., Papatotiriou E. N., and Alexiou A., Analytical Performance Evaluation of THz Wireless Fiber Extenders, *IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1-6, 2019.
28. Wu Y., Kokkonieni J., Han C., and Juntti M., Interference and Coverage Analysis for Terahertz Networks with Indoor Blockage Effects and Line-of-Sight Access Point Association, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20 (3), 1472-1486, 2020.
29. Aghoutane B., El Ghzaoui M., and El Faylali H., Spatial Characterization of Propagation Channels for Terahertz Band, *SN Applied Sciences*, 3 (2), 1-8, 2021.
30. Ju S., Xing Y., Kanhere O., and Rappaport T. S., Millimeter Wave and Sub-Terahertz Spatial Statistical Channel Model for an Indoor Office Building, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39 (6), 1561-1575, 2021.
31. Xing Y., Rappaport T. S., and Ghosh A., Millimeter Wave and Sub-THz Indoor Radio Propagation Channel Measurements, Models, and Comparisons in an Office Environment, *IEEE Communications Letters*, 25 (10), 3151-3155, 2021.
32. Cheng C. L., Sangodoyin S., and Zajić A., THz Cluster-Based Modeling and Propagation Characterization in a Data Center Environment, *IEEE Access*, 8, 56544-56558, 2020.
33. Kouzayha N., Kishk M. A., Sareddeen H., Al-Naffouri T. Y., and Alouini M. S., Coverage and Rate Analysis in Coexisting Terahertz and RF Finite Wireless Networks, *Cornell University arXiv: 2109.00646*, 1-30, 2021.
34. Yuanbo L., Yiqin W., Yi C., Ziming Y., and Chong H., Channel Measurement and Characterization with Modified SAGE Algorithm in an Indoor Corridor at 300 GHz, *Cornell University arXiv: 2203.16745*, 1-12, 2022.
35. Jeyakumar P., Ramesh A., Srinitha S., Vishnu V., and Muthuchidambaramanathan P., Wideband Hybrid Precoding Techniques for THz Massive MIMO in 6G Indoor Network Deployment, *Telecommunication Systems*, 79 (1), 71-82, 2022.
36. Ghasempour Y., Amarasinghe Y., Yeh C. Y., Knightly E., and Mittleman D. M., Line-of-Sight and Non-Line-of-Sight Links For Dispersive Terahertz Wireless Networks, *APL Photonics*, 6 (4), 041304, 2021.
37. Boulogeorgos A. A. A., Papatotiriou E. N., and Alexiou A., Analytical Performance Assessment of THz Wireless Systems, *IEEE Access*, 7, 11436-11453, 2019.
38. Tang P., Zhang J., Tian H., Chang Z., Men J., Zhang Y., Tian L., Xia L., Wang Q., and He J., Channel Measurement and Path Loss Modeling From 220 GHz to 330 GHz for 6G Wireless Communications, *China Communications*, 18 (5), 19-32, 2021.
39. Akkaş M. A., Terahertz Teknolojisi Uygulamaları ve Terahertz Dalgalarının Kablosuz Haberleşme için Elektromanyetik Modellemesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 190-200, 2018.
40. Kokkonieni J., Lehtomäki J., and Juntti M., A Line-of-sight Channel Model for the 100–450 Gigahertz Frequency Band, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1, 1-15, 2021.
41. Maccartney G. R., Rappaport T. S., Sun S., and Deng S., Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks, *IEEE Access*, 3, 2388-2424, 2015.
42. Lopez-Hernandez F.J., Perez-Jimenez R. and Santamaria A., Modified Monte Carlo Scheme for High-Efficiency Simulation of The Impulse Response on Diffuse IR Wireless Indoor Channels, *Electronics Letters*, 34 (19), 1819–1820, 1998.
43. Chowdhury M.I.S., Zhang W., and Kavehrad M., Combined Deterministic and Modified Monte Carlo Method for Calculating Impulse Responses of Indoor Optical Wireless Channels, *Journal of Lightwave Technology*, 32 (18), 3132-3148, 2014.
44. Chvojka P., Zvanovec S., Haigh P.A., and Ghassemlooy Z., Channel Characteristics of Visible Light Communications Within Dynamic Indoor Environment, *Journal of Lightwave Technology*, 33 (9), 1719-1725, 2015.
45. Çürük S.M., Alignment of Transmitters in Indoor Visible Light Communication for Flat Channel Characteristics, *ETRI Journal*, 44 (1), 125-134, 2022.

