

Yüksek hızlı terahertz kablosuz haberleşme için iletim pencereleri ve link hesabı

Transmission windows and link budget for high speed terahertz wireless communication

Ayhan Yazgan^{1,*} , Emin Tuğcu² , Cenk Albayrak² , Kadir Türk¹ 

¹ Karadeniz Technical University, Electrical-Electronics Engineering Department, 61080 Trabzon, Turkey

² Karadeniz Technical University, Electronics and Communication Engineering Department, 61830 Trabzon, Turkey

Özet

Bu çalışmada, gelecek nesil terahertz kablosuz haberleşme sistemleri için uygun frekans bantları incelenmiş ve farklı atmosferik koşullar altında bu frekans bantları için link hesapları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada atmosferik koşulların değişiminden haberleşme sisteminin nasıl etkilendiği hususu dikkate alınarak makul zayıflama değerlerinde iletişim yapılabilecek 7 iletim penceresi (frekans bandı) olduğu gözlemlenmiştir. Bu iletim pencereleri içerisinde özellikle iç mekan ve dış mekan haberleşmesi için hangilerinin daha uygun olduğu konusu irdelenmiş ve Friis iletim denklemi kullanılarak link hesaplamaları ve gerekli doğrulamalar yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Atmosferik zayıflama, Link hesabı, Terahertz kablosuz haberleşme

Abstract

In this study, appropriate frequency bands are investigated for next generation terahertz wireless communication systems and the link budget calculations are conducted under different atmospheric conditions. Considering how the communication system is affected by the changes in atmospheric conditions in the study, it has been observed that there are 7 transmission windows (frequency bands) in which communication can be maintained at reasonable attenuation values. In these transmission windows, it is also investigated that which of them are appropriate for indoor and outdoor wireless communication and the necessary link calculations have been conducted and proved by using Friis transmission equation.

Keywords: Atmospheric attenuation, Link budget, Terahertz wireless communication

1 Giriş

Günümüzde özellikle kişisel mobil haberleşme cihazlarının yaygınlaşması ve işlevlerinin çeşitlenmesi ile kablosuz sistemler üzerinden talep edilen veri miktarı ve hızı katlanarak artmaktadır. Kablosuz haberleşme sistemleri, uydu haberleşmesi hariç, yoğunlukla 6 GHz altında sıkışık bir duruma gelen spektrumu paylaşmak durumundadır [1]. Bunun nedeni elektromanyetik yayılım açısından düşük frekans kullanmanın getirdiği avantajlardan dolayı lisanslı bantların bu bölgelere yoğunlaşmasıdır. Her ne kadar sistemlerin bant verimlilikleri teorik sınırlara yaklaşırsa da 100Gb/s ve üzeri bir hedef ya da genel itibarıyla yüksek hızlı haberleşme için yüksek frekans bölgesinde geniş spektrum bölgelerine ihtiyaç olduğu açıktır. Bu nedenle, elektromanyetik spektrumun milimetrik dalga ile kızılötesi dalga arasında bulunan terahertz bölgesi, sağladığı yüksek bant genişliği nedeniyle son zamanlarda haberleşme çalışan araştırmacıların dikkatini çekmektedir [1-3]. Terahertz frekans bölgesi, yıllardır astronomide gök cisimlerinin incelenmesi, fizik, kimya ve biyoloji alanında, spektroskopi çalışmalarında, güvenlik alanında ve görüntüleme sistemlerinde kullanılmaktadır [4]. Terahertz konusunda bir standart olmamasından da dolayı literatürde farklı tanımlamalar bulunmakla birlikte [5-8] en genel haliyle terahertz bandı, elektromanyetik spektrumun 0.275 THz ile 30 THz arasındaki bölgeyi kapsamaktadır. Terahertz bölgesi haberleşme amacı için kullanıldığında ise genellikle 1 THz altındaki zayıflamanın daha düşük olduğu bantlar tercih edilmektedir. Her haberleşme sisteminde olduğu gibi terahertz

haberleşmede de verici, alıcı, anten, kanal ve algoritma kritik bileşenlerdir. Bu bileşenler arasında terahertz haberleşme için sinyal üretimi UHF ya da mikrodalga bölgesindeki duruma göre çok daha karmaşık ve verimsizdir. Bu problemi çözmek ve yüksek hızlara ulaşabilmek için sinyal üretimi ve algılanması konusunda günümüzde pek çok yöntem geliştirilmeye devam etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde; gyrotron [9, 10] gibi yüksek güç gerektiren yapıların yanında rezonans tünel diyotlar (RTD) [11-13], farklı tür eklemlili çift kutup transistörler (HBT) [14], quantum kaskat lazerler (QCL) [15, 16], optik fotoiletken malzemeler (OPM) [17-19], bütünleyici metal oksit yarı iletken devreler (CMOS) [20, 21], yüksek elektron hızlı transistörler (HEMT) [22] ve impatt diyotlar [23] da kullanılmaktadır. Tüm bu sistemlerin verimleri oldukça düşüktür ve yüksek verimli sistemler için çalışmalar devam etmektedir. Diğer taraftan terahertz haberleşme sistemleri için kanal ölçümleri [1] ve anten tasarımları [18,19] yapılmakta ve standart oluşumuna katkı sağlayabilecek çalışmalar yürütülmektedir. Literatürde terahertz kablosuz haberleşme için link bütçeleme düşük bant için gerçekleştirilmekte ve yüksek hızlı haberleşme olanakları tartışılmaktadır [24]. Ayrıca 100 GHz, 350 GHz, 500 GHz ve 700 GHz için simülasyonlar yapılmış ve olası haberleşme performansları değerlendirilmiştir [25].

Bu çalışmadaki temel motivasyon terahertz bölgesindeki atmosferik sinyal zayıflamalarının oluşturduğu problemi minimize etmek için kablosuz terahertz haberleşme linki için en uygun frekansların belirlenmesi ve yüksek kazançlı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ayhanyazgan@ktu.edu.tr (A. Yazgan)

Geliş / Received: 10.03.2020 Kabul / Accepted: 06.10.2020 Yayınlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.699397

antenler ile bu problemin kısmen çözülebilir olduğunun gösterilmesidir. Çalışmada, literatürde yapılan çalışmalara ek olarak iç ve dış mekan haberleşmesi için kullanılacak en uygun frekans bantları ve belirlenen verici güç değerleri için bu bantlarda alıcıda elde edilebilecek güç değerleri belirlenmiştir.

2 Yöntem

Çalışma iki açıdan ele alınmıştır. Birinci kısımda ITU (International Telecommunication Union) verileri kullanılarak farklı atmosferik koşullar için elde edilen genel atmosferik zayıflama grafiği terahertz haberleşme bölgesi için elde edilmiştir. Zayıflamanın tepe noktaya ulaştığı 10 farklı frekans belirlenmiştir. Ancak bunlardan 2 tanesinin değişimi diğerlerine göre daha düşük olduğundan 8 farklı tepe frekans ve buna bağlı olarak da 7 farklı iletim penceresi olduğu değerlendirilmiştir. Daha sonra atmosferik zayıflamanın 0.15 dB ve 0.2 dB olduğu muhtemel örnek durumlar için 0.275 THz ile 1 THz aralığındaki iletim pencerelerinin bant genişlikleri hesaplanmış ve tablo halinde sunulmuştur. Atmosferik zayıflamanın en fazla olduğu THz frekanslarında sinyal zayıflaması bant durduran bir filtre karakteristiğine de benzetilebilir.

İkinci kısımda ise farklı atmosferik şartlarda alıcıda alınan sinyal gücünün hesabı farklı frekanslar için Friis iletim denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Genellikle mikrodalga haberleşme linklerinde alıcıdaki güç hesabı için Friis iletim denklemi kullanılmaktadır. Terahertz frekanslarda ise ek olarak atmosferik kayıplar da dikkate alınmalıdır. Bu durum Friis iletim denklemindeki kayıplar kısmına uyarlanmış ve sonuçlar buna göre hesaplanmıştır. Ayrıca sınırlı güçlerdeki ve düşük verimlilikteki terahertz sinyal üreticilerinin olumsuz etkilerini gidermekte anten seçiminin önemine vurgu yapılmış ve değişik anten kazançları için link hesabı gerçekleştirilmiştir. Belirtmek gerekir ki link hesabında, yüksek veri hızlarına ulaşmak için sinyal gücünün yanında gürültü gücünün de dikkate alınması gerekmektedir. Ancak bu çalışmada sadece alıcıdaki sinyal gücünün değişimi incelenmiştir. Çalışmada ek olarak farklı atmosferik koşullar ve sağlanan bant genişliği parametreleri dikkate alınarak hangi terahertz bandının iç mekan ya da dış mekan haberleşme için daha iyi bir çözüm olabileceği konusu da değerlendirilmiştir.

Friis iletim denklemine göre alıcıda alınan güç nümerik ve dBm cinsinden sırasıyla Denklem (1) ve (2) ile hesaplanabilir. Alıcıdaki işaret gürültü oranı (SNR) ise Denklem (3) ile hesaplanabilir. Burada P_t ve P_r sırasıyla verici ve alıcıdaki güçleri, λ dalga boyunu, G_t ve G_r sırasıyla θ ve φ açılarına göre verici ve alıcı anten kazançlarını, Γ_t ve Γ_r sırasıyla verici ve alıcı anten yansıma katsayılarını, ρ_t ve ρ_r sırasıyla verici ve alıcı polarizasyon uyumsuzluklarını ifade etmektedir. Grafiklerde dB/m cinsinden verilen atmosferik zayıflama sabiti α , denklemler için Np/m birimine dönüştürülmüştür. NF gürültü faktörünü, k Boltzman sabitini, T Kelvin cinsinden sıcaklığı ve B ise Bant genişliğini ifade etmektedir. Ayrıca η_{LT} ve η_{LR} sırasıyla verici ve alıcı anten verimlerini, R ise verici ve alıcı anten arasındaki mesafeyi göstermektedir.

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) (1 - |\Gamma_t|^2) (1 - |\Gamma_r|^2) (\rho_t \rho_r)^2 (e^{-2\alpha R}) (\eta_{LT} \eta_{LR}) \quad (1)$$

$$P_r [dBm] = 10 \log \left(\frac{P_r [mW]}{1mW} \right) \quad (2)$$

$$SNR [dB] = P_r [dBm] - (10 \log(kTB) + NF) \quad (3)$$

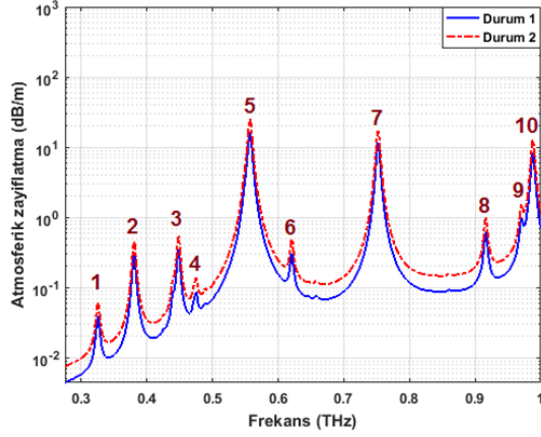
Yüksek frekanslarda yol kaybının artması terahertz haberleşme için bir dezavantaj olarak görülse de yüksek kazançlı antenlerin kullanılma potansiyeli nedeniyle bu durum kısmen elimine edilebilmektedir. Ayrıca sonraki kısımlarda da açıklanacağı gibi terahertz haberleşmenin sağladığı bant genişliği düşük frekanslı haberleşme sistemlerine göre çok daha fazladır.

3 Bulgular ve tartışma

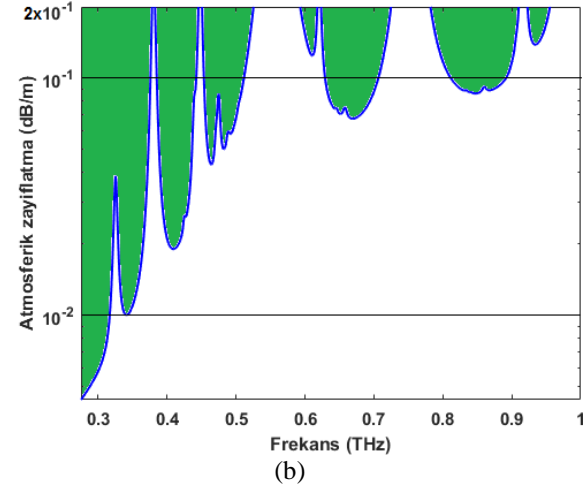
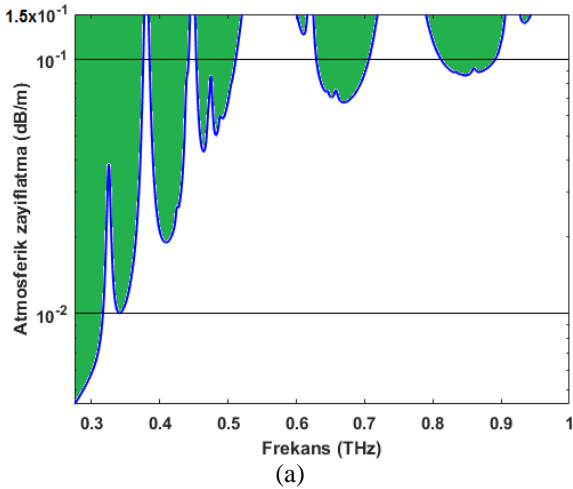
Atmosfer, barındırdığı gazlar nedeniyle elektromanyetik dalgaların absorbe edilmesine neden olmaktadır. Bu durum sadece terahertz bandında değil, spektrumun farklı bölgelerinde de geçerlidir. Ayrıca, genel olarak frekans yükseldikçe zayıflama etkisi de artmaktadır. Ancak bunun yanında bazı istisnalar da görülmektedir. 200 GHz altı için örnek olarak 60 GHz ve 180 GHz frekans bölgesinde atmosferik zayıflamanın en yüksek değerlere ulaştığı bilinmektedir [26]. Özellikle dış mekan haberleşmesinde bu etki daha da önemli hale gelmektedir. 200 GHz ve üzerindeki frekans bölgelerinde ise atmosferik zayıflama daha fazla etkili olsa da haberleşme sistemlerinin iletim hızı açısından çok önemli bir parametre olan bant genişliği artmaktadır. ITU verileri dikkate alınarak elde edilen atmosferik zayıflama grafiği 1 THz ve altı için Şekil 1'de çizdirilmiştir. Daha yüksek frekanslarda zayıflama etkisinin artmasının yanında zayıflama dalgalanması da artış göstermekte ve bu durum bandın kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca 1 THz ve üzerindeki frekans bölgesinde atmosferik zayıflamanın 30 THz bölgesine kadar artış eğiliminde olduğu da bilinmektedir [26]. Bu nedenlerden dolayı 1 THz değerine kadar olan kısımların kablosuz haberleşme için daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Tablo 1 ile verilen iki farklı atmosferik durum için atmosferik zayıflamanın değişimi ve zayıflamanın maksimum olduğu 10 frekans Şekil 1 ile verilmiştir. Bu frekanslar değer olarak Tablo 2'de de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi zayıflama değerinin ortamın nem ve sıcaklık gibi parametrelere göre değişiklik gösterdiği gözlenmiştir. Link hesabı ve yapılan benzetim çalışmalarında Durum 1 ile verilen değerler dikkate alınmıştır. Ayrıca olası haberleşme frekans aralıkları da maksimum zayıflama (α_{max}) değerleri $\alpha_{max} = 0.15$ dB/m ve $\alpha_{max} = 0.2$ dB/m için Şekil 2'de ve Tablo 3'te verilmiştir. Terahertz haberleşme için literatürde de yer alan en düşük 0.275 THz bandı alt limit olarak alınmıştır. α_{max} limiti daha da azaltılırsa Bant 4 ve Bant 7 yüksek zayıflama değerleri nedeniyle kullanılamamaktadır.

Tablo 1. Atmosferik koşullar için benzetimde kullanılan iki farklı durum

| Parametreler | Durum1 | Durum 2 |
|---------------------------------------|--------|---------|
| Sıcaklık (C) | 15 | 20 |
| Atmosfer nemlilik (g/m ³) | 7.5 | 12 |
| Atmosfer basıncı (mmHg) | 760 | 760 |



Şekil 1. Frekansa göre atmosferik zayıflamanın değişimi [26].



Şekil 2. Atmosferik zayıflama değerine göre bant genişliğinin değişimi; $\alpha_{\max}=0.15$ dB (a), $\alpha_{\max}=0.2$ dB (b)

Şekil 2-a incelendiğinde yeşil boyalı bölgeler atmosferik zayıflamanın 0.15 dB/m'den az olduğu frekansları göstermektedir. Bu bölgeler terahertz haberleşme için iletim pencereleri olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2-b incelendiğinde ise yeşil boyalı bölgeler atmosferik zayıflamanın 0.2 dB/m'den az olduğu frekansları göstermektedir.

Denklem (1) ile verilen Friis iletim denkleminin farklı koşullar için MATLAB ortamında benzetimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 2, 3 ve 4 ile verilmiştir. Terahertz bandında atmosferik zayıflama etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için verilen sonuçlarda atmosferik etkinin olduğu ve olmadığı durumlarda, alıcıda elde edilen güç değerleri karşılaştırmalı olarak farklı haberleşme sistem parametreleri için verilmiştir. Şekil 3' de verici ve alıcı antenlerin 0 dBi kazançları olduğu varsayılmış ve 100 m link mesafesi için alıcıdaki güç değerleri elde edilmiştir. Verici gücü 20 dBm (0.1 W) alındığı durumda, atmosferik etkinin Bant 1 için bu mesafede çok az etkili olduğu görülmektedir. Alıcıdaki güçler, belirlenen bantlar içerisinde minimum zayıflamaya sahip frekanslara göre hesaplanmış ve çizdirilmiştir. Örnek olarak Bant 1 merkez frekansı 0.33 THz olmasına rağmen 0.275 THz'de daha düşük zayıflama görüldüğünden link hesabında Bant 1 için 0.275 THz için atmosferik zayıflama değeri hesaba katılmıştır. Alıcıdaki güç değerlerinin atmosferik etki olduğunda ve olmadığı durumda yaklaşık 7.53×10^{-5} nW civarında ve dBm cinsinden de -101.23 dBm olduğu görülmektedir. Bu güç değeri Denklem (2) kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$P_r[\text{dBm}] = 10 \log \left(\frac{P_r[\text{mW}]}{1 \text{mW}} \right) = 10 \log \left(\frac{7.53 \times 10^{-11}}{1} \right) = -101.23 \text{ dBm}$$

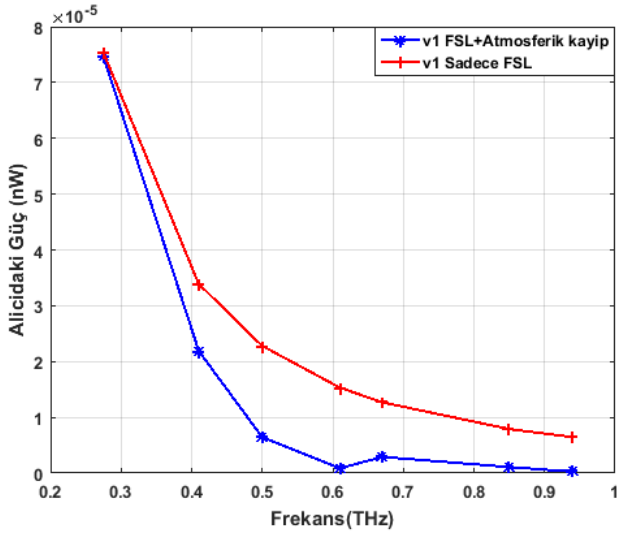
Bant 2 için atmosferik etki varlığında 2.19×10^{-5} nW (-106.59 dBm) güç alıcıya ulaşırken atmosferik etki olmadığında bu güç 3.39×10^{-5} nW (-104.69 dBm) olarak gözlenmiştir. Bant 3 ile Bant 7 arasında atmosferik etki daha da belirgin hale gelmektedir. Bant 4 için atmosferik etkinin olduğu durumda Bant 5 ve Bant 6'ya göre alıcıda daha az güç alındığı görülmektedir. Bunun nedeni o frekans için atmosferin daha fazla zayıflama etkisinin olmasıdır. Bu durum ve diğer bantların zayıflama değerleri Tablo 4 ile de kolayca gözlenebilir. Burada FSL, serbest uzay kaybını ifade etmektedir.

Tablo 2. Zayıflamanın tepe yaptığı frekanslar

| Zayıflama tepe frekansları | |
|----------------------------|----------------------|
| Frekans 1: 0.32 THz | Frekans 6: 0.62 THz |
| Frekans 2: 0.38 THz | Frekans 7: 0.75 THz |
| Frekans 3: 0.45 THz | Frekans 8: 0.92 THz |
| Frekans 4: 0.47 THz | Frekans 9: 0.97 THz |
| Frekans 5: 0.56 THz | Frekans 10: 0.99 THz |

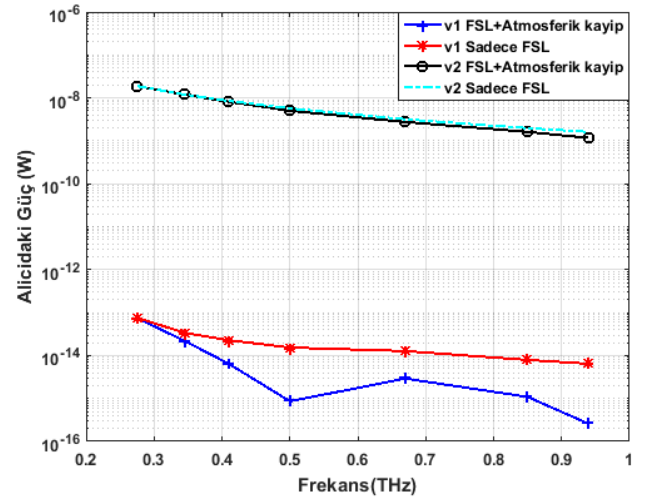
Tablo 3. Durum 1 için farklı zayıflama değerlerinde iletim bant genişliklerinin (B) değişimi

| İletim pencereleri merkez frekansları | $\alpha_{\max}=0.15$ dB/m bant genişliği | $\alpha_{\max}=0.2$ dB/m bant genişliği |
|---------------------------------------|--|---|
| Bant 1= (0.27+0.38) /2≈0.33 THz | B=377-275=102 GHz | B=378-275=103 GHz |
| Bant 2= (0.38+0.45) /2≈0.42 THz | B=444-384=60 GHz | B=445-383=62 GHz |
| Bant 3= (0.45+0.52) /2≈0.49 THz | B=520-452=68 GHz | B=525-452=73 GHz |
| Bant 4= (0.60+0.62) /2≈0.61 THz | B=615-601=14 GHz | B=618-594=24 GHz |
| Bant 5= (0.62+0.72) /2≈0.67 THz | B=718-625=93 GHz | B=724-623=101 GHz |
| Bant 6= (0.79+ 0.90) /2≈0.85 THz | B=906-790=116 GHz | B=910-783=127 GHz |
| Bant 7= (0.93+0.94) /2≈0.94 THz | B=943-928=15 GHz | B=955-923=32 GHz |



Şekil 3. v1; $P_t=0.1W$, $R=100m$ ve $G_t=G_f=0dB$ için alıcısındaki güç değişimi.

Genel olarak değerlendirildiğinde atmosferik etkiden dolayı alıcıya ulaşan güç değerleri arasındaki fark yüksek frekanslara çıkıldıkça artmaktadır. Örneğin Bant 7 için güç farkının Şekil 2’de verilen sonuçlardan 14 dB’ye ulaştığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre atmosfer koşullarının haberleşme için uygun olan nem değerlerinde bile 14 dB fark oluşturması, olası daha nemli ve farklı sıcaklık değerlerinde bu farkın daha da artacağına işaret etmektedir. Yapılacak olan haberleşme link hesabındaki bantların iç ve dış mekan için ayrı ayrı değerlendirilmesi bu yönden önem kazanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında 100 m link mesafesi için izotropik antenler ile Bant 1 ve Bant 2’nin dış mekan haberleşmesi için diğer bantlara göre daha uygun olduğu görülmektedir. Terahertz bandındaki sınırlı verici gücü ve düşük verimlilik dikkate alındığında daha iyi link bütçelemesi için uygun link mesafesinin optimize edilmesi ve yönlü (yüksek kazançlı) antenlerin kullanımını kaçınılmaz bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu veriler ışığında link bütçelemesi, farklı link mesafeleri ve farklı kazançlı antenler için yeniden gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Şekil 4 ile verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere terahertz haberleşme gibi verici tarafta yüksek güç ve



Şekil 4. v1; $P_t=0.1W$, $R=100m$ ve $G_t=G_f=0dB$, v2; $P_t=0.1W$, $R=10m$ ve $G_t=G_f=17$ dB için alıcısındaki güç değişimi.

verimlilik problemleri [15,16] bulunan sistemlerde, anten kazancının [24] ve güç verimliliğinin önemi artmaktadır [17].

Bu şartlarda ve kısa mesafede Bant 1 kullanıldığında atmosferik etkiler minimuma indirgenebilmektedir. Bant 1, yaklaşık 100 GHz bant genişliği ile günümüzde kullanılan kablosuz haberleşme hızlarına ve mesafelerine göre yine de yüksek hızlı ancak kısa mesafe haberleşmeye olanak sağlayabilecek bir çözüm olarak öngörülmektedir. Ancak iç mekan gibi çok daha kısa mesafeler için atmosferik zayıflama yüksek de olsa Bant 5 ve Bant 6, sağladıkları toplam 220 GHz bant genişliği ile kablosuz haberleşmeyi yüksek hızlara çıkarabilecek en uygun frekanslar olarak ortaya çıkmaktadırlar. Bu durumdaki en önemli kısıt gürültü seviyesindeki artıştır [26]. Bu artışın (3) ile verilen SNR değerindeki etkisi takip edilmelidir. Anten kazançları artırılıp link mesafesi kısaltıldığında alıcısındaki güç değerleri dramatik bir şekilde yükselmektedir. Örnek olarak Bant 1 için 7.46×10^{-5} nW (-101.27 dBm) olan değer 1.88 nW (-47.26 dBm) değerine ulaşmaktadır. Sınırlı güçlerdeki terahertz sinyal kaynakları için anten kazancının ve link mesafesinin önemi açıkça ortaya çıkmaktadır.

Tablo 4. $P_t=0.1W$, $R=100m$ ve $G_t=G_r=0$ dBi anten kazancı için alıcıdaki güç değerleri

| Frekanslar | Atmosfer zayıflaması ihmal iken alıcıdaki güç [nW] | Atmosfer zayıflaması ihmal iken alıcıdaki güç [dBm] | Atmosfer zayıflamasında alıcıdaki güç [nW] | Atmosfer zayıflamasında alıcıdaki güç [dBm] |
|------------|--|---|--|---|
| Bant 1 | 7.53×10^{-5} | -101.23 | 7.46×10^{-5} | -101.27 |
| Bant 2 | 3.39×10^{-5} | -104.69 | 2.19×10^{-5} | -106.59 |
| Bant 3 | 2.28×10^{-5} | -106.42 | 6.43×10^{-6} | -111.92 |
| Bant 4 | 1.53×10^{-5} | -108.15 | 8.61×10^{-7} | -120.65 |
| Bant 5 | 1.27×10^{-5} | -108.96 | 2.91×10^{-6} | -115.36 |
| Bant 6 | 7.89×10^{-6} | -111.03 | 1.09×10^{-6} | -119.63 |
| Bant 7 | 6.45×10^{-6} | -111.90 | 2.57×10^{-7} | -125.90 |

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, terahertz haberleşme için oluşturulan link bütçesi ve buna ilişkin sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde atmosferin kablosuz terahertz haberleşmeye belirli frekanslarda olanak sağladığı gözlenmiştir. İncelenen frekans bantlarından Bant 1 ve Bant 2 için zayıflamanın diğer bantlardan daha az olduğu görülmektedir. Bundan dolayı Durum 1 ve 0.15 dB/m zayıflama kriteri altında Bant 1 ve Bant 2 sırasıyla 102 GHz ve 60 GHz bant genişlikleriyle dış mekan haberleşmesi için yüksek veri hızlarına olanak sağlamaktadır. Bant 5 ve Bant 6, Durum 1 ve 0.15 dB/m zayıflama kriteri altında sırasıyla yaklaşık 93 GHz ve 116 GHz' lik bant genişliklerine sahiptir. Toplamda 200 GHz üzeri bant genişliği ile kapalı mekanlarda kısa mesafe haberleşmesi için bu bantlarda yüksek veri hızlarına ulaşılabileceği değerlendirilmiştir.

Simulasyonlar; haberleşme link mesafesi, verici alıcı verimi ihtiyaç duyulan bant genişliği ve anten kazancı gibi parametrelere göre farklı makul α_{max} değerleri ile de koşuturabilir. $\alpha_{max} = 0.1$ dB/m alındığında sadece Bant 4 ve Bant 7 bu zayıflama değerini sağlayamadığı için kullanılamamaktadır. Zayıflama kriteri daha da azaltılıp $\alpha_{max} = 0.05$ dB/m alındığında ise sadece Bant 1, Bant 2 ve Bant 3 bu koşulu sağlayacaktır.

Terahertz kablosuz haberleşme sistemlerindeki verici ve alıcıların düşük güç ve verimlilikte olması, link bütçelemesi açısından anten kazancının önemini daha da artırmaktadır. Bu durum terahertz dalgalarının odaklanması için antenler ile lens kullanımı da avantajlı kılmaktadır. İç mekan haberleşmesinde atmosferik etkilerin daha az olduğu durumda (Durum 1), haberleşme için Bant 5 ve Bant 6 birlikte kullanıldığında, 200 GHz üzeri bant genişliğinde, çok yüksek seviyeli modülasyonlara ve SNR değerlerine ihtiyaç duyulmadan yüksek hızlı haberleşme olanağı bulunmaktadır.

Teşekkür

Çalışma TUBITAK 2219- Yurt Dışı Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

[1] I. F. Akyildiz, J.M. Jornet and C. Han, Terahertz band: Next frontier for wireless communications. Physical

Communication, 12, 16-32, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>

- [2] T. K. Ostmann and T. Nagatsuma, A review on terahertz communications research. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 32(2), 143-171, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9758-1>
- [3] J. Federici and L. Moeller, Review of terahertz and subterahertz wireless communications. Journal of Applied Physics, 107(111101), 1-22, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3386413>
- [4] P. H. Siegel, Terahertz technology in biology and medicine. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 52(10), 2438-2447, 2004. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.835916>
- [5] P. H. Siegel, Terahertz technology. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 50(3), 910-928, 2002. <https://doi.org/10.1109/22.989974>
- [6] X. C. Zhang, A. Shkurinov and Y. Zhang, Extreme terahertz science. Nature Photonics, 11, 16-18, 2017. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.249>
- [7] M. Tonouchi, Cutting-edge terahertz technology. Nature Photonics, 1, 97-105, 2007. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>
- [8] S. Koenig, D. L. Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, A. Leuther, A. Tessmann, R. Schmogrow, D. Hillerkuss, R. Palmer, T. Zwick, C. Koos, W. Freude, O. Ambacher, J. Leuthold and I. Kallfass, Wireless sub-THz communication system with high data rate. Nature Photonics, 7, 977-981, 2013. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.275>
- [9] A. Q. Zhao, B. S. Yu, The nonlinear designs and experiments on a 0.42-THz second harmonic gyrotron with complex cavity, IEEE Transactions on Electron Devices, 64(2), 564-570, 2017. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2642984>
- [10] X. Yuan, W. Zhu, Y. Zhang, N. Xu, Y. Yan, J. Wu, Y. Shen, J. Chen, J. She and S. Deng, A Fully-sealed carbon-nanotube cold-cathode terahertz gyrotron. Scientific Reports, 6(32936), 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep32936>
- [11] M. Kim, J. Lee, J. Lee and K. Yang, A 675 GHz differential oscillator based on a resonant tunneling diode. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(3), 510-512, 2016. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2554399>
- [12] J. Lee, M. Kim and K. Yang, A 1.52 THz RTD triple-push oscillator with a μW level output power. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology,

- 6(2), 336-340, 2016. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2509358>
- [13] J. Wang, A. A. Khalidi, K. Alharbi, A. Ofiare, H. Zhou, E. Wasige and J. Figueiredo, High performance resonant tunneling diode oscillators as terahertz sources. 46th European Microwave Conference (EuMC), pp. 4-6, London, UK, October 2016. <https://doi.org/10.1109/EuMC.2016.7824348>
- [14] J. Yun, J. Kim and J.S. Rieh, A 280-GHz 10-dBm signal source based on InP HBT technology. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 27(2), 159-161, 2017. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2016.2646928>
- [15] Y. Jiang, K. Vijayraghavan, S. Jung, A. Jiang, J.H. Kim, F. Demmerle, G. Boehm, M. C. Amann and M. A. Belkina, Spectroscopic study of terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers. Scientific Reports, 6(21169), 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep21169>
- [16] Y. Irimajiri, M. Kumagai, I. Morohashi, A. Kawakami, S. Nagano, N. Sekine, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa and I. Hosako, Precise evaluation of a phase-locked THz quantum cascade laser. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 6(1), 115-120, 2016. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2504792>
- [17] S. H. Yang, M. R. Hashemi, C. W. Berry and M. Jarrahi, 7.5% optical-to-terahertz conversion efficiency offered by photoconductive emitters with three-dimensional plasmonic contact electrodes. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 4(5), 575-581, 2014. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2342505>
- [18] N. T. Yardimci, S. H. Yang, C. W. Berry and M. Jarrahi, High-power terahertz generation using large-area plasmonic photoconductive emitters. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 5(2), 223-229, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2395417>
- [19] S. H. Yang and M. Jarrahi, A high-power photomixer with plasmonic contact electrodes. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), pp. 1-2, San Jose, CA, USA, 5-10 June 2016.
- [20] S. Shopov, A. Balteanu, J. Hasch, P. Chevalier, A. Cathelin and S. P. Voinigescu, A 234–261-GHz 55-nm SiGe BiCMOS signal source with 5.4–7.2 dBm output power, 1.3% DC-to-RF efficiency, and 1-GHz divided-down output. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 51(9), 2054-2065, 2016. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2016.2560198>
- [21] S. Jameson and E. Socher, A 0.3 THz radiating active x27 frequency multiplier chain with 1 mW radiated power in CMOS 65-nm. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 5(4), 645-648, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2439056>
- [22] T. Takahashi, Y. Kawano, K. Makiyama, S. Shiba, M. Sato, Y. Nakasha and N. Hara, Enhancement of fmax to 910 GHz by adopting asymmetric gate recess and double-side-doped structure in 75-nm-gate InAlAs/InGaAs HEMTs. IEEE Transactions on Electron Devices, 64(1), 89-95, 2017. <https://doi.org/10.1109/TEDE.2016.2624899>
- [23] A. Acharyya and J. P. Banerjee, Prospects of IMPATT devices based on wide bandgap semiconductors as potential terahertz sources. Applied Nanoscience, 4(1), 1-14, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13204-012-0172-y>
- [24] H. J. Song and T. Nagatsuma, Present and future of terahertz communications, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 1(1), 256-263, 2011. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2159552>
- [25] T. Yilmaz and O. B. Akan, Utilizing terahertz band for local and personal area wireless communication systems. 2014 IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 330-334, Athens, 2014. <https://doi.org/10.1109/CAMAD.2014.7033260>
- [26] International Telecommunication Union Recommendation P.676-11, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-11-201609-I>. Accessed on: 20.11.2017.

