

Sabit Karasal Noktadan-Noktaya Sistemlerin Çok Yollu Sönümlenmesini Azaltmak İçin

Uzaysal Çeşitleme Tekniğini Değerlendirme

Evaluating Spatial Diversity Technique for Mitigating Multipath Fading of Fixed

Terrestrial Point-to-Point Systems

Polat Göktaş^{1,2}, Satılmış Topcu², Ezhan Karaşan¹ ve Ayhan Altıntaş^{1,2}

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi

Ankara, TR-06800, Türkiye

{pgoktas, ezhan, altintas}@ee.bilkent.edu.tr

²İletişim ve Spektrum Yönetimi Araştırma Merkezi (İSYAM), Bilkent Üniversitesi

Ankara, TR-06800, Türkiye

topcu@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe —Çok yollu sönümlenme mekanizması, 10 GHz altındaki frekanslarda çalışan sabit karasal mikrodalga görüş çizgisi radyo linkleri için belirleyici yayılım faktörüdür. Çok yollu yayılımdan dolayı sönümlenme karasal görüş çizgisi linklerdeki alınan sinyalleri zayıflamakta ve dolayısıyla noktadan-noktaya sistemlerin performansını bozmaktadır. Çeşitli metodlar; çeşitleme ile yada çeşitleme tekniği olmadan çok yollu sönümlenmenin etkilerini azaltmak için kullanılır. Uzay çeşitlemede dikey aralık çok yollu sönümlenmeyi azaltmanın en etkili metodlarından biridir. Bu makalede, sabit karasal mikrodalga görüş çizgisi radyo linkleri için iki anten uzay çeşitleme konfigürasyonu konseptinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Arazi hat profili boyunca yerden yansıma noktalarından kaynaklanan çok yolluluktan dolayı çok yollu sönümlenme olayları analiz edilmiştir. Örnek sabit karasal mikrodalga görüş çizgisi radyo linklerindeki farklı anten yerden yüksekliklerinde iki anten konfigürasyonu ile uzaysal çeşitleme benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim sonuçları alıcısındaki güç seviyesine göre değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Alıcısındaki güç seviyesi, çok yollu sönümlenme, karasal mikrodalga görüş çizgisi radyo link, link kullanılabilirliği, uzaysal çeşitleme.

Abstract—Multipath fading is the dominant propagation factor for fixed terrestrial microwave line-of-sight (LOS) radio links operating at frequencies below 10 GHz. Fading due to multipath propagation attenuates received signals on line-of-sight links and thereby impair the performance of point-to-point systems. Several methods are used to reduce the effects of multipath fading without or with the need for diversity. Antenna spacing in spacing diversity is one of the most effective methods of mitigating multipath fading. This paper provides an evaluation of the concept of two antenna space-diversity configuration for fixed terrestrial microwave line-of-sight radio links. Multipath fading events due to multipath arising from ground reflection points have been analysed along the terrain path profile. A spatial diversity with two antenna configuration in different antenna heights above ground level is simulated over sample fixed terrestrial microwave line-of-sight radio links. The results have been evaluated in terms of the available signal power at the receiver.

Keywords—Multipath fading, line-of-sight (LOS) microwave radio link, link availability, received power, spatial diversity.

I. GİRİŞ

Çok yollu sönümlenme, sabit karasal mikrodalga görüş çizgisi radyo linklerinde alıcısındaki güç seviyesinin hesaplanmasında en önemli yayılım faktörüdür. Literatürde radyo linklerindeki çok yollu sönümlenme mekanizması ve yol kaybı hesaplanması durumlarında, yaygın olarak Barnett-Vigants [1], [2], Morita [3] ve Rec. ITU-R P.530 [4] analitik modelleri uygulanmaktadır. Türkiye coğrafyası için Barnett-Vigants modelinde jeoklimatik faktörü tek değer alırken, Morita modelinde ise coğrafyanın dağlık, düzlük ve kıyıya yakın olan bölgeleri için üç farklı değer alabilmektedir. Ancak Türkiye coğrafyasında Rec. ITU-R P.530 modelinde ise radyo kırılma indeksine ve arazi engebesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ericssonwide Internal Report [5] ve Olsen-Tjelta [6], [7] makalelerinde ifade edildiği üzere, dünyanın etrafında birçok bölge için çok yollu sönümlenme modellerinin uygulamalarında gösteriyor ki Rec. ITU-R P.530 modeli karasal, ayrıca dağlık ve dağlık olmayan linklerde düz-sönümlenme istatistiklerinde en başarılı performansı vermektedir.

Alıcısındaki güç seviyesi [8]; TX (verici) ile RX (alıcı) istasyonların koordinat bilgileri, TX ile RX noktaları arasındaki mesafe, frekans, TX ile RX antenlerin yerden yükseklikleri ve kazançları, polarizasyon tipi, jeoklimatik iklim faktörü, arazi pürüzlülüğü, sinyal gürültü oranı ve sönümlenme marj parametrelerine bağlıdır. Çok yollu sönümlenme, sabit karasal mikrodalga radyo linklerin performans kriterleri olarak alıcısındaki güç seviyesini ve link kullanılabilirliğini bozmaktadır [9].

Uzaysal çeşitleme, çok yollu sönümlenme faktörünün alıcısındaki güç seviyesi hesabında etkisini azaltmada en etkili metodlardan biridir [10]. Arazi hat profili boyunca yansımadan kaynaklanan çok yollu sönümlenme etkisini azaltmak için verici veya alıcı antenlerin yerden yükseklikleri açıklık kriterine göre hesaplanmaktadır. Arazi açıklık kriteri, arazi hat profilinin k faktörü koşulunda kama kırınım kaybını ihmal etmek için tasarlanmıştır ama çok yollu sönümlenme oluşumunu azaltmak için bu açıklık kriterinde 3 dB ile 6 dB aralığında kama kırınım kaybı gözlenebilir.

Bu makalede, Rec. ITU-R P.530'de bahsedilen karasal görüş çizgisi radyo linkleri için iki anten uzaysal çeşitleme kriterleri incelenmiştir. Ayrıca, NATO Band 4 (4400-5000 MHz) frekans bandında çalışılan İstanbul'da konumlandırılmış Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkindeki uzaysal çeşitleme konfigürasyonunun alıcısındaki güç seviyesindeki etkisinin incelenmesi yapılmıştır.

II. TX&RX ANTENLERİN YERDEN YÜKSEKLİKLERİNİN OPTİMİZASYONU

Uzaysal çeşitleme konfigürasyonunda TX&RX istasyonlarında kullanılan antenler için, açıklık kriteri aşağıdaki verilen adımlarla belirlenmektedir:

Adım 1.

Rec. ITU-R P.530 bahsedilen tek anten konfigürasyonu için belirlenen prosedüre göre üst antenin yerden yüksekliği aşağıdaki adımlarla hesaplanmaktadır:

Adım 1.1. Arazi hat profilindeki en dominant blokaj için $1.0 F_1$ açıklık ve $k=1.333$ 'e göre TX&RX antenlerin yerden yüksekliklerini hesaplama,

Adım 1.2. Zamanın 99.99%'nı geçen istatistik minimum k_e değerini TX ile RX istasyonları arasındaki mesafeye göre hesaplama,

Adım 1.3. Adım 1.2'de elde edilen k_e 'ye göre arazi hat profilinde aşağıda belirtilen Fresnel bölge açıklık yarıçapına göre TX&RX antenlerin yerden yüksekliklerini hesaplama,

- $0.0 F_1$, arazi hat profilinde bir izole blokaj var ise
- $0.3 F_1$, arazi hat profilininin %10'dan fazlası blokaj ise

Adım 1.4. Adım 1.1 ve 1.3 'den elde edilen TX&RX antenlerin yerden yüksekliklerinden yüksek olanı alınır.

Adım 2.

Rec. ITU-R P.530 bahsedilen alt antenin yerden yüksekliği aşağıdaki açıklık kriterine göre hesaplanmaktadır:

- $0.3 F_1$, arazi hat profilinde bir izole blokaj var ise
- $0.6 F_1$, arazi hat profilininin %10'dan fazlası blokaj ise

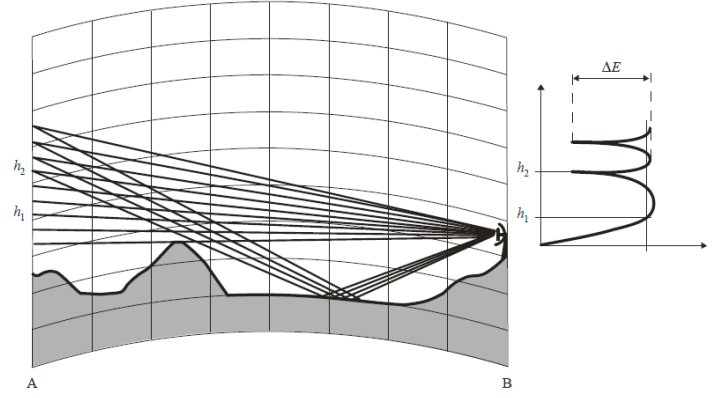
Alternatif olarak, alt antenlerin açıklığı kama kırınım kaybı 6 dB olacak şekilde TX&RX antenlerin yerden yükseklikleri ayarlanır.

Adım 3.

Çok yollu sönümlenmenin etkisini azaltmak için sağlanan uzaysal çeşitlemenin gereksinimlerini sağlayabilmek için üst ve alt antenler arasındaki gerekli düşey aralığı aşağıdaki metod ile hesaplanmaktadır:

Adım 3.1. TX istasyonunda antenin yerden yüksekliğini 1 m'den N m'e kadar ve her bir metre artımında arazi hat profili boyunca bulunan yansıma noktalarından kaynaklanan toplam yansıma kayıplarından en düşüğüne sahip arazi profil noktası için yol farkları, Δ_i hesaplanmaktadır.

Adım 3.2. Şekil-1'de gösterildiği gibi TX istasyonu için h_1 anten yerden yüksekliğini hesaplamak için, TX istasyonunda antenin yerden yüksekliğini 1 m'den N m'e kadar ve her bir metre artımındaki hesaplanan yol farklarından $\lambda/2$ 'nin katlarının [11] çıkartılması elde edilen farklardan minimum olan indeks için TX istasyonundaki antenin yerden yüksekliği, $MinTX$ seçilir.



Şekil 1: A-B linkinde A istasyonu için hesaplanan h_1 antenin yerden yüksekliği.

$$MinTX = \min \sum_{i=1}^N \left| \Delta_i - n \frac{\lambda}{2} \right| \quad (m) \quad (1)$$

$$h_1 = h_{TX} + MinTX - h_{reflect} \quad (m) \quad (2)$$

öyle ki: $\forall n= 0,1,2,\dots,N-1$; genellikle N, 200 alınmaktadır. Burada, h_{TX} TX istasyonun denizden olan yüksekliği, $h_{reflect}$ ise TX istasyonundaki $MinTX$ anten yerden yüksekliğine göre hesaplanan yansıma noktasının denizden olan yüksekliğidir.

Adım 3.3. Adım 3.2'de hesaplanan TX istasyonun h_1 anten yerden yüksekliğinde optimum dikey aralığı için gerekli olan mesafe aşağıdaki Denklem-3 ile hesaplanmaktadır. RX istasyonun h_2 anten yerden yüksekliğinin hesaplanması için Adım 3.1-3.2 tekrar uygulanmaktadır. TX istasyonunda iki anten uzaysal çeşitlemenin optimum dikey aralığı S_{TX} , RX istasyonunda optimum dikey aralığı ise S_{RX} ile ifade edilmektedir [4].

$$\theta_{TX} = \frac{150d}{f(h_1 - d_1^2/12.74k)} \quad (3)$$

$$\theta_{RX} = \frac{150d}{f(h_2 - (d - d_1)^2/12.74k)} \quad (4)$$

$$S_{TX} = \frac{\theta_{TX}}{2} \quad (m), \quad S_{RX} = \frac{\theta_{RX}}{2} \quad (m) \quad (5)$$

Burada, d km cinsinden TX ile RX istasyonları arasındaki mesafe, f GHz biriminde frekans, d_1 km cinsinden TX istasyonundan yansıma noktasına olan uzaklık ve k arazi hat profili için yerin etkin çapı Rec. ITU-R P.452 modelinde [12] linkin konumuna bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Adım 3.4. Uzaysal çeşitleme için Rec. ITU-R P.530 bahsedilen alt antenin yerden yüksekliği aşağıdaki açıklık kriterine göre hesaplanmaktadır:

- $0.0 F_1$, arazi hat profilinde bir izole blokaj var ise
- $0.3 F_1$, arazi hat profilininin %10'dan fazlası blokaj ise

TX&RX istasyonları için uzaysal çeşitleme ile elde edilen anten yükseklikleri aşağıdaki Algoritma'da gösterilmektedir.

Algorithm 1 TX&RX antenlerin yerden yüksekliklerinin optimizasyon algoritması

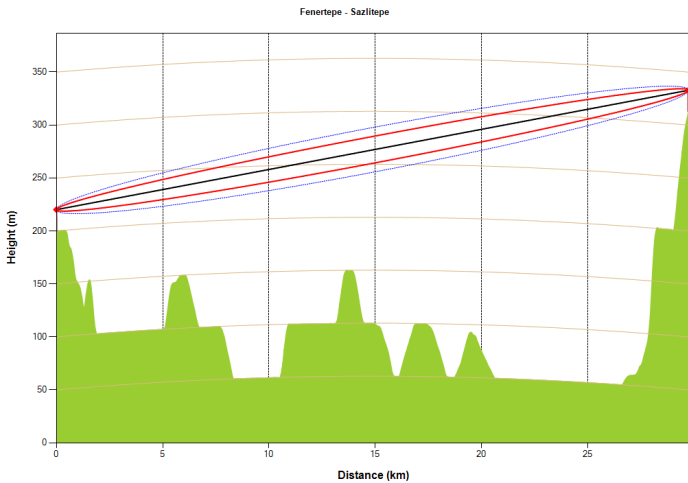
```

1: procedure ANTENYUKSEKLİK
2:   DikeyAralıkÖnce = Üst Anten (Adım 1)-Alt Anten (Adım 2)
3:   DikeyAralık (Adım 3.3)
4:   if DikeyAralıkÖnce < DikeyAralık (Adım 3.3) then
5:     Alt Anten (Adım 3.4)
6:     Üst Anten = Alt Anten + DikeyAralık (Adım 3.3)
7:   else
8:     Alt Anten (Adım 2)
9:     Üst Anten (Adım 1)
10:  end if
11: end procedure

```

III. BENZETİM SONUÇLARI VE KIYASLAMALAR

Verici ve alıcı istasyonu arasındaki arazi hat profili 3×3 saniyelik çözünürlüğe (yaklaşık 100 metre) sahip *DTED* formatındaki Sayısal Arazi Yükseklik Haritası kullanılarak elde edildi. Benzetim çalışması olarak İstanbul'da konumlandırılmış Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkindeki uzaysal çeşitleme konfigürasyonunun alıcıdaki güç seviyesindeki etkisinin incelenmesi yapılmıştır. Şekil-2'de Fenertepe-Sazlıtepe LOS radyo linkine ait arazi hat profili ve LOS çizgisi ile Fresnel bölgesi gösterilmektedir. Birinci Fresnel (F1) bölgesi mavi renk ile ve birinci Fresnel bölgesinin %60'lık kısmı (0.6 F1) kırmızı renk ile gösterilmektedir. Tablo 1'de Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin istasyon ve link çalışma parametreleri verilmektedir. Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinde uzaysal çeşitleme konfigürasyonu benzetim çalışması sonucunda TX istasyonunda alt antenin yerden yüksekliği 20.0 m, üstteki antenin yerden yüksekliği ise 27.5 m ve RX istasyonunda alt antenin yerden yüksekliği 44.0 m, üstteki antenin yerden yüksekliği ise 46.4 m olarak hesaplanmıştır. Tablo 3 ve 4'de TX istasyonunda 20.0 m ve RX istasyonunda 44.0 m anten yerden yükseklikleri, TX istasyonunda 27.5 m ve RX istasyonunda 46.4 m anten yerden yükseklikleri için link çalışma sonuçları gösterilmektedir.



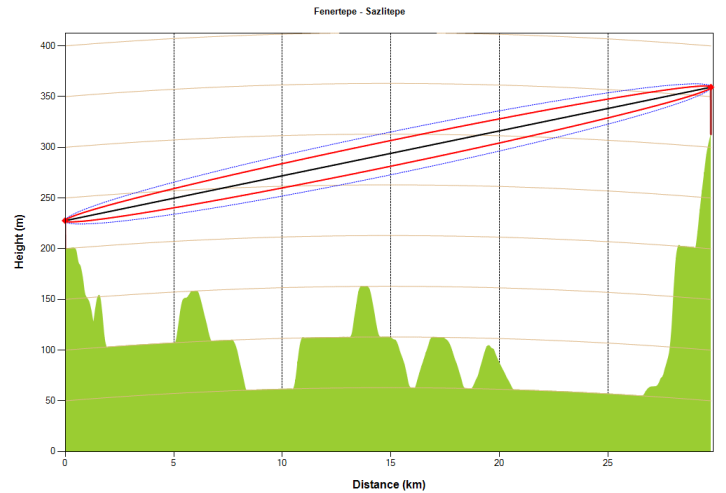
Şekil 2: Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin arazi hat profili (Frekans: 5 GHz, TX&RX antenlerin yerden yükseklikleri: 20 m).

Parametre	Fenertepe-Sazlıtepe R/L
TX İstasyon koordinat, Fenertepe	41° N 09' 2.40" 28° E 47' 9.60"
RX İstasyon koordinat, Sazlıtepe	41° N 08' 43.40" 28° E 25' 43.80"
Frekans	5 GHz
TX&RX antenlerin yerden yüksekliği	20 m
TX&RX antenlerin kazancı	27.15 dBi
TX çıkış gücü	25 dBm
Yağmur zayıflaması için zaman yüzdesi	%0.01
Kablo kaybı (TX&RX istasyonları için)	1 dB
Bant genişliği	20 MHz
Hedef SNR	6.95 dB
HPBW	6°
Çeşitleme Tipi	Uzaysal
Polarizasyon Tipi	Dikey
Mevsim Tipi	Yaz
Toprak Tipi	Orta Kuru Toprak

Tablo I: Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin çalışma parametreleri (girdiler).

Parametre	Fenertepe-Sazlıtepe R/L
Radyo kırılma indisi	-456.54 N-units/km
Arazi engebesi	101.72 m
Yağış miktarı	38.94 mm/h
Serbest uzay kaybı	135.94 dB
Atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflama	0.28 dB
Yağmurdan kaynaklanan zayıflama	0.91 dB
Yansımadan kaynaklanan kayıp	1.41 dB
Kırınımından kaynaklanan kayıp	0 dB
Alıcıdaki güç seviyesi	-65.40 dBm
Gürültü seviyesi	-100.96 dBm
Sönümlenme marjı	28.61 dB
Link kullanılabilirliği, En kötü ay	%99.9946
Link kullanılabilirliği, Yıllık ortalama	%99.9989

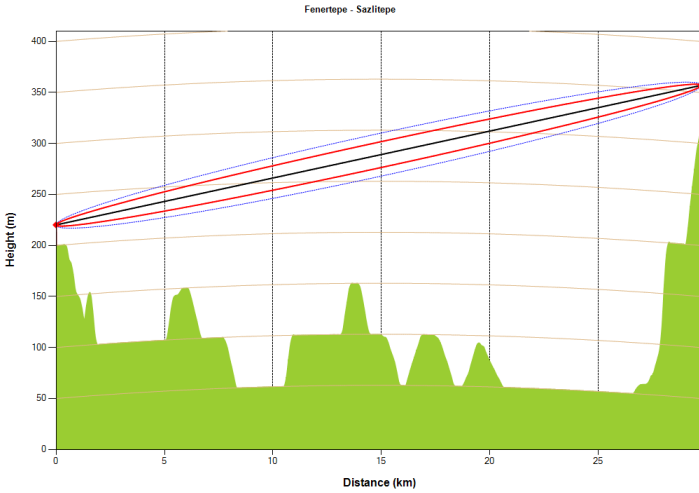
Tablo II: Çeşitleme tekniği olmadan 20 m TX&RX antenlerin yerden yüksekliğindeki Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin çalışma sonuçları (çıktılar).



Şekil 3: Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin arazi hat profili (Frekans: 5 GHz, TX antenin yerden yüksekliği: 20.0 m ve RX antenin yerden yüksekliği: 44.0 m).

Parametre	Fenertepe-Sazlıtepe R/L
Radyo kırılma indisi	-456.54 N-units/km
Arazi engebesi	101.72 m
Yağış miktarı	38.94 mm/h
Serbest uzay kaybı	135.94 dB
Atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflama	0.28 dB
Yağmurdan kaynaklanan zayıflama	0.91 dB
Yansımadan kaynaklanan kayıp	1.357 dB
Kırınımdan kaynaklanan kayıp	0 dB
Alıcıdaki güç seviyesi	-65.54 dBm
Gürültü seviyesi	-100.96 dBm
Sönümlenme marjı	28.47 dB
Link kullanılabilirliği, En kötü ay	%99.9952
Link kullanılabilirliği, Yıllık ortalama	%99.9990

Tablo III: 20.0 m TX ve 44.0 m RX antenlerin yerden yüksekliğindeki Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin çalışma sonuçları (çıktılar).



Şekil 4: Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin arazi hat profili (Frekans: 5 GHz, TX antenin yerden yüksekliği: 27.5 m ve RX antenin yerden yüksekliği: 46.4 m).

Parametre	Fenertepe-Sazlıtepe R/L
Radyo kırılma indisi	-456.54 N-units/km
Arazi engebesi	101.72 m
Yağış miktarı	38.94 mm/h
Serbest uzay kaybı	135.94 dB
Atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflama	0.28 dB
Yağmurdan kaynaklanan zayıflama	0.91 dB
Yansımadan kaynaklanan kayıp	1.395 dB
Kırınımdan kaynaklanan kayıp	0 dB
Alıcıdaki güç seviyesi	-65.43 dBm
Gürültü seviyesi	-100.96 dBm
Sönümlenme marjı	28.58 dB
Link kullanılabilirliği, En kötü ay	%99.9952
Link kullanılabilirliği, Yıllık ortalama	%99.9991

Tablo IV: 27.5 m TX ve 46.4 m RX antenlerin yerden yüksekliğindeki Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinin çalışma sonuçları (çıktılar).

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, noktadan-noktaya haberleşme sistemlerinde uzaysal çeşitleme konfigürasyonu kullanılmak üzere çok yollu sönümlenme mekanizmasının alıcıdaki güç seviyesindeki etkisini azaltacak yöntem incelenmiştir. Uzaysal çeşitleme anten konfigürasyonunun link analiz benzetim çalışmasında NATO Band 4 frekans bandında çalışan İstanbul'da konumlandırılmış Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linki çalışılmıştır. Fenertepe-Sazlıtepe mikrodalga LOS radyo linkinde uzaysal çeşitleme konfigürasyonunda elde edilen TX&RX anten yükseklikleri için yapılan link analiz çalışmaları sonucunda yansımadan kaynaklanan kayıp azalmakta ve %99.99 link kullanılabilirliği kriteri sağlanmaktadır. Gelecekte saha ölçümleri yapılarak önerilen yöntemin link analiz çıktılarının doğrulanması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] W. T. Barnett, "Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHz," Bell System Technical Journal, vol. 51, no. 2, pp. 311-361, 1972.
- [2] A. Vigants, "Space diversity engineering," Bell System Technical Journal, vol. 54, no. 1, pp. 103-142, January 1975.
- [3] K. Morita, "Prediction of Rayleigh fading occurrence probability of line-of-sight microwave links," Rev. Elec. Commun. Lab., vol. 18, pp. 810-821, Nov.-Dec. 1970.
- [4] Recommendation ITU-R P.530-15, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," International Telecommunication Union, Geneva, 2013.
- [5] K. T. Vieira, "Comparisons of Barnett-Vigants method with ITU-R link data base," tech. rep., EAB/G-03:002609 Uae Ericssonwide Internal Report, August 2003.
- [6] R. L. Olsen and T. Tjelta, "Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial LOS links: Background and results of tests," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 47, no. 1, pp. 157-170, January 1999.
- [7] R. L. Olsen and T. Tjelta, "Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial LOS links: Comparison with regional techniques," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 1, pp. 23-30, January 2003.
- [8] P. Göktaş, *Analysis and implementation of prediction models for the design of fixed terrestrial point-to-point systems*. MS thesis, Bilkent University, January 2015.
- [9] P. Göktaş, S. Topcu, E. Kardeş ve A. Altıntaş, "Mikrodalga Karasal Radyo Link Analiz ve Simülasyonlarının Rec. ITU-R P.530 Tavsiyesine Uygun Olarak Gerçeklenmesi", VII. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Elazığ, Türkiye, Ağustos 2014.
- [10] Recommendation ITU-R F.1093-1, "Effects of multipath propagation on the design and operation of line-of-sight digital radio-relay systems," International Telecommunication Union, Geneva, 1997.
- [11] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)*. ser. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies series, Prentice Hall Inc., 2002.
- [12] Recommendation ITU-R P. 452-15, "Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz," International Telecommunication Union, Geneva, 2013.