



EN YÜKSEK GÜCE BAĞLI OTOMATİK YÖNLENEN ANTEN SİSTEMİ TASARIMI

DESIGN OF A SELF-DIRECTED ANTENNA SYSTEM BASED ON THE MAXIMUM POWER

Ünal Umut GÜNER¹ Şükrü ÖZEN¹ Kayhan ATEŞ^{*1,2}

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

² Telecommunications and Remote Sensing Laboratory, Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Pavia, Pavia, Italy

ABSTRACT

In communication systems, the physical alignment of the transmitting and receiving antennas is a critical parameter that affects communication efficiency. This study presents a two-axis rotation system that automates the alignment of the receiver antenna used in wireless communication systems. The aim is to increase the communication efficiency. The system has a mechanical structure that rotates the receiver antenna to obtain the highest signal strength between a receiver and a transmitter antennas. The alignment of the receiver antenna to the highest power is achieved through a vector network analyzer (VNA) controlled by the Python programming language based a graphical user interface based. The developed computer interface allows the user to define the antenna orientation angle. Additionally, the transmitter antenna's scattering parameters are analyzed to automatically direct the receiver to the most efficient angle. With this study, an alternative to antenna measurement systems can be provided to obtain antenna radiation patterns. In this study, the Friis transmission equation were considered, and the system's performance was tested at frequencies of 1.8, 2.5, and 4 GHz. The results demonstrate that the automatic steering system ensures the desired accuracy and efficiency, allowing the antennas to focus on maximum power transmission.

Keywords: Antenna Measurement System, Electromagnetic Fields, Python Programming, Radiation Pattern, Scattering Parameters

ÖZET

Haberleşme sistemlerinde alıcı ve verici antenlerin birbirine karşı fiziksel konumları, haberleşme verimini etkileyen önemli parametrelerden birisidir. Bu çalışmada, kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan alıcı antenin hizalamasını otomatikleştiren iki eksenli bir yönlendirme sistemi sunulmuştur. Bu sayede, haberleşme veriminin artırılması amaçlanmıştır. Sistem, bir alıcı ve bir verici anten arasında en yüksek sinyal gücünü elde etmek için alıcı anteni döndüren mekanik bir yapıya sahiptir. Alıcı antenin en yüksek güce yönlmesi, Python programlama dili temelli geliştirilen bir kullanıcı arayüzü ile kontrol edilen bir vektörel ağ analizörü (VNA) aracılığıyla sağlanmıştır. Geliştirilen bilgisayar arayüzü sayesinde, kullanıcı tarafından anten yönelim açısı belirlenebilmektedir. Ayrıca, verici antenin saçılma parametreleri analiz edilerek en verimli açığa otomatik olarak yönlenebilmektedir. Bu çalışma sayesinde anten ölçüm sistemlerine bir alternatif olması için anten ışınma örüntüsü elde edilebilmektedir. Çalışmada, Friis yayılma formülü göz önünde bulundurulmuş ve sistemin performansı 1,8, 2,5, 4 GHz frekanslarında test edilmiştir. Sonuçlar, otomatik yönlme sisteminin istenen doğruluğu ve verimliliği sağlayarak antenlerin maksimum güç iletimine odaklandığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Anten Ölçüm Sistemi, Elektromanyetik Alanlar, Işınma Örüntüsü, Python Programlama, Saçılma Parametreleri

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: kayhanates@akdeniz.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
10.11.2024	02.12.2024	02.01.2025	ERKEN GÖRÜNÜM

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşmede kullanılan radyo frekansı (RF) ve mikrodalga sistemleri, günümüzün hızla gelişen teknolojik ortamında büyük önem taşımaktadır. Bu alanlardaki sürekli ilerlemeler, haberleşme performansını artırma, veri transfer hızını optimize etme ve kablosuz ağların yaygınlaşmasını sağlama amacını taşımaktadır. Bu bağlamda anten teknolojisi, RF ve mikrodalga uygulamalarında temel bir unsur olarak öne çıkmaktadır [1].

Günden güne artan bilgi miktarıyla birlikte bilginin iletimi de oldukça zorlaşmış, bu da haberleşmenin önemini ortaya çıkarmıştır. Haberleşmenin nasıl iyileştirilebileceğiyle ilgili literatürde farklı alanlarda çalışmalar mevcuttur. İhtiyaç doğrultusunda farklı sistemler için farklı teknikler gözlemlenebilir. Hücrel haberleşme, uydu haberleşmesi, Wi-Fi, radyo ve televizyon yayınları örnek olarak verilebilir. Neredeyse bütün haberleşme sistemleri için anten kavramı kritik bir öneme sahiptir. Hücrel haberleşme için her ne kadar konunun derinliği tartışılabilir olsa da baz istasyonları için farklı açıklıkların haberleşmenin performansını ne ölçüde artırdığı literatürde daha önce çalışılmıştır [2].

Anten ölçüm sistemleri genellikle beş alt sistemden oluşur; alıcı ile verici anten, konumlandırma sistemi, kayıt sistemi ve veri işleme sistemidir [3]. Bu tip anten ölçüm sistemlerinin düşük maliyetli olması önemli bir faydadır. Uzak alan anten ışınma örüntüsü ölçüm sistemleri, çoğunlukla mekanik yapılara ve alıcı-verici bütünlüğüne ihtiyaç duyduğu için pahalı sistemlerdir. Sadece bu yönüyle ucuz ve kolay kullanılabilir bir ölçüm yöntemi, bu tür sistemler için bir ihtiyaçtır.

Anten tasarımlarında kazanç, ışınma davranışı, polarizasyon ve verimlilik incelenmesi gereken önemli parametrelerdendir [4]. Anten prensipleri incelendiğinde genellikle antenlerin tasarımına odaklanılır. Fakat bazı haberleşme sistemlerinde genellikle alıcı-verici anten çiftinden birinin sabit olmadığı gözlemlenir. Bu durum, yönlü antenler için haberleşme verimini düşürür. Literatürde her ne kadar hazır anten ölçüm sistemleri tasarlanmış olsa da tamamen otomatik yönelimli bir anten için kaynaklar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, alıcı antenin en yüksek güce göre verici antene yönlendirilmesi sağlanarak sabit durumda oluşacak olan düşük anten veriminin yükseltilmesi planlanmıştır. Vektörel ağ analizörü temelli tasarlanan sistem sayesinde anten ölçümünden çok antenin yönelimine odaklanılmıştır. Tasarlanan sistemin literatüre katkıları şu şekilde sıralanabilir:

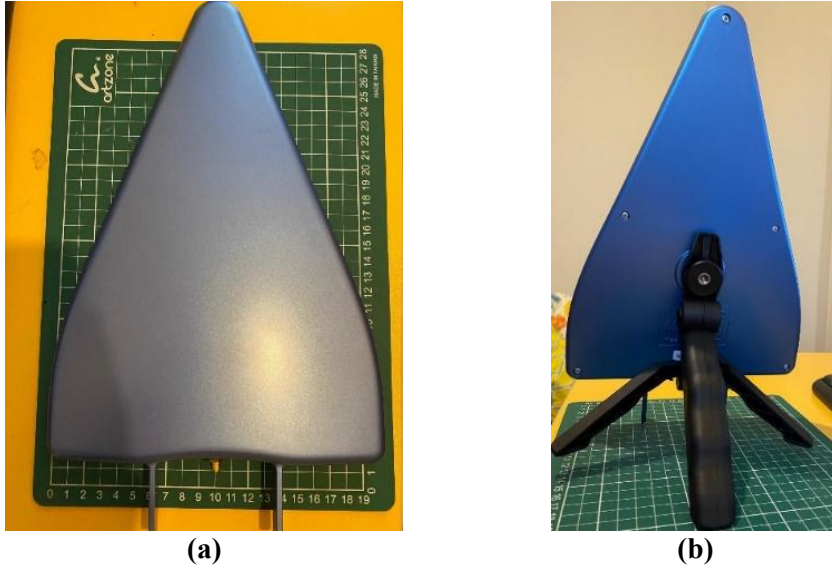
- Alıcı antenin vericiye en yüksek sinyal gücüne göre otomatik yönlendirilmesi sağlanarak, sabit antenlerin düşük verim sorunları minimize edilmiştir.
- Karmaşık ve pahalı sistemlere alternatif olarak, uygun maliyetli bir prototip geliştirilmiştir.
- Yönlü antenlerde yöne bağlı kayıpları azaltan, tamamen otomatik bir yön düzeltici sistem literatüre kazandırılmıştır.
- Vektörel ağ analizörü temelli bir sistemle, anten ölçümünden çok yönelime odaklanan bir yöntem sunulmuştur.
- Literatürde sınırlı olan otomatik yönelimli anten sistemleri için yenilikçi bir tasarım gerçekleştirilmiştir.

Çalışma boyunca oluşturulan sistem ve program için “EYGOYA” kısaltması kullanılacaktır. Makalenin gidişatı şu şekilde planlanmıştır: Öncelikle, geliştirilen sistemin temel aldığı teorik altyapı ve kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Ardından, bilgisayar tabanlı tasarlanan kullanıcı arayüzü ve donanım açıklanmıştır. Farklı frekanslarda hesaplama algoritması sayesinde elde edilen anten ölçüm bulguları belirtilmiştir ve tartışılmıştır. Sonuç kısmında ise çalışmanın literatüre katkısı sunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Sistem ve Anten Özellikleri

Bu çalışmada alıcı ve verici antenler olarak referans değerleri bilinen log-periyodik antenler (HyperLOG-6080 ve HyperLOG-7060, Aaronia, Almanya) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan antenler Şekil 1’de verilmiştir. Antenlerin özellikleri, Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma kapsamında kullanılan antenler: (a) Hyperlog-6065; (b) Hyperlog-7060

Tablo 1. Çalışmada kullanılan antenlerin özellikleri [5, 6].

Özellikler	HyperLOG-6080	HyperLOG-7060
Frekans Aralığı	680 MHz - 8 GHz	700 MHz – 6 GHz
Anten Kazancı (dBi)	5 dBi	5 dBi
Anten Tasarımı	Log-Periyodik	Log-Periyodik
Anten Fiziksel Boyutları	340 × 200 × 25 mm	340 × 200 × 25 mm

Antenlerin ölçüm aşamasında karşılaşılan ilk kriterlerden birisi, antenler arası mesafedir. Bu durum, uzak alan kavramına göre incelenir. Uzak alan, bir antenden yeterince uzak mesafede elektromanyetik dalgaların yayıldığı veya bir alıcıya yeterince uzak mesafeden alındığı bölgeyi ifade eder [7]. Bu bölgede, elektromanyetik dalgalar serbest uzay koşullarında yayılır ve dalga şeklinde ilerler. Uzak alanın belirlenmesi için yayılma mesafesi veya dalga boyuna bağlı olarak farklı formüller kullanılabilir. Uzak alan hesabı, şu şekildedir:

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

Burada, R uzaklık, D antenin en büyük fiziksel boyutu ve λ ise dalga boyunu temsil eder. Bu formül, antenin uzak alanını belirlemek için kullanılan bir kriterdir.

Antenlerin tasarımı ve performansı, uzak alanın önemli bir faktörü olarak dikkate alınmalıdır. Uzak alandaki elektromanyetik dalgaların genlik, faz ve polarizasyon özellikleri, antenin verimliliği, kazancı ve ışınma örüntüsü üzerinde belirleyici bir rol oynar. Antenin uzak alan performansı, elektromanyetik dalgaların yeterli uzaklıkta doğru bir şekilde yayılması için önemlidir [8].

Çalışmada kullanılan çalışma frekansları, kullanılan antenlerin kataloglarında belirtilen referans değerlere göre seçilmiştir. Çalışmada karşılaştırmalı analiz yapılabilmesi için çalışmalar 1,8, 2,5, 4 GHz frekansları baz alınarak yapılmıştır.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Çalışmada kullanılan frekanslar için dalga boyları $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, Denklem 2 yardımıyla sırasıyla 0,167, 0,120 ve 0,075 m olarak bulunur. Hesaplanan dalga boyları ile alıcı ve verici antenlerin en uzun dipolünün 20 cm olduğu bilinerek uzak alan sınırları Denklem 1 ile hesaplanabilir.

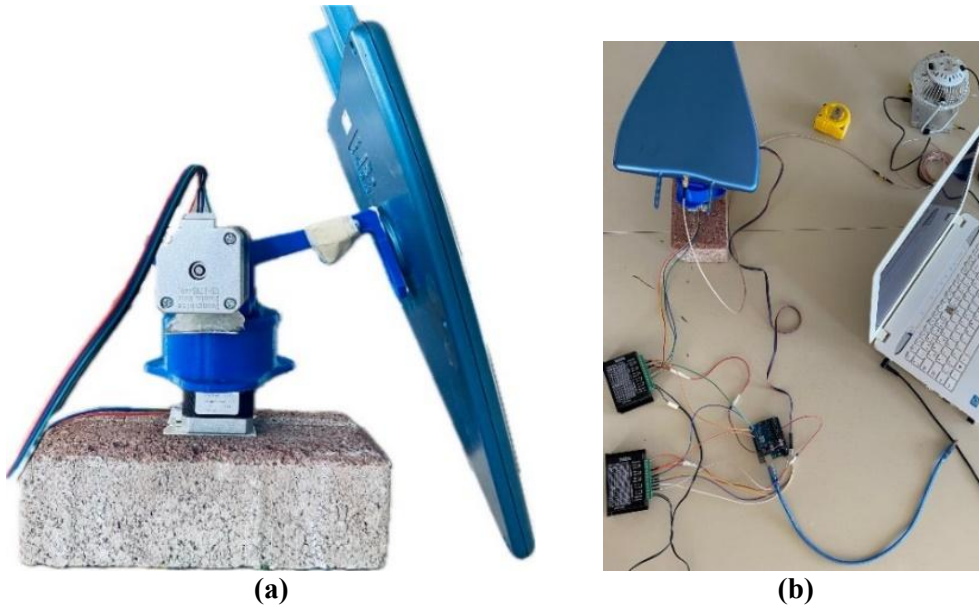
Bu durumda uzak alan sınırları R1, R2, R3 için sırasıyla 0,48, 0,67 ve 1,06 m'dir. R3'ün aralarında en uzak alana sahip olduğu düşünülürse ölçüm sisteminde antenler arası mesafe minimum 1,06 m olacak şekilde konumlandırılmalıdır. Hata paylarının minimize edilmesi için bu mesafe çalışmada 1,1 m olarak ayarlanmıştır. Bu hesaplamaların doğruluğunun teyit edilmesi için antenler arası serbest uzay yayılımını modelleyen Friis iletim denklemi kullanılmıştır. Friis denklemi, alıcı antene ulaşan gücü verici antenin gücü, anten kazançları ve aralarındaki mesafeye bağlı olarak hesaplar [9].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (3)$$

Burada P_r , alıcı antende ölçülen güç, P_t verici antenin gücü, G_t verici anten kazancı, G_r alıcı anten kazancı, λ dalga boyu ve R antenler arası mesafedir. Bu formül, ideal bir serbest uzay ortamında sinyal kayıplarını belirlemekte ve ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla referans olarak kullanılmaktadır.

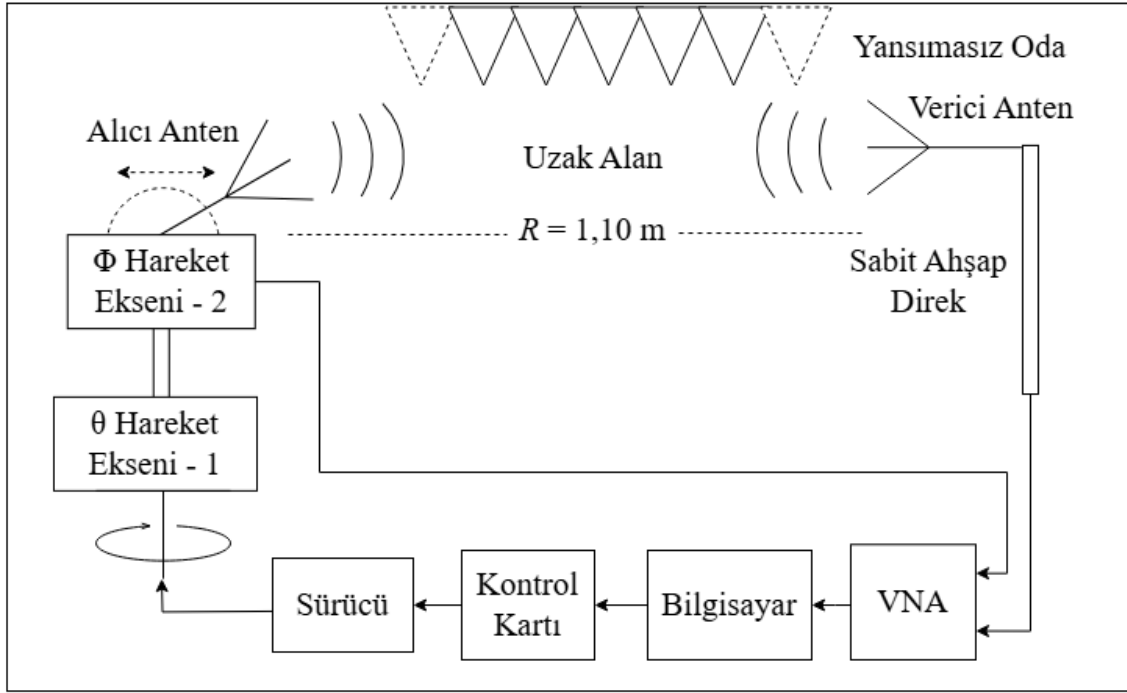
Anten kazançlarının her iki anten için de 5 dBi olduğu ve VNA aracılığıyla iletilen gücün 0 dBm olduğu bilindiğine göre uzak alan sınırlarında konumlandırılan antenler için ölçülen güç P_r , 1,8 GHz, 2,5 GHz ve 4 GHz frekansları için sırasıyla -28,35, -31,23, -35,31 dBm olarak hesaplanabilir. Hesaplamalarda da görülebileceği üzere frekans arttıkça artan uzak alan sınırı alıcı anten tarafından ölçülen gücü büyük oranda düşürmektedir. Bu durum, çalışmada yüksek frekans için ölçüm sorunu doğuracaktır ve ilerleyen bölümlerde detaylıca incelenmiştir.

Hedef şema ve uygulanmaya çalışan adımlar doğrultusunda kurulan EYGOYA tasarımı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Gerçekleşmiş anten ölçüm sistemi: (a) Alıcı anten; (b) Ölçüm sistemi

Ölçüm ortamının hazırlanması aşamasında dikkat edilmesi gereken birkaç husus vardır. Elektromanyetik girişim ve yansımaları minimize etmek amacıyla yansısız oda ortamı seçilmiştir. Kalibrasyon ve referans ölçümleri sırasında ölçüme olumsuz etkisi olduğu tespit edilen tüm girişim yaratan cihazlar mümkün olduğunca uzaklaştırılmıştır. Bununla beraber, alıcı ve verici antenler arasındaki mesafe yaklaşık 1,1 m'ye ayarlanarak 4 GHz frekansı için antenin uzak alanda kalması sağlanmış ve ölçümler 10° çözünürlükle gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ortamı için hedefler doğrultusunda en uygun görülmüş olan ölçüm sistemi şeması Şekil 3'teki gibidir.

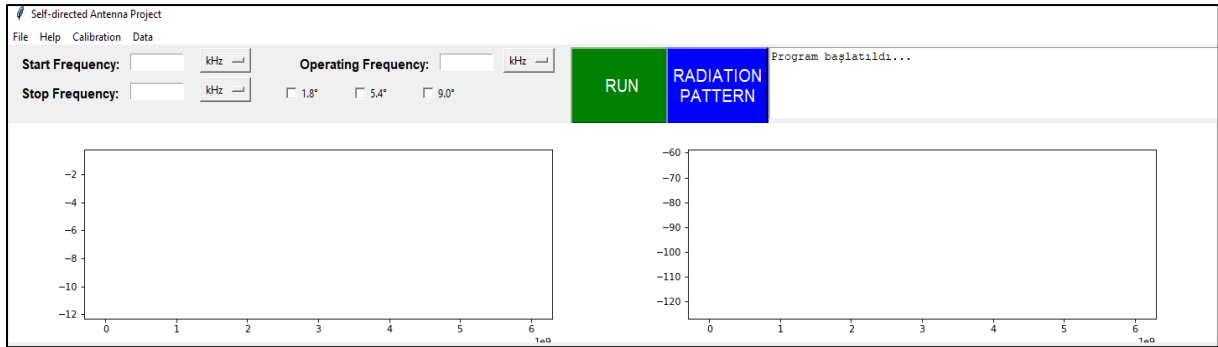


Şekil 3. Anten ölçüm sistemi şeması

2.2. Kullanıcı Yazılımı Arayüzü

Bu çalışmada, ölçüm cihazı olarak 2 portlu VNA (LibreVNA, 100 kHz-6 GHz) kullanılmıştır. Cihaz, Python tabanlı bir kullanıcı arayüzü yazılımı aracılığıyla Programlanabilir Enstrümantasyon için Standart Komutlar (SCPI) protokolü ile denetlenmiştir. SCPI, ölçüm cihazlarının yazılım tabanlı kontrol edilmesini sağlayan standart bir komut setidir ve bu çalışmada ölçümler için efektif ve performanslı bir çözüm sağlamıştır. SCPI protokolü, Python arayüzü ve VNA arasında veri aktarımını sağlamıştır. Arayüzden girilen ölçüm frekans aralığı gibi bilgiler protokol sayesinde VNA'da tanımlanır. VNA, SCPI sorgusuna göre saçılma parametrelerini ölçer ve verileri geri göndermiştir. Veriler, analiz ve kaydetme yeteneği gibi belirli bir işlem için kullanılmıştır. Kullanılan protokol, cihazın farklı ölçüm ihtiyaçlarına uyum sağlamasını kolaylaştırmakta ve ölçüm işlemlerinin doğruluğunu artırmaktadır. Çalışmada bu protokolün kullanılması, ölçümlerin güvenilir ve tekrarlanabilir olmasına katkıda bulunmuştur.

EYGOYA'nın ana menüsü başlangıç frekansı, bitiş frekansı, çalışma frekansı, üç ayrı çözünürlük seçeneği, S_{11} ve S_{21} parametrelerinin anlık grafikleri, kalibrasyon menüsü, bilgilendirme sohbet kutusu, ışına örüntüsü butonu ve başlat butonundan oluşmaktadır. Kullanıcı arayüzünün genel görünümü, Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. EYGOYA arayüzü

Arayüz, kullanıcıya kalibrasyon için esneklik sağlamaktadır. Kalibrasyon metodu olarak kısa-açık-yük-geçiş (SOLT) yöntemi kullanılmıştır [10, 11]. Bunun yanında kullanıcı cihaz kalibrasyonunu kendisi yapabilmekte veya hazır kalibrasyon dosyasını programa yükleyerek tamamlayabilmektedir.

Literatürde, anten tasarımları ve uygulamalarına yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır [12-14]. Söz konusu tasarımlarda saçılma parametreleri önemlidir. Bu çalışmada tasarlanan sistemde saçılma parametrelerinin anlık grafiklerini görüntülemek, birçok durumda ihtiyaçtır. Bu yüzden EYGOYA'da S_{11} ve S_{21} parametrelerinin anlık grafikleri ana menü üzerinde sürekli olarak izlenebilmektedir. Ayrıca kullanıcı, dilediği zaman saçılma parametrelerini gerçek, sanal, genlik ve faz bilgisiyle beraber kaydedebilmektedir.

Işıma örüntülerinin anten ölçüm sistemlerinde ne kadar kritik bir yeri olduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu çalışmanın ana amacı en yüksek güce ulaşmak olsa da ışımaya örüntüsü çıkarılabilir kabiliyeti sayesinde bir anten ölçüm sistemi olarak kullanılabilirliği de mümkündür. EYGOYA ölçümler tamamlandıktan sonra θ açısı eksenindeki iki boyutlu ışımaya örüntüsünü görüntüleyebilmeye olanak sağlayan bir arayüze sahiptir. Yönlenme işlemi tamamlandıktan sonra, her açı için ayrı sonuç metniyle birlikte ışımaya örüntüsü ve diğer sonuçlar bir Excel dosyasına kaydedilir.

2.3. Donanım Tasarımı

θ eksenindeki hareket, alıcı antenin 360° bir döngü içinde en yüksek sinyal gücüne yönelmesini sağlamıştır. Motor kontrolü için Arduino Uno kontrol kartı, belirlenen açılara göre adım sinyalleri göndermiştir ve bu sinyaller TB6600 sürücü ile her bir darbe için $1,8^\circ$ hareket sağlamıştır. Üç farklı açısız çözünürlük seçeneği sunulmuş olup her adımdaki darbe sayısı buna göre belirlenmiştir. Darbe sayısı kullanıcının arayüzden belirleyeceği çözünürlüğün motor mikro adımına oranıyla hesaplandığında 3,6, 5,4 ve 9 çözünürlükleri için sırasıyla 2, 3 ve 5 sonuçlarına ulaşılmıştır. Motorun hedef açısını tarayabilmesi için ihtiyacı olan döngü sayısı da 360 ile çözünürlük açılarının oranlanmasıyla 100, 50 ve 40 tur olarak hesaplanmıştır. Tur sayıları göz önüne alındığında, sistemin pratikliğinde çözünürlüğün doğrudan etkisi olduğu unutulmamalıdır. 100 tur ve 40 tur döngüleri EYGOYA'nın çalışma süresini ciddi biçimde etkilemektedir.

Kontrol kartı, motorun her adımı tamamlayıp tamamlamadığını geri besleme döngüsü ile EYGOYA arayüzü yazılımına bildirir. Böylece her adımda yalnızca tek bir ölçüm alınarak konum doğruluğu sağlanmış olur. 360° dönüş tamamlandığında kontrol kartı, arayüz yazılımına bitiş mesajını iletir; bu durumda yazılım ve donanım çalışması tamamlanır.

θ eksenindeki her adımda, anten tarafından ölçülen S_{21} parametresi kaydedilir ve en yüksek sinyal gücü değeri tespit edilir. Bu değer motor adımı karşılığı konumu, çeşitli algoritmalar kullanılarak hesaplanır ve sistem en yüksek güç için motora gerektiği kadar darbe gönderir, anten en yüksek güce göre konumlanır. Farklı açısız çözünürlükler için programda üç ayrı koşul tanımlanarak, her açı için optimum dönüş pozisyonu belirlenir.

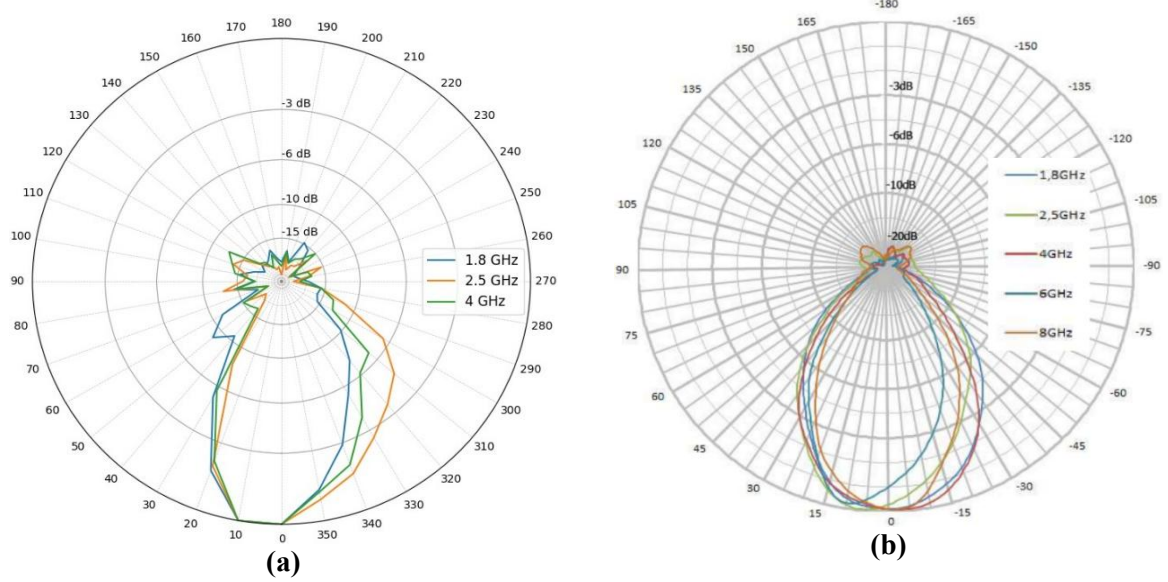
ϕ eksenini için kontrol fonksiyonu, θ eksenini fonksiyonuna benzer şekilde çalışmakla birlikte, bu ekseninde motor 180 derecelik bir dönüş gerçekleştirmektedir. Başlangıçta 180° tarama yapıldıktan sonra, anten en yüksek sinyal gücü konumuna göre ters yönlenecek şekilde maksimum sinyale yönelecek şekilde konumlanır. Bu hareket, θ ekseninde olduğu gibi Python'dan gelen sinyal komutları ile yönetilir ve ölçüm sonuçları SCPI protokolü ile kaydedilir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada geliştirilen otomatik anten yönlendirme sistemi, antenlerin en yüksek sinyal gücünü alacak şekilde konumlanmasını sağlamış ve yapılan ölçümler bu sistemin performansını desteklemiştir. Sistem, θ ekseninde 360° ve ϕ ekseninde 180° dönüş hareketleri boyunca S_{21} parametresiyle ölçülen sinyal gücü değerlerine dayalı olarak test edilmiştir. Bu süreçte alıcı anten, en yüksek sinyal gücünü elde edecek açıyı belirlemiş ve bu açıya otomatik olarak yönelmiştir.

Test sonuçları, farklı frekans aralıklarında (1,8 GHz, 2,5 GHz ve 4 GHz) en yüksek sinyal gücünün elde edildiği açının doğruluğunu ve tutarlılığını göstermektedir. Elde edilen ışımaya örüntüleri, log-periyodik alıcı antenin 1,8 GHz ile 4 GHz frekans aralığındaki üretici firmanın referans değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sistemin özellikle düşük frekanslarda daha kararlı ve hedefe uygun sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, 4 GHz'de yapılan ölçümlerde ışımaya örüntüsünde bazı bozulmalar gözlemlenmiştir.

Antenler arası mesafe analizlerinde, uzak alan sınırının altında yapılan ölçümlerde sinyal kayıplarının arttığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 4 GHz frekansı için antenler 1,1 m mesafede konumlandırılmıştır. Yüksek frekanslı ölçümlerde ise mesafe artırılmasına rağmen ışınma örüntüsünde bozulmalar meydana gelmiş, bu nedenle 6 GHz ölçümleri çalışmaya dahil edilmemiştir. Şekil 5'te çalışma sonucu oluşan anten ışınma örüntüleri ve referans anten ışınma örüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5. Farklı frekanslardaki alıcı anten ışınma örüntüleri: (a) EYGOYA ölçümleri; (b) Anten üretici kataloglarındaki referans değerler [5]

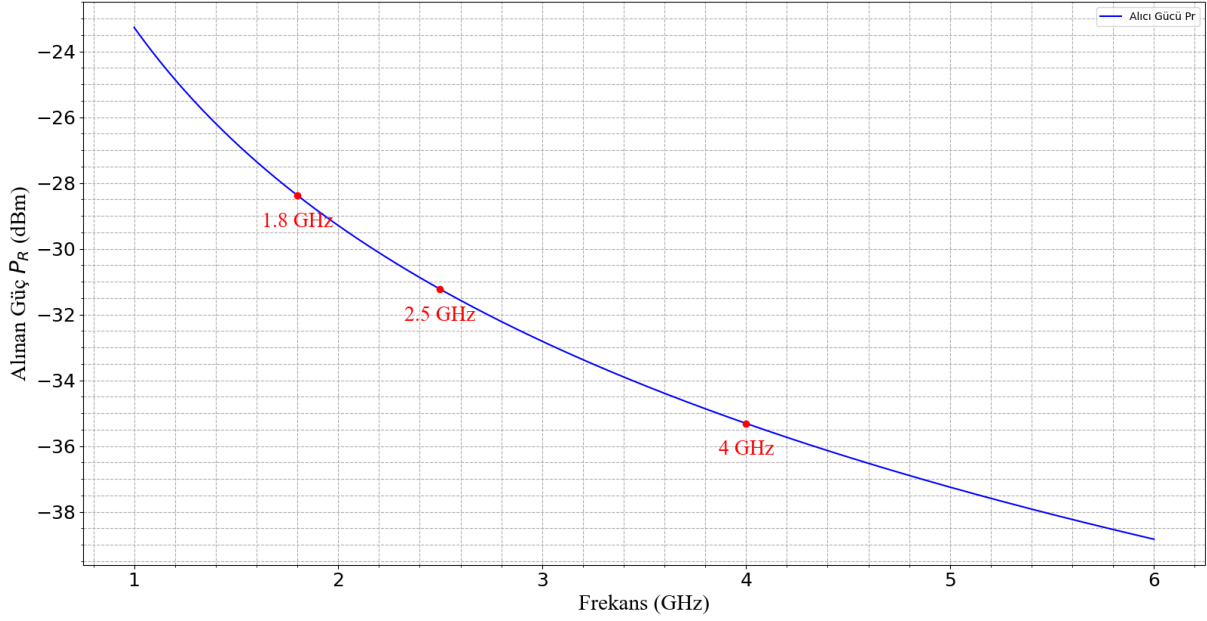
Sistem, en verimli olması gereken 0° konumundaki en yüksek güç değerini ışınma örüntüsü üzerinde de göstermektedir. Bu bilgi antenin en yüksek güce yönelebilmesi için yeterli bir bilgidir.

Antenlerin ölçümünde önemli bir parametre olan duran dalga oranı (VSWR), bu çalışma kapsamında incelenmiştir. VSWR seviyeleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Frekanslara göre VSWR ölçümleri.

Frekans	VSWR
1,8 GHz	1,040
2,5 GHz	1,027
4 GHz	1,032

Şekil 6, Denklem 3 yardımıyla alıcı antendeki gücün frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Burada, frekansın ölçülen güç üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 1,8, 2,5 ve 4 GHz frekans noktalarında anten kazançları 5 dBi ve verici gücü 0,001 W olarak kabul edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda sabit uzaklık koşulu için frekans arttıkça ölçülen gücün azaldığı gözlemlenmiştir. Hesaplamalar Friis denkleminde yapılmıştır. İlgili frekanslar için hesaplar daha önce yapılmış ve sırasıyla -28,35, -31,23, -35,31 dBm sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu durum, yüksek frekanslarda dalga boyunun küçülmesine bağlı olarak serbest uzay yol kaybının artması ile açıklanabilir. 1,8 GHz'de ölçülen güç dBm olarak en yüksek değerini alırken, 4 GHz'de minimum seviyeye düşmüştür. Bu veriler, frekans arttıkça güç kaybının arttığını ve uzak mesafelerde düşük frekansların tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapılan ölçümler sonucunda ilgili frekanslar için sırasıyla -34,32, -37,51 ve -35,94 dBm değerlerine ulaşılmıştır. Ölçümlerle teorik hesaplamalar arasındaki farklılıklar düşük frekanslarda daha belirgindir. Bu durumun birden fazla sebebi olabilir. Bu frekanslarda Wi-Fi ve mobil telefonların kullanıldığı bilinmektedir.



Şekil 6. Alıcı antendeki güç (P_R) – frekans ilişkisi

Bu bulgular ışığında düşük frekanslarda elde edilen daha yüksek güç değerleri, haberleşme mesafelerinin artırılması açısından avantaj sağlamaktadır. Özellikle 1,8 GHz gibi düşük frekanslarda daha az yol kaybı gözlenmiş olması, bu frekansların uzak mesafeli haberleşme sistemleri için uygun olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, frekans arttıkça daha büyük kayıpların yaşanması, kısa mesafeli ancak yüksek veri hızına ihtiyaç duyulan sistemlerde yüksek frekansların kullanılabilceğini göstermektedir. Frekans ve yol kaybı arasındaki bu ilişki, haberleşme sistemlerinin tasarımında önemli bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan EYGOYA'nın güncel literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslama sonuçları, Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Literatürdeki benzer çalışmalar ve özellikleri.

Benzer Çalışmalar	Çalışma Frekansı	Uzaklık	Elektromanyetik Kaynak	Kullanım Alanı
Olencki ve ark. [15]	1,5 – 5,5 GHz	Uzak Alan	VNA	Anten Ölçümü
Rehman ve ark. [16]	0,6 – 10 GHz	Uzak Alan	VNA	Anten Ölçümü
Zhang ve ark. [17]	2,4 GHz	Uzak Alan	Gerilim Kontrollü Osilatör	Anten Ölçümü
Fontá ve ark. [18]	8,2 – 67 GHz	Uzak alan	VNA	Anten Ölçümü
EYGOYA	1,6, 2,5, 4 GHz	Uzak Alan	VNA	Anten Ölçümü / Otomatik Yönlenme

4. SONUÇ

Bu çalışmada, kablosuz haberleşme sistemlerinde anten hizalama ve sinyal optimizasyonu için alternatif bir otomatik yönlendirme sistemi tasarımı sunulmuştur. Tasarlanan sistem, antenlerin maksimum sinyal gücünü elde edecek şekilde yönlendirilmesini sağlayarak haberleşme verimliliğini artırmaktadır. Alıcı antenin θ ve φ eksenlerinde bağımsız olarak dönmesi, S_{21} 'e dayalı en yüksek sinyal gücünün ölçülmesini sağlamış, böylece hedeflenen haberleşme doğruluğu ve kararlılığı optimize edilmiştir.

Çalışmada kullanılan Python tabanlı arayüz, kullanıcıların sistem ayarlarını kolaylıkla yapmalarına olanak tanıırken, SCPI protokolü ile sağlanan otomatik kontrol yetenekleri, anten ölçüm sistemlerinin

pratikliğini artırmaktadır. Bu özellikler, kullanıcıların cihazı çeşitli frekans aralıklarında yönetebilmesi ve ölçüm süreçlerini gerçek zamanlı olarak takip edebilmesi açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Geliştirilen EYGOYA sistemi sayesinde test ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Test ölçümlerine göre alıcı antenin verici antene göre yönelimi gözlenmiştir. Bunun yanında, davranışı bilinen antenlerin örüntüsü, VSWR ve ölçülen güç değerleri 1,8, 2,5 ve 4 GHz frekanslarında incelenmiştir. Ölçüm sonuçları, kullanılan antenlerin kataloglarında belirtilen referans değerleriyle uyumludur.

Literatürde anten optimizasyonuna dair çeşitli çalışmalar bulunsa da bu çalışmanın literatüre katkısı, sistemin otomatik yönlendirme yeteneği ve yüksek sinyal gücüne odaklanmasıdır. Tasarlanan sistem, haberleşme sistemlerinde anten verimliliğini artırmak için pratik bir çözüm sunmaktadır. Geliştirilen yönlendirme mekanizması ve VNA tabanlı ölçüm arayüzü, diğer RF ve mikrodalga sistemlerine entegre edilebilecek esneklikte olup gelecekteki araştırmalar için de bir alternatif oluşturmaktadır. Araştırmacılar tarafından farklı frekans bantlarında çeşitli kaynaklardan yayılan elektromanyetik alanların etkileri incelenmektedir [19-22]. Söz konusu sistemin elektromanyetik çevre ile ilişkisi, ele alınması gereken konulardan birisi olarak belirtilebilir.

TEŞEKKÜR

Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (EMUMAM) teşekkür ederiz. Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 1919B012224030).

REFERANSLAR

- [1] J. Smith, Automated Antenna Alignment and Optimization System, International Journal of Electrical Engineering, Volume 15(3), 98-115, 2023.
- [2] A. Alexiou, M. Haardt, Smart Antenna Technologies for Future Wireless Systems: Trends and Challenges, IEEE Communications Magazine, 42(9), 90-97, 2004.
- [3] M. M. Taygur, S. Bas, E. Yumrukaya, E. A. Miran, S. Gunel, Low-Cost FPGA Based Antenna Pattern Measurement System, 2013 International Conference on Applied Electronics, Czech Republic, pp. 1-4, 2013.
- [4] A. Rehman, T. Rasul, M. F. Shafique, B. Ijaz, K. S. Alimgeer, M. S. Khan, R. M. Shubair, N. Khaddaj Mallat, Development of a Cost Effective Antenna Radiation Pattern Measurement Setup, 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, pp. 1-4, 2016
- [5] Aaronia HyperLOG-60 LogPeriodic Antennas, https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia_HyperLOG_60_Logper_Antennas.pdf, 2014 [accessed 2 March 2022].
- [6] Aaronia HyperLOG-70 LogPeriodic Antennas, https://downloads.aaronia.com/datasheets/antennas/HyperLOG/Aaronia_HyperLOG_70_Logper_Antennas.pdf, 2014 [accessed 2 March 2022].
- [7] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, Second Ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [8] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Fourth Ed. Hoboken: Wiley, 2012.
- [9] J. A. Shaw, Radiometry and the Friis Transmission Equation, American Journal of Physics, 81, 33-37, 2013.
- [10] K. Ates, T. Z. Kocaer, S. Ozen, N.U. Kockal, Electromagnetic interference shielding effectiveness and microwave absorption performance of plaster mortars containing metal waste chips in X-band frequency range. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 57(3), 230-244, 2023.

-
- [11] N. Gülmez, N.U. Koçkal, Ş. Özen, and Ateş, Corrosion Potential and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Geopolymer Tiles Produced with Waste Metal Particles. *Sādhanā*, 47 (3), 115, 2022.
- [12] Ç. Gökçek-Saraç, G. Akçay, S. Karakurt, K. Ateş and Ş.Özen, Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 40 (1), 179-190, 2021.
- [13] K. Ateş, C. Yeter ve Ş. Özen, WLAN Uygulamaları için 4×4 MIMO Antenin Elektromanyetik Dozimetri Karakteristiğinin İncelenmesi, TIPTEKNO'20, Çevrimiçi, 19-20 Kasım 2020.
- [14] K. Ates and H. F. Carlak, Dosimetry Analysis of the Human Head Model due to Mobile Phone Usage at GSM-850 Frequency Band, 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET), Antalya, Türkiye, 2017.
- [15] J. Olencki, V. Waladi, A. Bekasiewicz ve L. Leifsson, A Low-Cost System for Far-Field Non-Anechoic Measurements of Antenna Performance Figures, *IEEE Access*, 11, 39165-39175, 2023.
- [16] A. Rehman, T. Rasul, M. F. Shafique, B. Ijaz, K. S. Alimgeer, M. S. Khan, R. M. Shubair ve N. K. Mallat, Development of a Cost Effective Antenna Radiation Pattern Measurement Setup, 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2016.
- [17] T. Zhang, L. Du, J. J. Lv, B. Zhou, Y. Yang, X. Y. Zhou, X. Cheng, J. Pei ve T. J. Cui, A Simple System for Measuring Antenna Radiation Patterns in the Wi-Fi Band, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 55 (1), 191-202, 2013.
- [18] C. Fontá, F. R. Varela, A. Arboleya ve E. Martinez-De-Rioja, Robotic Arm-Based Antenna Measurement System, 2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI), Firenze, Italy, 2024.
- [19] N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Electromagnetic Field Exposure to Human Head Model with Various Metal Objects at Sub-6 GHz Frequencies, *Electromagnetic Biology and Medicine*. 42 (3), 114-122, 2023.
- [20] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation Using an Electromagnetic Shielding Technique, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 28 (3), 1672-1682, 2022.
- [21] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: a Simulation Study, 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). 2016.
- [22] M. Bedeloğlu, N. İl, K. Ateş and Ş. Özen, Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components, *Radiation Protection Dosimetry*. 194 (1), 57-64, 2021.