

Haziran'17
June'17

Sayı/Number: 13 Cilt/Volume: 7
Yıl/Year: 2017
ISSN: 1309-5501

Yayın Sahibi

TMMOB Elektrik Mühendisleri
Odası adına
Hüseyin YEŞİL

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Hüseyin ÖNDER

Yayın İdare Merkezi

İhlamur Sokak No: 10 Kat: 3
Kızılay/Ankara
Tel: (0312) 425 32 72
Faks: (0312) 417 38 18
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>
bilimseldergi@emo.org.tr
EMO üyelerine parasız dağıtılır

Teknik Editör

E. Orhan ÖRÜCÜ

Teknik Sekreteryası

Oylum YILDIR

Yayın Türü

Yerel süreli yayın
6 ayda bir yayınlanır

Basım Adedi

5000

Basım Tarihi

Aralık 2017

Sayfa Düzeni

Hakki ÜNLÜ

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
İhlamur Sokak No:10 Kat:3 Kızılay / Ankara
Telefon: +90 (312) 425 32 72 / 137
E-Posta: hakki.unlu@emo.org.tr

Baskı Yeri

LOTUS MATBAACILIK
Tel: (0.312) 433 23 10 (pbx)
Faks: (0.312) 434 03 56
www.lotusajans.com
Sokullu Cd. Perçem Sk. No: 9 Çankaya/ANKARA

EMO BİLİMSEL DERGİ

Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal
Mühendisliği Bilimsel Dergisi

The Journal of Electrical, Electronics, Computer and
Biomedical Engineering

YAYIN KURULU

BAŞ EDİTÖR/EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. A. Hamit Serbest
Çukurova Üniversitesi

EDİTÖRLER/EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Ayhan Altıntaş
Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Cengizhan Öztürk
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan Akın
Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Güven Önbilgin
Öndokuz Mayıs Üniversitesi

Prof. Dr. H. Altay Güvenir
Bilkent Üniversitesi

Doç. Dr. İzzet Gökhan Özbilgin
ISACA

Prof. Dr. Murat Eyüboğlu
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Timur Aydemir
Gazi Üniversitesi



TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

UCTEA/Chamber of Electrical Engineers

DANIŞMA KURULU

- Prof. Dr. Ahmet Koltuksuz, *Yaşar Üniversitesi*
Prof. Dr. Ali Hikmet Doğru, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Arif Nacaroğlu, *Gaziantep Üniversitesi*
Prof. Dr. Atilla Bir, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Aydın Köksal, *Bilişim A.Ş.*
Prof. Dr. Aydoğan Özdemir, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Aysin Baytan Ertüzün, *Boğaziçi Üniversitesi*
Prof. Dr. Belgin Türkay, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Bülent Sankur, *Boğaziçi Üniversitesi*
Prof. Dr. Cüneyt Güzelış, *Yaşar Üniversitesi*
Prof. Dr. Erdal Panayırıcı, *Kadir Has Üniversitesi*
Prof. Dr. Erkan Afacan, *Gazi Üniversitesi*
Prof. Dr. Ferit Acar Savacı, *İzmir İleri teknoloji Enstitüsü*
Prof. Dr. H. Bülent Ertan, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. H. Özcan Gülçür, *Boğaziçi Üniversitesi*
Prof. Dr. Haldun Karaca, *Dokuz Eylül Üniversitesi*
Prof. Dr. İbrahim Eksin, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. İnci Çilesiz, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. İrfan Karagöz, *Gazi Üniversitesi*
Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Muhittin Gökmen, *MEF Üniversitesi*
Prof. Dr. Murat Aşkar, *İzmir Ekonomi Üniversitesi*
Prof. Dr. Müjde Güzelkaya, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Osman Eroğul, *GATA (Gülhane Askeri Tıp Akademisi)*
Prof. Dr. Oya Kalıpsız, *Yıldız Teknik Üniversitesi*
Prof. Dr. Sermin Onaygil, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Doç. Dr. Lale Tükenmez Ergene, *İstanbul Teknik Üniversitesi*
Doç. Dr. Osman Abul, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi*
Doç. Dr. Özlem Özgün, *Hacettepe Üniversitesi*
Dr. Bora Güngören, *Portakal Teknoloji*
Ahmet Tarık Uzunkaya, *Entes Elektronik*
Bülent Damar, *Pelka Elektrik*
Fikret Küçükdeveci, *TEPA*
Serdar Bozkurt, *SIEMENS*

İÇERİK/CONTENTS

Görsel Hedef Takibi Yöntemlerine Genel Bakış.....	5
<i>An Overview of Visual Target Tracking Methods</i>	
<i>Bahri Maraş, Nafiz Arıca, Ayşın Ertüzün</i>	
İşbirlikli Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemleri için Röle Seçim Teknikleri.....	17
<i>Relay Selection Techniques for Network Coded Cooperative Systems</i>	
<i>Semiha Tedik Başaran, Güneş Karabulut Kurt</i>	
Gemi Akustik İz Analizi.....	25
<i>Ship Acoustic Signature Analysis</i>	
<i>Umut Fırat, Tayfun Akgül</i>	
Keyfi Şekli Dielektrik Yüklü Dalga Kılavuzları için Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi.....	33
<i>Determination of Scattering Parameters for Waveguides Loaded with Arbitrarily Shaped Dielectric Materials</i>	
<i>Alican Uysal, Ahmet Aydoğan, Sedat Kılınç, Tuğhan Çağlayan, Funda Akleman</i>	

Görsel Hedef Takibi Yöntemlerine Genel Bakış

An Overview of Visual Target Tracking Methods

Bahri Maraş¹, Nafiz Arica² ve Ayşın Ertüzün¹

¹Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

bahri.maras@boun.edu.tr, ertuz@boun.edu.tr

²Bahçeşehir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

nafiz.arica@eng.bau.edu.tr

Öz

Görsel hedef takibi, üzerinde uzun süredir çalışılmış ve halen araştırma konusu olmaya devam eden önemli bir bilgisayarla görsel problemidir. Hedef takibi problemi, sabit ya da hareketli bir kameradan alınan video bilgisi üzerinde ilgilenilen nesnenin izlenmesi olarak tanımlanabilir. Araştırma konusu olarak ilgi çekmesinin en önemli nedenleri, takibin yapıldığı ortam şartlarında ve takip edilecek nesne hareketinde oluşan değişimlerdir. Başarılı bir hedef takip algoritmasının, ortamda meydana gelen ışık değişimlerine, görüntü gürültüsüne, düşük kontrastlığa, hedefin ortamdaki diğer nesnelerle örtüşmesine, hedefi görüntüleyen kameranın istemsiz hareketlerine vb. karşı gürbüz olması gerekmektedir. Literatürdeki araştırmalar temel olarak üretici (generative) ve ayırdedici (discriminative) olarak iki başlık altına toplanmaktadır. Bu makalede her iki yaklaşımı temel alan son yıllarda geliştirilmiş hedef takibi algoritmaları incelenerek, mevcut yöntemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmaları anlatılmaktadır. Ayrıca çalışmaların başarımlarını değerlendirmesi amacıyla literatürde kullanılan veri kümeleri ve karşılaştırma metrikleri de açıklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayarla görsel, üretici yöntemler, ayırdedici yöntemler, yapılandırılmış destek vektör makineleri, derin öğrenme, Bayesçi yaklaşımlar (Kalman süzgeci, parçacık süzgeci, vb.), dolandır matris.

Abstract

The visual target tracking has a long history and it still continues to be an active and important research problem in computer vision. Target tracking problem may be defined as tracking an object of interest from the video data recorded by a still or a moving camera. The variations in the conditions of the environment where tracking is performed as well as the changes in the motion of the object to be tracked are the major challenges that make visual target tracking an interesting problem. A successful target tracking algorithm should be robust against illumination variations in the environment, visual noise, low contrast, occlusions of the other objects in the environment, undesired movements of the camera which displays the target, etc. The research on visual target tracking fundamentally developed along two main streams: Generative techniques and discriminative

techniques. In this paper, both generative and discriminative target tracking algorithms have been investigated and their advantages and disadvantages are presented in terms of comparisons based on the analyses reported. Furthermore, the databases and the evaluation metrics which are used in the literature for the performance evaluation are explicated.

Keywords: Computer vision, generative methods, discriminative methods, structured SVM (Support Vector Machines), deep learning, Bayesian approaches (Kalman filter, particle filter etc ..), circulant matrix.

1. Giriş

Hedef takibi, son yıllarda bilgisayarla görsel alanında en çok ilginin gösterildiği ve çalışmanın yapıldığı problemlerden biridir. Hedef takibi problemi, sabit ya da hareketli bir kameradan (TV/IR) alınan video verisi üzerinde ilgilenilen nesnenin izlenmesi olarak tanımlanabilir. Askeri ve sivil birçok uygulamada karşımıza çıkan hedef takibine; bina/tesis güvenlik sistemleri ve trafik gözetleme kameralarında insan/yaya, araç takibi veya insansız hava araçlarından (İHA) aktarılan hava görüntülerinde şüpheli cisim/insan takibi uygulamaları örnek olarak verilebilir.

Literatürde hedef takip problemine, gerçek zamanlı yaklaşan çalışmalar olduğu gibi çevrim dışı çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak bu makalede pratikte daha çok uygulanabilir olan gerçek zamanlı hedef takibi yöntemleri ele alınmaktadır. Gerçek zamanlı hedef takibinin doğru ve sürdürülebilir olarak gerçekleştirilebilmesi için takip yönteminin, ortamda meydana gelebilecek ışık değişimi, düzlem dışı dönüş, ölçek değişimi, örtüşme, biçim bozulması, hareket bulanıklığı, hızlı dinamik hareket, düzlem içi dönüş, görüş açısının dışına çıkılması, arkaplan ile karışım ve düşük çözünürlük gibi olumsuzluklara karşı başarılı bir şekilde çalışması gerekmektedir. Ancak mevcut yöntemler incelendiğinde tüm değişimlere karşı gürbüz bir algoritma geliştirilmesinin çok zor olduğu, bundan dolayı belirli alt problemlerin çözümüne yönelik yaklaşımlar geliştirildiği söylenebilir. Örneğin bir yöntem ışık değişimlerine karşı iyi sonuçlar verirken hedefin ortamda bulunan diğer nesneler ile olan etkileşimini takip edememektedir. Öte yandan etkileşimleri başarı ile takip edebilen bir yöntem kamera açısından ya da hedefin dinamik hareketlerinden dolayı

oluşacak hedef görsel değişimlerini başarı ile algılayıp uyarı verememektedir.

Görsel takip çalışmaları tarihsel olarak, basit hedef modeli kullanarak arama yaklaşımıyla başlamış, daha sonra hedef modellerini yinelemeli olarak güncelleyen yaklaşımlar geliştirilmiştir. Diğer taraftan makine öğrenme yöntemlerinden faydalanarak hedef ve arkaplanın sınıflandırılması yönünde çalışmalar yapılmıştır. Son yıllarda ise yapılandırılmış destek vektör makineleri ile derin öğrenme yöntemlerine dayalı algoritmalar geliştirilmiştir. Bu çalışmaların bazılarında ise Bayesçi yaklaşımlar ile hedef model örnekleme gerçekleştirilmektedir. Bu çerçevede hedef takip yöntemleri genel olarak iki sınıfta toplanabilmektedir; üretici (generative) yöntemler ve ayırdedici (discriminative) yöntemler. Üretici yöntemler hedef takip problemini, hedef modeline benzer olan imge bölgelerinin/pencerelerinin aranması olarak formüle ederken, ayırdedici yöntemler hedefin arkaplandan ayırt edilebilmesi amacıyla hedef takibini sınıflandırma problemi olarak tanımlamaktadırlar.

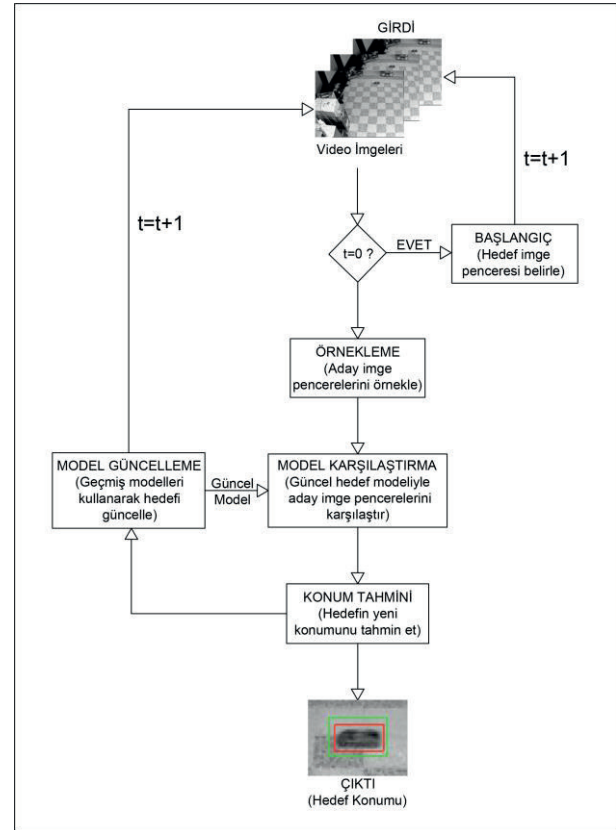
Hedef takip yöntemlerinde, bir video üzerinde hedefin konum, hız, büyüklük, dönme vb. özelliklerinin izlenmesi amaçlandığından bu parametrelerin takip edilmesi için kullanılan yöntemler, gözlem ve hareket modellerinin örnekleme ve güncellenmesi açısından çeşitlilik göstermektedir. Gözlem modeli, hedefin takibinin yapılması amacıyla görsel özniteliklerinin bir referansa göre değerlendirilmesi için gerekli fonksiyon olarak tanımlanırken, hareket modeli ise hedefin konum, hız, rotasyon vb. dinamik hareket parametrelerinin takibi amacıyla tasarlanmış olan denklemler olarak adlandırılmaktadır. Gözlem ve hareket modellerinin örnekleme için Kalman ve parçacık süzgeçleri, ilinti ilişkileri, gradyan temelli uyarılma algoritmaları, Metropolis Hastings gibi örnekleme algoritmaları kullanılabilir. Gözlem ve hareket modellerinin güncellenmesi için ise Kalman ve parçacık süzgeçleri, kademeli temel bileşen analizi, seyrek temel bileşen analizi, doğrusal diskriminant analizi, Pozitif-Negatif (P-N) öğrenme, gerçek zamanlı adaboost, sırt regresyonu, yapılandırılmış destek vektör makineleri, ilinti süzgeci gibi yöntemler kullanılabilir. Bu makalede, [1] ve [2]'de araştırılan yöntemlere, en güncel çalışmalar ilave edilerek mevcut literatür çalışmalarının genişletilmesi ve en yüksek başarıyı sergileyen çalışmalara dikkat çekilmesi amaçlanmaktadır.

Makalenin ikinci ve üçüncü bölümlerinde sırasıyla üretici ve ayırdedici yöntemler anlatıldıktan sonra dördüncü bölümde, önerilen yöntemlerin başarımlarını değerlendirmelerinde kullanılan veri kümeleri ve karşılaştırma ölçütleri açıklanmaktadır. Beşinci bölümde mevcut tüm yöntemler hakkında genel bir karşılaştırmalı değerlendirme yapıldıktan sonra sonuçlara ve gelecek çalışmalara vurgu yapılmaktadır.

2. Üretici Yöntemler

Üretici yöntemler, hedef takip problemini hedef modeline benzer imge pencerelerinin sıralı olarak aranması yoluyla çözmektedir. Burada amaç, hedefin görsel modelinin oluşturulması ve bu modele karşılık gelen en iyi imge penceresinin bulunmasıdır. Bu sınıfa giren yöntemlerde arkaplan değerlendirmeye alınmamaktadır. Mevcut yöntemler hedef modelinin güncellenip güncellenmemesine;

güncellenmesi durumunda ise güncellenme şekline ve kısıtlamalara göre kendi arasında üçe ayrılmaktadır: Model karşılaştırmalı takip (Tracking With Template Matching (TTM)) [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], genişletilmiş görünüm modeli karşılaştırmalı takip (Tracking Using Template Matching With Extended Appearance Model (TTMEAM)) [10], [11], [12], [13] ve kısıtlama ile model karşılaştırmalı takip (Tracking Using Template Matching With Constraints (TTMC)) [14], [15], [16]. Üretici yöntemlere ait genel akış diyagramı Şekil-1'de sunulmaktadır.



Şekil-1: Üretici Yöntemlere Ait Genel Akış Diyagramı

2.1. Model Karşılaştırmalı Takip (TTM)

Model karşılaştırmalı takip yaklaşımına dayalı algoritmalarda ya videonun başında oluşturulmuş gözlem modeli ya da hedefin bir önceki video imgesinden yinelemeli olarak tahmin edilen hedef modeli kullanılmaktadır. Bu yöntem içinde öne çıkan incelemelerden birisi **Düzgelenmiş Çapraz İlinti (Normalized Cross-Correlation (NCC))** yöntemidir [3]. Bu yöntem, hedef modelinin (referans) mevcut video imgesi üzerinde çapraz ilintilerini kullanmakta ve Fourier dönüşümünden daha hızlı bir şekilde hedefin bulunmasını sağlamaktadır. Hedef, dikdörtgensel temel fonksiyonların toplamı şeklinde modellendikten sonra ilinti işlemi gerçekleştirilmektedir.

Lucas Kanade takipçi (Lucas Kanade Tracker (KLT)) yöntemi [4] ise bir önceki video imgesinde tahmin edilen hedef modelini bir sonraki video imgesinde bulabilmek için hedef modelinin afin parametrelerini (yer değiştirme, dönme, ölçekleme) yinelemeli şekilde tespit etmektedir. En iyi eğrilme

parametresini bulabilmek için Gauss Newton Gradyan İnişi yöntemi kullanılarak hedef modeliyle hedef olmaya aday imge pencereleri arasındaki hata, yinelemeli şekilde, en aza indirgenmeye çalışılmaktadır.

Kalman Görünüm Takipçisine (Kalman Appearance Tracker (KAT)) [5] göre hedef modelini oluşturan pikseller renk uzayında sahip oldukları nitelik değerlerine göre takip edilmektedir. Takip işlemi, hedef modelini oluşturan her bir pikselin geçirdiği dönüşüme ait afin parametrelerin gradyan inişi algoritmasıyla bulunması esasına dayanır. Parametrelerin bulunması için hedef modelinin video boyunca yaşadığı görüntü değişimlerinin takip edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, piksellerin maruz kalacağı gürültü (ölçüm hatası, ışık değişimi vb.) Kalman süzgeciyle öngörülerek azaltılmaktadır. Kısmi örtüşme problemi Kalman süzgecinin ölçüm modelinde bulunan hata fonksiyonuyla birleştirilerek çözülmektedir.

Parça Tabanlı Gürbüz Takip yöntemi (Fragments-based Robust Tracking (FRT)) [6], hedef modelinin yatay ya da dikey olarak belirli sayıda küçük dikdörtgen pencerelere bölünerek takip edilmesi mantığına dayanmaktadır. Her pencereye ait renk histogramları [17]'de belirtildiği şekilde tümleşik imge çıkarılarak ifade edilmektedir. Birden fazla pencerenin kullanılması, takibi yapılması istenen hedefin konum bilgisinin kaybolmasını engellemektedir. Hedef modelinden alınan parçalar ile mevcut imge üzerinde alınan parçalar arasındaki benzerliğin ölçülmesinde Öklid Mesafesi ve Earth Mover's Mesafesi [18] (Earth Mover's Distance (EMD)) metrikleri kullanılmaktadır. Son aşamada hedef konumunun tahmin edilmesi amacıyla bir karar verici kullanılarak takip gerçekleştirilmektedir.

Düzensiz Yerel Takip (Locally Orderless Tracking (LOT)) [7] yönteminde ise hedef modeli üzerinde oluşacak yerel bozulmalar ya da değişimler takip edilmektedir. Hedef modeli ile hedef aday arasındaki benzerlik, süper piksel [19] sunumuyla ifade edildikten sonra parçacık süzgecinin olabirlik fonksiyonu olarak kullanılan EMD ile hesaplanmaktadır. Rotasyon ve ışık değişimi faktörleri parçacık süzgecinde kullanılan gürültü değişkenlerinin kullanılması ile modellenmekte ve yinelemeli olarak tahmin edilebilmektedir.

Model karşılaştırmalı bir diğer takip yöntemi olan **Ortalama kaydırma (Mean Shift Tracker (MST))** [8] yönteminde, hedef modeli ile aday imge pencereleri renk histogramları ile modellenmekte ve oluşturulan dağılımlar aralarındaki benzerlik Bhattacharyya uzaklık metriği kullanılarak bulunmaktadır. Bir sonraki imgede benzerliğin en fazla olduğu konumun belirlenmesi yinelemeli bir şekilde ortalama kaydırma algoritmasıyla gerçekleştirilir.

Tespit-ile-Takip ve Marjinal Parçacık Süzgecinin Birleştirilmesiyle Nesne Takibi (Object Tracking by Combining Tracking-by-Detection and Marginal Particle Filter (TDMPF)) [9] yönteminde ise dolanır matris teorisi ile hızlı Fourier dönüşümü kullanan Gauss çekirdeğine dayalı tespit-ile-takip yöntemiyle marjinal parçacık süzgeci yöntemi bir arada kullanılmaktadır. Marjinal parçacık süzgeci, takip edilen nesnenin etrafında yayılan her bir parçacığın ağırlıklandırılması için süzgecin ölçüm safhasında Gauss

çekirdeğinden elde edilen skorları kullanılmaktadır. Marjinal parçacık süzgeçleme ile durum değişkenleri güncellenerek nesne konumu, bu konuma ait düzeltme değerleri ile nesneyi çevreleyen imge penceresinin boyutları tahmin edilmektedir.

2.2. Genişletilmiş Görünüm Modeli Karşılaştırmalı Takip (TTMEAM)

Bu yaklaşımda hedef takibi, video değişimlerine karşı hedef modelinin yinelemeli olarak güncellenmesi esasına dayanır. Modelin yinelemeli olarak güncellenmesi alt uzayda kademeli temel bileşenler analizi ya da diğer alt uzay sunum tekniklerinin kullanılması ile gerçekleştirilmektedir.

Kademeli görsel takip (Incremental Visual Tracking (IVT)) [10], [20] yönteminde hedef hareketleri ve ortamdaki değişimlere karşı gürbüz bir şekilde takip yapılması amacıyla hedef, temel bileşenler analizinden faydalanarak alt uzayda modellenmektedir. Bu model, parçacık süzgecinin olabirlik fonksiyonunu kullanılarak hedefe ait konum, dönme ve ölçek bilgilerini takip etmeye çalışmaktadır.

Örnekleme Takipçileri ile Takip Yöntemi ((Tracking By Sampling Trackers) TST) [11] ise birden fazla takip ediciyi paralel olarak kullanılmaktadır. Her bir takip edici hareket modeli, gözlem modeli, durum denklem değişkenleri ve ölçüm modeli değişkenleri olmak üzere dört farklı unsurun bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu unsurların çeşitlendirilerek örnekleme yapılmasındaki ana fikir, takibin yapıldığı ortamda meydana gelen ışık değişimleri, örtüşme, gürültü, poz değişimleri, ani dinamik hareketlere karşı takibin gürbüz şekilde yapılmasıdır. Takip edicilerin sonsal dağılımları, Metropolis Hastings algoritması kullanılarak hesaplanmakta ve en büyük değere sahip takipçinin verileri ile takip yapılmaktadır. Takip edicilerin sayısı ve özellikleri, hareket ve görünüm değişkenlerine bağlı olarak yinelemeli bir şekilde belirlenmektedir.

Uyarlamalı Yapısal Yerel Seyrek Görünüm Modeli Kullanarak Görsel Takip (Visual Tracking Via Adaptive Structural Local Sparse Appearance Model (ASLA)) [12] yönteminde, seyrek (sparse) sunum tekniği kullanılarak hedefin konumsal ve bölümsel takibinin yapılması amaçlanmaktadır. Hedef modeli, birbiri ile örtüşecek şekilde alt pencerelere ayırarak ve bu pencerelerin öznitelikleri yerel seyrek kodlama tekniği ile bulunmaktadır. Pencerelere ait seyrek kodlar, modelin konumsal ve bölümsel bilgisini içermektedir. Hedef modeli ile hedef aday arasındaki benzerlik ölçütü ise muvazaat-havuzlama yöntemi ile elde edilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından birisi yerel seyrek kodların geçmişte bulunmuş olan hedef modelleri ile yinelemeli olarak güncellenmesidir. Güncellenme, seyrek sunum tekniği ile kademeli alt uzayda öğrenim yönteminin birleştirilmesi ile yapılmaktadır [10]. Bu şekilde, örtüşmenin yaşanmadığı hedef modellerine daha fazla önem verilerek kısmi örtüşmeye ve model değişimlerine karşı etkin bir algoritma elde edilmektedir. Örnekleme için ise parçacık süzgeci kullanılmaktadır.

Afin Grup Üzerinde Takip (Tracking on Affine Group (TAG)) [13] yönteminde ise, hedef modeli yinelemeli olarak güncellenmekte ve iki boyutlu afin dinamik hareket parçacık

süzgeci ile takip edilmektedir. Özellikle, yüksek dinamik hareket gösteren hedeflerin takibinde, durum denklem değişkenlerinin başarılı olarak tahmin edilmesi için en uygun önem fonksiyonunun bulunmasına yönelik araştırma yapılmaktadır.

2.3. Kısıtlama ile Model Karşılaştırmalı Takip (TTMC)

Hedef modeli, pencerelerden oluşacak şekilde seyrek sunum tekniği ile takip edilmeye çalışılmaktadır. Bu sayede tek bir çevreyici pencere ile yapılamayan takip işlemi birden fazla küçük pencere ile sağlanmaktadır.

Monte Carlo Örnekleme ile Takip (Tracking by Monte Carlo Sampling (TMC)) [14] yönteminde, hedef modeli yerel pencerelere ayrılarak modellenmekte ve takip edilmektedir. Pencerelerin, modelin merkezine göre örnekleme Basın Hopping Monte Carlo (BHMC) yöntemi ile yapılmakta olup, olabilirlik dağılımları, fotometrik olabilirlik dağılım modeli ile geometrik dağılım modelinin birleşimi ile elde edilmektedir. Önerilen yöntemin ana motivasyonu esnek ya da bükülebilir hedeflerin takibini sağlamaktır.

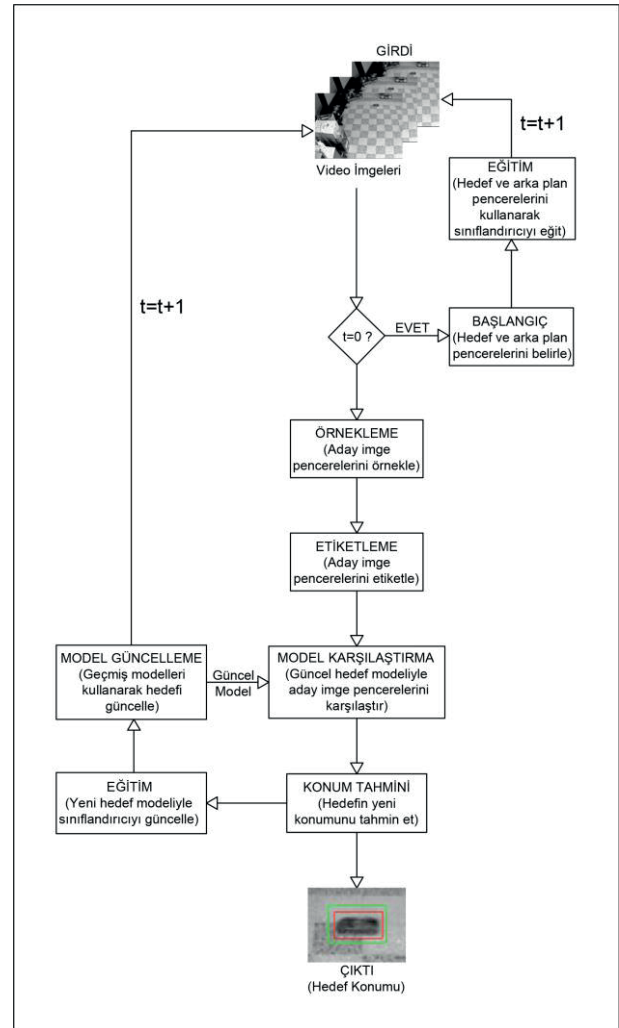
Yinelemeli Birleştirilmiş Katman Takibi (Adaptive Coupled Layer Tracking (ACT)) [15] yönteminde ise ani ve büyük ölçekli görünüm değişimi geçiren, esnek ya da bükülebilir hedef modeli, pencerelere bölünerek takip edilmektedir. Hedefin hızı Kalman süzgeci kullanılarak tahmin edilmekte, imge pencerelerinde hedef modelin takibi iki katmanlı olarak sağlanmaktadır. Yerel katmanda, pencerelerin zamana bağlı olarak geometrik ve görünüm değişimleri Bayesçi yaklaşımla tahmin edilmekte ve sonsal dağılımları yüksek olan pencereler genel katmanda kullanılmaktadır. Genel katmanda ise seçilen pencerelerin bir araya getirilmesiyle hedefin görsel özelliklerine (renk, görünen hareket (piksel hareketi), şekil) ait sonsal dağılım oluşturulmaktadır.

L1-Azaltma Takip yöntemi (L1-Minimization Tracker (L1T)) [16]'nde hedef takibi, seyrek sunum yöntemiyle parçacık süzgecini birlikte kullanan melez bir yaklaşımla yapılmaktadır. Pozitif (hedef olmaya aday) ve negatif (arkaplan olmaya aday) hedef modelleri seyrek sunum yöntemi kullanılarak seyrek matris oluşturulmakta ve tahmini hedef modeli bulunmaktadır. Pozitif ve negatif model katsayılarının L-1 azaltma yöntemi [21] ile güncellenmesi ile örtüşme ve gölge etkileri giderilirken, örnekleme için parçacık süzgecinden istifade edilmektedir. Bu güncellenmenin sonucunda hedef modeline ait seyrek sunum bulunmakta, parçacık süzgeci ile afin dönüşüme ait altı adet parametrenin (deformasyon için dört adet ve iki boyutlu hareket için iki adet) takibi gerçekleştirilmektedir.

3. Ayırdedici Yöntemler

Ayırdedici yöntemler, hedef modeli ile arkaplanın birbirinden ayırt edilmesi yoluyla model takibini gerçekleştirmektedirler. Hedef ile arkaplanın modellenmesi için basit etiketleme-geçirgen teknikleri, yapılandırılmış destek vektör makineleri ile derin öğrenme teknikleri kullanılmaktadır. Üretici yöntemlere nazaran en göze çarpan farklılık, hedef takibi

yanında arkaplanın da modellenerek takibinin yapılmasıdır. Ayırdedici yöntemler kendi içerisinde 3 gruba ayrılabilir: ayırdedici sınıflandırma ile takip (Tracking With a Discriminative Classifier (TDC)) [22], [23], [24], [25], [26] kısıtlama ile ayırdedici sınıflandırma kullanarak takip (Tracking Using Discriminative Classifier With Constraints (TDCC)) [27], [28], [29], [30], derin öğrenme ile görsel takip (Tracking With Deep Learning (TDL)) [31], [32]. Ayırdedici yöntemlere ait genel akış diyagramı Şekil-2'de sunulmaktadır.



Şekil-2: Ayırdedici Yöntemlere Ait Genel Akış Diyagramı

3.1. Ayırdedici Sınıflandırma İle Takip Yöntemi (TDC)

Hedef modeli ile arkaplanı öğrenmek için ayırdedici fonksiyon, adaboost ve Pozitif-Negatif öğrenme gibi yöntemlerle örneklenen imge pencereleri etiketlenerek hedef takibi yapılmaktadır.

Önplan-Arkaplan takip yöntemi (Foreground-Background Tracker (FBT)) [22], hedef modeli ile arkaplanı ayırmak için desene dayalı ayırdedici bir yöntem kullanılmaktadır. Hedef modeline ve arkaplanına ait imge pencerelerinin desen özellikleri Gabor süzgeciyle çıkarıldıktan sonra doğrusal ayırma analizi [33] uygulanarak en iyi ayırdedici sınıflandırıcı bulunmaktadır. Arkaplan desen özelliklerinin takip süresine

dahil edilmesi, arkaplanı değerlendirmeyen hedef takip yöntemlerine nazaran üstünlük sağlamaktadır. Özetle, hedef takip problemi, hedef ile arkaplan imge pencerelerinin öznitelik uzayında maksimum ayırımı sağlayan vektörün bulunması problemine dönüştürülmektedir.

Birden Fazla Örnek Öğrenme takip yöntemi (Multiple Instance Learning Tracker (MIT)) [23] ile ayırıcı sınıflandırıcı eğitilerek hedef modeli, arkaplan imge pencerelerinden ayrılabilir. Hedef modeli durum denklemleri ile dinamik olarak ifade edilmektedir. Durum değişkenlerine, hedef konumu dahil edilmekte, ölçek ve dönme parametreleri hariç tutulmaktadır. Hedef modeline benzer imge pencereleriyle arkaplana benzer imge pencereleri bireysel olarak etiketlenmek yerine dahil oldukları imge havuzları etiketlenmektedir. En az bir hedef modeline benzer imge penceresi bulunan havuz pozitif olarak etiketlenirken, arkaplan imge pencerelerinin bulunduğu havuz(lar) ise negatif olarak etiketlenmektedir. Havuzlarda bulunan imge pencerelerinin öğrenilmesinde Gerçek Zamanlı Ada-Boosting [34] kullanılmaktadır. Zayıf Haar öznitelik çıkarıcılarının biraya getirilmesi ile güçlü Haar öznitelikleri oluşturulmakta ve bu şekilde görüntüdeki değişimlere karşı gürbüz hedef takibi gerçekleştirilebilmektedir.

Takip, Öğrenme ve Tespit (Tracking, Learning and Detection (TLD)) [24] yöntemi, Lucas Kanade takip algoritması ile ikili sınıflandırıcı öğrenim yöntemini birlikte kullanarak takibin yapılmasını sağlamaktadır. Hedef modeli olmaya aday pencerelerin etiketleri, hedefin hareket izine olan uzaklıkları referans alınarak pozitif-negatif öğrenim yöntemiyle güncellenmektedir. Bir sonraki video imgesinde, yeni örneklenen ile geçmişte etiketleri düzeltilmiş olan pencereler kullanılarak sınıflandırıcı yeniden eğitilmekte ve Lucas Kanade takibi yapılmaktadır. Bu yöntemin başarısı, pozitif-negatif öğrenme yöntemindeki kısıtlayıcılarının “hata azaltım” özelliğine bağlıdır.

Çekirdekleştirilmiş İlinti Süzgeci (Kernelized Correlation Filter (KCF)) [25], [26]’nde tespit ile takibin hızlı bir şekilde yapılabilmesi için dolanır matrisin ayrık Fourier dönüşümü ile olan bağıntısı ortaya konulmaktadır. Dolanır matrisin satırları, hedef modeli ile modelin çevrimsel kaydırmalarından oluşmaktadır. İmge pencerelerinin öğrenilmesi için sırt regresyonu, ayrık Fourier dönüşümü ile frekans uzayında tanımlanmaktadır. İmge pencerelerinin öğrenilmesi sonrasında elde edilen ağırlık parametreleri frekans uzayında test imgeleri ile çarpılarak hedefin muhtemel konumu bulunmaktadır. Öğrenme sırasında, üç boyutlu renk öznitelikleri ya da yönlü gradyan histogram öznitelikleri kullanmakta ve sırt regresyon problemi, çekirdek hilesi kullanılarak doğrusal hale getirilmektedir. [26]’da ise doğrusal çekirdeğin ikili uzayda tanımlanan yeni katsayılar ile birleştirilmesiyle **ikili korelasyon süzgeci (Dual Correlation Filter (DCF))** elde edilmektedir. Bu süzgeç, çekirdekleştirilmiş ilinti süzgecinin görevini, çekirdek hilesi kullanarak ikili uzayda yerine getirmektedir.

3.2 Kısıtlama İle Ayırıcı Sınıflandırma Kullanarak Takip Yöntemi (TDCC)

Bu sınıfta bahsedilen yöntemler, hedef modelinin ve

arkaplanın destek vektör makineleri ile eğitilmesi yoluyla sınıflandırıcı fonksiyonun değişen takip koşullarına göre güncellenmesi prensibine dayanmaktadır. Bu sayede yapılandırılmış destek vektör makinelerinin imge pencerelerine ait etiket değeri yerine hedef modelini çevreleyen pencerenin tahmini değeri elde edilmektedir.

Çekirdekler ile Yapılandırılmış Çıktı Takibi (Structured Output Tracking With Kernels (STRUCK)) [27], [28] yönteminde yinelemeli takip yapılması amacıyla çekirdekleştirilmiş ve yapılandırılmış destek vektör makinelerinden yararlanılmaktadır. STRUCK yönteminde amaç, örnekleme ve etiketleme işlemlerini ayrık yapmak yerine doğrudan video imgeleri arasında yaşanan dönüşümleri tespit ederek takip yapmaktır. Öğrenme problemi, karesel en iyileme (LaRank) [35] ve ardışık en küçükleme ile en iyileme (Sequential Minimization Optimization (SMO)) [36] tekniğinin kullanılması ile çözümlenmektedir. [27]’de sadece iki boyutlu hareket değişkenleri kullanılırken, [28]’de ise iki boyutlu hareket değişkenine ek olarak ölçekleme değişkeni de kullanılmaktadır. Örnekleme amacıyla farklı arama yarıçaplarına bağlı basit bir mekanizma kullanılmakta ve model, kaba piksel değerleri, Haar veya histogram öznitelikleri ile tanımlanmaktadır. Öğrenme süresince ise doğrusal, Gauss ve kesişim çekirdeklerinden faydalanılmaktadır. [28]’de göze çarpan bir diğer gelişme de THUNDERSTRUCK yöntemiyle imge işlem hızının artırılmış olmasıdır. Ancak işlem hızı artırılırken, elde edilen sonuçlar STRUCK yöntemine göre azalma göstermektedir.

Son zamanlarda yapılandırılmış destek vektör makinelerinin kullanılması ile hedef takibinde ciddi gelişmeler yaşanmaktadır. Ancak bahse konu yöntemlerde, işlem süresini arttıran en iyileme ya da regresyon yöntemleri kullanmasından dolayı gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımları kısıtlı olmaktadır. Bu problemi çözmek ve daha hızlı öğrenme ile takibin yapılmasını sağlamak amacıyla, **İkili Lineer Yapılandırılmış Destek Vektör Makineleri Kullanarak Hedef Takibi (Object Tracking via Dual Linear Structured SVM and Explicit Feature Map (DLSSVM))** [29] yöntemi öne sürülmüştür. Birincil doğrusal denklemin kapalı formda bulunmasıyla katsayıların kademeli olarak öğrenilmesi için çok yüksek boyutlu öznitelik vektörlerinin kullanımı mümkün olmaktadır. Bu sayede takibin güvenilirliği artırılırken, kesişim çekirdeğinde öznitelik haritalarının kullanılması ile de doğrusal olmayan karar sistemi takip problemine dahil edilmektedir. Öznitelik haritaları, CIE Lab [30] renk uzayına dayanan öznitelik sunumu [37] ile parametrik olmayan yerel kademe dönüşümünün (non-parametric local rank transform (LRT)) birlikte kullanılmasıyla elde edilmektedir. Bu haritalar [38] tek bileşenli sunum tekniği ile yeniden şekillendirilmektedir. LRT, ışık değişimine karşı olan zayıflığın azaltılması için kullanılmakta olup, doğrusal öğrenme problemi, [39] basit ikili koordinat iniş (basic dual coordinate descent (DCD)) yöntemi ile çözümlenmektedir. Böylece ağırlık katsayısı, SMO’nun aksine her yinelemede kademeli olarak öğrenilmektedir. Öğrenme sonucunda yapılandırılmış çıktıya en yüksek değeri sağlayan afin dönüşüm hedefe ait konum olarak kabul edilmektedir.

Hedef takip problemlerinde yaşanan bir diğer problem ise hedef modelinde sapmaların meydana gelmesidir. **Entropi**

Azaltma Kullanarak Birden Çok Uzman Vasıtasıyla Gürbüz Takip (Robust Tracking via Multiple Experts Using Entropy Minimization (MEEM)) [30] yönteminde sapma probleminin giderilmesi amacıyla birden fazla uzman kullanım yaklaşımı izlenmektedir. Bu sayede hatalı model güncellenirken geçmişten gelen uzmanlar (geçmiş anlık modeller) kullanılarak hedef tahmini düzeltilmektedir. Bu amaçla, düzenlenmiş entropi eniyilemesi [40] ile kısmi-etiket öğrenme (partial-label learning) birlikte kullanılarak kayıp/hata fonksiyonu çözülmektedir. Takip algoritmasının çatisını oluşturan tespit-ile-takip kısmı ise doğrusal destek vektör makinelerinin öznelilik haritaları [38] ile birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Öznelilik haritaları, DLSSVM [29]'deki gibi bulunmakta ve kesişim çekirdeği kullanılarak doğrusal olmayan ayırdedici sınıflandırıcı bulunabilmektedir. Bu yöntem sayesinde geçmiş ya da mevcut hedef modelinde oluşan sapmaların tespiti ve onarımı için modelin geçmişe doğru güncellenmesi yapılmaktadır.

3.3. Derin Öğrenme İle Görsel Takip Yöntemi (TDL)

Son zamanlarda görsel takip uygulamalarında derin öğrenme yaklaşımlarından çokça faydalanılmaktadır. Gerçek zamanlı ya da çevrim dışı olarak geleneksel sinir ağları kullanılarak hedeften ve arkaplan örneklemelerinden öznelilik çıkarılmaktadır. Bu öznelilikler, ilinti süzgeçleri ile öğrenilmekte ve hedef takip edilmektedir.

Hirerşik Evrişimsel Öznelilikler ile Görsel Takip (HCFT (Hierarchical Convolutional Features for Visual Tracking)) [31] yönteminde geleneksel sinir ağları ile doğrusal ilinti süzgeçleri birlikte kullanılmaktadır. Hedefin gözlem modelindeki sapma probleminin engellenmesi için sinir ağının her katmanından elde edilen özellikler, doğrusal ilinti süzgecinden geçirilerek örneklenmektedir. **Derin Takip (Deep Track (DT))** [32]'te ise dört seviye evrişimli sinir ağlarından faydalanılarak hedefi en iyi ayırtıran öznelilik bulunmakta ve takip gerçekleştirilmektedir. Takip algoritması, Olasılıksal Gradyan İniş (Stochastic Gradient Descent (SGD)) en iyileştirme yöntemi ile Gauss dağılım örneklemesini birlikte kullanmaktadır. İmge pencerelerinden çıkarılan üç adet ayrı öznelilik (iki adet farklı parametrelerle yerel olarak normalleştirilmiş öznelilikler ve bir adet gradyan özneliği) eş zamanlı olarak evrişimsel sinir ağlarına uygulanmakta ve elde edilen skora göre o anki tahmini hedef durumu tespit edilmektedir.

4. Karşılaştırma Ölçütleri

Bahsedilen yöntemlerin başarımlarının adil olarak karşılaştırılması için kullanılacak video bilgi bankaları [1], [2]'de belirtilmiştir. [41] ALOV300++ (Amsterdam Library of Ordinary Videos) video bilgi bankasında takibi zorlaştıran birçok durumun yansıtıldığı yaklaşık üç yüz adet video bulunmaktadır. Ayrıca literatürde sıklıkla kullanılmakta olan ve kesin referans (groundtruth) bilgisi bulunan videoların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuş olan TB (Tracking Benchmark)-100 ve TB-50 video bilgi bankaları [42] yer almaktadır.

Hedef takibinin en önemli unsurlarından birisi de takip yönteminin başarısının ölçülmesidir. Bu ölçümlerin

yapılabilmesi için literatürde birden fazla metrik öne sürülmektedir. Bu metrikler belirlenirken hedef ile kesin referans arasındaki pozisyon bilgisinin doğruluğu, video süresince hedefte oluşabilecek görsel değişimlere karşı gürbüz ölçüm yeteneği gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Yalnızca bir hedefin takibi amacıyla kullanılan en genel metriklere [1]'de yer verilmektedir. Takip süresince referans alınan 3 hata tipi mevcuttur.

- Sapma: Takip edilen hedef konumunun kesin referans değerinden sapması.
- Yanlış Pozitif: Takip algoritmasının hedef olmayan bir nesneyi hedef olarak tanımlaması.
- Yanlış Negatif: Takip algoritmasının hedefi tanımlayamayıp yerini saptayamaması

Hedefi çevreleyen pencere ile kesin referans penceresinin örtüşme miktarını ölçmek maksadıyla kullanılan en yaygın yöntem PASCAL metriği olup (1)'de belirtilmiştir.

$$\frac{|H^i \cap KR^i|}{|H^i \cup KR^i|} \geq 0.5 \quad (1)$$

H^i , i'ninci video imgesinde hedefi çevreleyen pencereyi, KR^i ise kesin referans penceresini temsil etmekte olup, şartın sağlanması durumunda takibin başarı ile yapıldığı anlaşılmaktadır. Tablo-1'de sunulan metriklerin hesaplanmasında ise doğru pozitif, yanlış pozitif ve yanlış negatiflerin sayısını belirten n_{dp}, n_{yp}, n_{yn} parametreler kullanılmakta olup hassasiyet (precision) ve anımsama (recall) sırasıyla $n_{dp}/n_{dp} + n_{yp}$ ve $n_{dp}/n_{dp} + n_{yn}$ ile hesaplanmaktadır.

Tablo-1'de belirtilen metriklerin yanı sıra, tek-geçişli değerlendirme (One-Pass Evaluation (OPE)), zamansal gürbüzlük değerlendirmesi (Temporal Robustness Evaluation (TRE)) ve konumsal gürbüzlük değerlendirmesi (Spatial Robustness Evaluation (SRE)) yaklaşımları ile de takip algoritmasının gürbüzlüğü değerlendirilmektedir. OPE yaklaşımında, hedef takibi, ilk imgede kesin referans bilgisi kullanılarak başlatılır ve video sonuna kadar doğruluk ya da başarı ölçümü Tablo-1'de belirtilen metriklerle hesaplanmaktadır. TRE yaklaşımında, her hedef takip denemesine farklı bir imgeden başlanmakta ve elde edilen sonuçlar deneme adedine bölünerek ortalama başarı hesaplanmaktadır. SRE yaklaşımında ise takibe kesin referans bilgisine gürültü eklenmesi ile başlanarak hedef tespitinin hatalı yapıldığı durumların benzetimine olanak sağlanmaktadır.

5. Genel Değerlendirme

Bu bölümde şu ana kadar bahsedilen yöntemler hakkında objektif değerlendirmelere yer verilmektedir. Değerlendirmeler referanslarda sunulan sonuçlara göre yapılarak yöntemler karşılaştırılmaktadır.

Üretici yöntem grubuna dahil olan **hedef modeli kullanarak hedef takibi** yapan NCC [3], işlem hızı ile ön plana çıkarken hedef modelinin yinelenmeli olarak güncellenmemesi hedef takibini zorlaştırmaktadır. **KLT** [4] ile afin dönüşüm parametreleri başarılı şekilde takip edilmekte; **KAT** [5] ile

afin dönüşüm parametreleri başarı ile hesaplanmakta ve kısmi örtüşme durumunda hedef modeli güncelleme mekanizması durdurulmaktadır. Bu sayede hedef modelinin hatalı olarak güncellenmesi engellenmektedir. **FRT** [6] yönteminde ise esnek olmayan, parçalı bir hedefin takibi için ilerleme sağlanmakta ve EMD uzaklık metriğinin kullanımıyla doğruluk oranını arttırılmaktadır. Ancak örnekleme yönteminin ilkel olması dinamik hareketin takibinde problem yaratmakta ve hedef modelinin yinelemeli olarak güncellenmemesi ani poz değişimlerine karşı hatayı arttırmaktadır. **LOT** [7]'ta göze çarpan en önemli özellik parçacık süzgecinin dinamik hareketin takibinde örnekleme amacıyla kullanılmasıdır. Yöntemin zayıf tarafı ise gri seviyeli imgelerle çalışmaya olanak sağlamamasıdır. Hedef modelinin yinelemeli olarak güncellenmesi ile hedef takip başarısı arttırılmaktadır. **TDMPF** [9], dolanır matris teorisi ile hızlı Fourier dönüşümü kullanan Gauss çekirdeğine dayalı tespit-ile-takip yöntemiyle marjinal parçacık süzgecini birleştirerek hızlı dinamik harekete karşı gürbüz takip yapmaktadır. Bunu sağlayan yöntemlerden bir diğeri olan **IVT** [10]'da ise hedef temel bileşenlerinin kademeli olarak yinelenmesi ve hedef modelinin oluşturulması yöntemin, gözlem değişimlerine karşı gürbüz olmasını sağlarken parçacık süzgecinin kullanımı dinamik hareketlere karşı bağımsızlık sağlamaktadır. **TST** [11]'de ise diğer yöntemlerden farklı olarak birden fazla takip edicinin kullanılması takibin daha güvenilir yapılmasına olanak sağlamaktadır. **ASLA** [12]'da hedef modeli yinelemeli olarak güncellenerek parçacık süzgecinin kullanımı ile dinamik hareketin takibi gerçekleştirilebilmektedir. **Kısıtlama ile model takibinde** kullanılan yöntemler: **TMC** [14], **ACT** [15], **LIO** [16], esnek ya da bükülebilir olmayan ve yüksek gözlem değişimi geçiren hedeflerin takibinde başarı sağlamaktadır. **Ayırddedici yöntem** grubunda bulunan ve ayırddedici sınıflandırma kullanılarak hedef takibi yapan **FBT** [22] yöntemi, hedef ve arkaplan ayırımında arkaplanın hedef modeline benzerlik gösterdiği durumlarda problem yaşamaktadır. **MIT** [23]'te ise Haar özniteliklerinin kullanımının ölçek değişimine ve dönmeye karşı bağımsızlık sağlarken örneklemin ilkel olarak yapılmasının dinamik harekete karşı zayıflık oluşturduğu belirtilmektedir. **KCF** [25], [26] literatürde çok yüksek işlem hızı, basit algoritması ve doğruluk oranı ile öne çıkmaktadır. Ancak yöntem herhangi bir hata tespit ya da hareket modeli bulma fonksiyonuna sahip olmamakta, afin dönüşüm parametresi (ölçek, dönme, yer değiştirme vb.) bulmaya yönelik hesaplama yapmamaktadır.

Ayırddedici sınıflandırmayı destek vektör makineleri kullanarak yapan yöntemlerden biri olan **STRUCK** [27], [28]'ta kaba piksel değerlerinin doğrusal çekirdek ile, Haar özniteliklerinin Gauss çekirdeği ile histogram özniteliklerinin ise kesişim çekirdeği ile kullanılması sonucunda en iyi takip başarı ve doğruluk değerlerinin elde edildiği anlaşılmaktadır. En iyi sonuçlar, Gauss çekirdeği ile Haar özniteliklerinin birlikte kullanılması ile bulunmaktadır. **THUNDERSTRUCK** yöntemi ise **STRUCK** denemelerine göre daha başarılı sonuç vermemesine rağmen imge işleme hızının yüksek olması ile dikkat çekmektedir. Örneklemin ilkel yapılması dinamik harekete karşı zafiyet yaratmaktadır. **DLSSVM** [29]'de oluşturulan öznitelik haritalarının, tek bileşenli sunum tekniği ile ifade edilmesi hedef takibini hem doğruluk hem de başarımlı açısından geliştirmektedir. **MEEM** [30] özellikle ciddi örtüşme ya da gözlem değişimi geçiren hedeflerin bulunduğu

videolarda daha başarılı olmaktadır. Bu durum hedef modelinin geriye doğru öğrenilmesinden kaynaklanmaktadır. Literatürde son yıllarda ilgi çekmekte olan diğer bir çalışma ise **derin öğrenme** yaklaşımını temel alan **HCFT** [31] yöntemidir. Bu yöntem geleneksel sinir ağları ile doğrusal ilinti süzgeçlerini birleştirerek hedef takibinde yüksek doğruluk ve başarıya imza atmıştır. Ancak hata oluşması durumunda gözlem modelinin yeniden düzeltilmesine olanak sağlayacak bir kontrol ya da yeniden tespit algoritmasına sahip olmaması zayıf yönü olarak ifade edilebilir. **DT** [32], modeli arkaplandan ayıran en iyi özniteliklerin öğrenilmesinde başarı sağlamaktadır. **SGD**'de kullanılan hata fonksiyonunun modifiye edilmesi ile yöntemin hızı arttırılmakta olup **SGD** ile Gauss dağılım örneklemesinin birleştirilmesi ile model değişimlerine ve etiketleme hatalarına karşı gürbüz sonuç elde edilmektedir.

Verilen tüm bilgiler ışığında incelenen yöntemlere ait özellikler ile avantajlı/dezavantajlı olduğu konular Tablo-2'te sunulmuştur.

6. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Hedef takibi problemi, sabit ya da hareketli bir kameradan alınan video bilgisi üzerinde ilgilenilen nesnenin izlenmesi olarak tanımlanabilmektedir.

Gerçek zamanlı hedef takibinin doğru ve sürdürülebilir olarak gerçekleştirilebilmesi için takip yönteminin, ortamda meydana gelebilecek ışık değişimi, düzlem dışı dönüş, ölçek değişimi, örtüşme, bozulma, hareket bulanıklığı, hızlı dinamik hareket, düzlem içi dönüş, görüş açısının dışına çıkılması, arkaplan ile karışım ve düşük çözünürlük gibi olumsuzluklara karşı başarılı bir şekilde çalışması gerekmektedir. Bu makalede, yukarıda adı geçen problemlerin çözülmesi için geliştirilen **üretici yöntemler** ile **ayırddedici yöntemler** grubuna dahil 21 adet yöntem incelenmiştir. Üretici yöntemler takip süresince sadece hedefe önem verirken, ayırddedici yöntemler aynı anda hem hedefin hem de arkaplanın takip edilmesine olanak sağlamaktadır. Yapılan inceleme ve ortaya çıkan değerlendirme sonucunda gözlem süresince oluşan problemlerin tamamına karşı gürbüz çalışan bir yöntem henüz geliştirilememiş olup yöntemler önceden belirlenmiş problemlere yönelik olarak tasarlanmışlardır.

Görsel hedef takip çalışmaları tarihsel olarak incelendiğinde; basit hedef modeli ile arama yaklaşımıyla başlamış yıllar içinde çok farklı yöntemler önerilmiş ve son yıllarda hedef ve arkaplan sınıflandırmasına dayalı özellikle yapısal destek vektör makineleri ve derin öğrenme yöntemlerini kullanan algoritmalarla belirli bir noktaya ulaşılmıştır. Bu kapsamda gelecekte yapılacak araştırmaların, derin öğrenme veya diğer ayırddedici algoritmaların (marjinal) parçacık süzgeçleri ile desteklenerek esnek olmayan hedeflerin de takibine imkan sağlanması yönünde gelişeceği öngörülmektedir. Ayrıca birden fazla hedefin eş zamanlı olarak olasılık hipotez yoğunluk (Probability Hypothesis Density (PHD)) süzgeci ile takibi, takibin yapıldığı sahneye yeni giren ya da çıkan hedeflerin tespit ve takibi gibi problemlerin ise gelecek araştırmalara yön vereceği düşünülmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] A.W. M. Smeulders, D. M. Chu, R. Cucchiara, S. Calderara, A. Dehghan, and M. Shah. "Visual Tracking: An Experimental Survey. PAMI, 36(7):1442–1468, 2014.
- [2] Y. Wu, J. Lim, and M.-H. Yang. "Online Object Tracking: A Benchmark. In CVPR, 2013.
- [3] K. Briechele and U. D. Hanebeck, "Template Matching Using Fast Normalized Cross Correlation," in Proc. SPIE, vol. 4387. 2001, pp. 95–102.
- [4] S. Baker and I. Matthews, "Lucas-Kanade 20 Years on: A Unifying Framework," IJCV, vol. 56, no. 3, pp. 221–255, 2004.
- [5] H. T. Nguyen and A. W. M. Smeulders, "Fast Occluded Object Tracking By A Robust Appearance Filter," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 26, no. 8, pp. 1099–1104, Aug. 2004.
- [6] A. Adam, E. Rivlin, and I. Shimshoni, "Robust Fragments-Based Tracking Using The Integral Histogram," in Proc. IEEE CVPR, Washington, DC, USA, 2006.
- [7] D. L. Shaul Oron, Aharon Bar-Hillel, and S. Avidan, "Locally Orderless Tracking," in Proc. IEEE CVPR, Providence, RI, USA, 2012.
- [8] D. Comaniciu, V. Ramesh, and P. Meer, "Real-time Tracking of Non-rigid Objects Using Mean Shift," in Proc. IEEE CVPR, Hilton Head Island, SC, USA, 2000. 53_MST
- [9] Maraş, Bahri, Nafiz Arica, and Ayşın Baytan Ertüzün. "Object tracking by combining tracking-by-detection and marginal particle filter." Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), 2016 24th. IEEE, 2016.
- [10] D. A. Ross, J. Lim, and R. S. Lin, "Incremental Learning For Robust Visual Tracking," IJCV, vol. 77, no. 1–3, pp. 125–141, 2008.
- [11] E. Maggio and A. Cavallaro, "Tracking By Sampling Trackers," in Proc. IEEE ICCV, Barcelona, Spain, 2011, pp. 1195–1202.
- [12] X. Jia, H. Lu, and M.-H. Yang, "Visual Tracking Via Adaptive Structural Local Sparse Appearance Model," in Proc. IEEE Conf. Comput.Vis. Pattern Recognit., 2012, pp. 1822–1829.
- [13] J. Kwon and F. C. Park, "Visual Tracking Via Geometric Particle Filtering on the Affine Group With Optimal Importance Functions," in Proc. IEEE CVPR, Miami, FL, USA, 2009. 56_TAG
- [14] J. Kwon and K. M. Lee, "Tracking of a Non-Rigid Object Via Patch-based Dynamic Appearance Modeling
- [15] L. Cehovin, M. Kristan, and A. Leonardis, "An Adaptive Coupled-layer Visual Model For Robust Visual Tracking," in Proc. IEEE ICCV, Barcelona, Spain, 2011.
- [16] X. Mei and H. Ling, "Robust Visual Tracking Using L1 Minimization," in Proc. IEEE 12th ICCV, Kyoto, Japan, 2009.
- [17] F. Porikli. "Integral Histogram: A Fast Way To Extract Histograms In Cartesian Spaces." In Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2005.
- [18] Y. Rubner, C. Tomasi, and L. Guibas. "The Earth Mover's Distance As a Metric For Image Retrieval." Int. Journal of Computer Vision (IJCV), 40(2):91–121, 2000.
- [19] S. S. Boltz, F. Nielsen, "Earth Mover Distance On Superpixels," ICIP, 2010.
- [20] M. Isard and A. Blake, "A Mixed-State Condensation Tracker With automatic Model-Switching," in Proc. 6th ICCV, Bombay, India, 1998.
- [21] Schmidt, M. (2005). "Least Squares Optimization With L1-norm Regularization," Technical report, CS542B Project Report.
- [22] H. T. Nguyen and A. W. M. Smeulders, "Robust Track Using Foreground-background Texture Discrimination," IJCV, vol. 68, no. 3, pp. 277–294, 2006.
- [23] B. Babenko, M.-H. Yang, and S. Belongie, "Visual Tracking With Online Multiple Instance Learning," in Proc. IEEE CVPR, Miami, FL, USA, 2009.
- [24] Z. Kalal, J. Matas, and K. Mikolajczyk, "P-N Learning: Bootstrapping Binary Classifiers by Structural Constraints," in Proc. IEEE CVPR, San Francisco, CA, USA, 2010.
- [25] J. F. Henriques, R. Caseiro, P. Martins, and J. Batista. "Exploiting The Circulant Structure of Tracking-by-Detection With Kernels," In ECCV, 2012.
- [26] J. F. Henriques, R. Caseiro, P. Martins, and J. Batista. "Highspeed Tracking With Kernelized Correlation Filters," PAMI, 2014.
- [27] S. Hare, A. Saffari, and P. H. Torr. "Struck: Structured Output Tracking With Kernels," in ICCV, 2011.
- [28] S. Hare, S. Golodetz, A. Saffari, V. Vineet, M. M. Cheng, S. L. Hicks, P. H. S. Torr, "Struck: Structured Output Tracking with Kernels", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015.
- [29] Jifeng Ning, Jimei Yang, Shaojie Jiang, Lei Zhang and Ming-Hsuan Yang. "Object Tracking Via Dual Linear

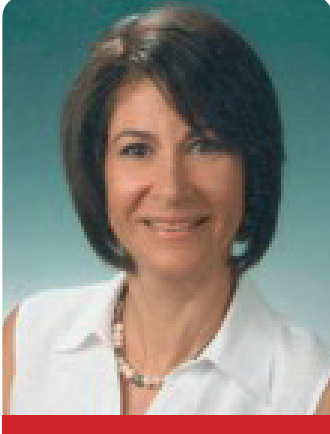
- Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4266-4274, Las Vegas, USA, 2016.
- [30] J. Zhang, S. Ma, and S. Sclaroff. "MEEM: Robust Tracking Via Multiple Experts Using Entropy Minimization," in ECCV, 2014.
- [31] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks For Large-scale Image Recognition," ICLR, 2015.
- [32] H. Li, Y. Li, and F. Porikli, "Deeptrack: Learning Discriminative Feature Representations By Convolutional Neural Networks For Visual Tracking," in BMVC, 2014.
- [33] Welling M. "Fisher Linear Discriminant Analysis," notes for Linear Discriminant Analysis.
- [34] Grabner H., Grabner M., Bischof H. "Proceedings of the British Machine Vision Conference" (BMVC'06), Vol. 1 (2006), pp. 47-56.
- [35] Antoine Bordes, Leon Bottou, Patrick Gallinari, Jason Weston, "Solving Multiclass Support Vector Machines With LaRank," Proceedings of The 24 th International Conference on Machine Learning, p. 89-96, June 20-24, 2007, Corvallis, Oregon , USA.
- [36] J. C. Platt, "Fast Training of Support Vector Machines Using Sequential Minimal Optimization," MIT Press, 1999, pp. 185-208.
- [37] Zabih, R., Woodfill, J., "Non-parametric Local Transforms For Computing Visual Correspondence," In: Eklundh, J.-O. (ed.) ECCV 1994. LNCS, vol. 801, Springer, Heidelberg (1994)
- [38] Maji, S., Berg, A.C., "Max-margin Additive Classifiers For Detection," In: CVPR (2009)
- [39] D. Ramanan, "Dual Coordinate Solvers For Large-scale Structural SVMs," in <http://arxiv.org/abs/1312.1743>, 2014.
- [40] Grandvalet, Y., Bengio, Y., "Semi-supervised Learning By Entropy Minimization," in: NIPS (2005)
- [41] Alov300.org, 'Amsterdam Library of Ordinary Videos for Evaluating Visual Trackers Robustness'. [Online] . Available: <http://www.alov300.org/>.
- [42] Cvlab.hanyang.ac.kr, 'Visual Tracker Benchmark'. [Online]. Available: http://cvlab.hanyang.ac.kr/tracker_benchmark/datasets.html
- [43] Ri.cmu.edu, 'Lucas-Kanade 20 Years On'. [Online]. Available: http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=515&menu_id=261
- [44] Cs.technion.ac.il, 'Fragtrack-Robust Fragments-based Tracking Using the Integral Histogram'. [Online]. Available: <http://www.cs.technion.ac.il/~amita/fragtrack/fragtrack.htm>
- [45] Eng.tau.ac.il, 'Locally Orderless Tracking'. [Online]. Available: <http://www.eng.tau.ac.il/~oron/LOT/LOT.html>
- [46] Cs.toronto.edu, 'Incremental Learning for Robust Visual Tracking'. [Online]. Available: <http://www.cs.toronto.edu/~dross/ivt>
- [47] Cv.snu.ac.kr, 'Tracking by Sampling Trackers'. [Online]. Available: <http://cv.snu.ac.kr/research/~vts/>
- [48] Faculty.ucmerced.edu, 'Visual Tracking via Adaptive Structural Local Sparse Appearance Model'. [Online]. Available: http://faculty.ucmerced.edu/mhyang/project/cvpr12_jia_project.htm
- [49] Cv.snu.ac.kr, 'Tracking of a Non-Rigid Object via Patch-based Dynamic Appearance Modeling and Adaptive Basin Hopping Monte Carlo Sampling'. [Online]. Available: <http://cv.snu.ac.kr/research/~bhmctracker/>
- [50] Vicos.si, 'Visual Tracking using Global and Local Visual Information'. [Online]. Available: <http://www.vicos.si/Research/LocalGlobalTracking>
- [51] Dabi.temple.edu, 'L1 Tracker' . [Online]. Available: http://www.dabi.temple.edu/~hbling/code_data.htm#L1_Tracker
- [52] Vision.ucsd.edu, 'Tracking with Online Multiple Instance Learning'. [Online]. Available: http://vision.ucsd.edu/~bbabenko/project_miltrack.html
- [53] Github.com, 'Tracking, Learning and Detection'. [Online]. Available: <https://github.com/mrgloom/openTL-D-1/find/master>
- [54] Robots.ox.ac.uk, 'Kernelized Correlation Filters'. [Online]. Available: <http://www.robots.ox.ac.uk/~joao/circulant/>
- [55] Samhare.net, 'Struck:Structured Output Tracking with Kernels'. [Online]. Available: <http://www.samhare.net/research/struck>
- [56] Comp.polyu.edu.hk, 'Object Tracking via Dual Linear Structured SVM and Explicit Feature Map'. [Online]. Available: <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~cslzhang/DLSSVM/DLSSVM.htm>
- [57] Cs-people.bu.edu, 'MEEM: Robust Tracking via Multiple Experts using Entropy Minimization'. [Online]. Available: <http://cspeople.bu.edu/jmzhang/MEEM/MEEM.html>
- [58] Sites.google.com, 'Hierarchical Convolutional Features for Visual Tracking'. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/chaoma99/iccv15-tracking>

Tablo-1: Metriklerin Özellikleri

Metriğin İsmi	Denklem	Tanımı	Metriğin Amacı	Parametreler
F-skoru	$2 \times \frac{\text{Hassasiyet} \times \text{Anımsama}}{\text{Hassasiyet} + \text{Anımsama}}$	Hassasiyet ve Tanımlamanın Bir Arada Kullanıldığı Metrik	Doğruluk	Hassasiyet Anımsama
F1-skoru	$\frac{1}{N_{frames}} \sum_i 2 \times \frac{p_i \times r_i}{p_i + r_i}$	Hedef Penceresi ile Kesin Referans Penceresinin Örtüşüm Ortalamasını Veren Metrik.	Doğruluk	$p_i = \frac{ H^i \cap KR^i }{ H^i }$ $r_i = \frac{ H^i \cap KR^i }{ KR^i }$
HTD (Hedef Takip Doğruluğu)	$1 - \frac{\sum_i n_{yp}^i + n_{ym}^i}{\sum_i g^i}$	Hedef Pencere ile Kesin Referans Penceresinin Kaç Defa Örtüşüğünü Gösteren Metrik.	Doğruluk	$g^i = i$ 'nci imgede bulunan kesin referans penceresinin sayısı. 0 yada 1. n_{yp}^i, n_{ym}^i
HTH (Hedef Takip Hassasiyeti)	$\frac{1}{ M_s } \sum_{i \in M_s} \frac{ H^i \cap KR^i }{ H^i \cup KR^i }$	Hedef Pencere ile Kesin Referans Penceresinin Örtüşme Oranını Gösteren Metrik.	Doğruluk	$M_s =$ Kesin Referans Penceresi ile Hedef Penceresinin Örtüştüğü İmgelerin Toplam Sayısı. H^i, KR^i
OTD (Ortalama Takip Doğruluğu)	$\frac{1}{N_{imge}} \sum_i \frac{ H^i \cap KR^i }{ H^i \cup KR^i }$	Hedef Pencere ile Kesin Referans Penceresinin Ortalama Örtüşme Oranını Gösteren Metrik.	Doğruluk	N_{imge}, H^i, KR^i
Sapma	$1 - \frac{\sum_{i \in M_s} d(H^i, KR^i)}{M_s}$	Hedef Pencere ile Kesin Referans Penceresinin Merkezleri Arasındaki Pksel Olarak Hata Miktarı	Konum	M_s, H^i, KR^i

Tablo-2: Takip yöntemlerinin özellikleri

Takip Yöntem Tipi	Yöntem Tip Sınıfları	Yöntemler	Gözlem Modeli (Öznelik)	Gözlem Modeli Guncelleme	Hareket Modeli/Örnekleme	Üstünlükleri	Zayıflıkları	Kod/ Ref.	Referans
Üretici Yöntemler	TTM	NCC	Piksel	---	Çapraz İhliti	Hızlı İşlem Zamanı.	Gözlem Modeli Guncellenmemektedir.	---	3
		KLİ	Piksel	---	En Dik İniş Yöntemi	Affin transformasyon Başarı İle Takip Edilmektedir.	Gözlem Modeli Guncellenmemektedir.	Matlab/43	4
		KAT	Piksel	Kalman Süzgeci	Gradyan İniş Yöntemi	Affin Transformasyon Başarı İle Takip Edilmektedir.	---	---	5
		FRT	Histogram	---	Dairesel Alan İçinde	EMD İle Başarılı Karşılaştırma. Konum Doğruluğu.	Gözlem Modeli Guncellenmemektedir.	C++/44	6
		LOT	HSV (Hue Saturation Value) İle Süper Piksel	Parçacık Süzgeci	Parçacık Süzgeci	EMD İle Başarılı Karşılaştırma. Parçacık Süzgecinin Kullanımı	Gri Formatlı İmgelerde Çalışmamaktadır.	Matlab-Mex/45	7
	TDMPF	Piksel	---	Marjinal Parçacık Süzgeci	Dinamik Hareketlere Karşı Gürbüz.	İşlem Süresi Yavaş.	Matlab	9	
	TTMEAM	IVT	Piksel	Kademeli Temel Bileşen Analizi (TBA)	Parçacık Süzgeci	Kademeli TBA İle Modelin Guncellenmesi. Parçacık Süzgecinin Kullanım Unutma Faktörü.	Hızlı Poz ve Işık Değişiminde Guncelleme.	Matlab/46	10
		TST	HSI Piksel	Seyrek Temel Bileşen Analizi	Metropolis Hastings	Birden Fazla Takip Edicinin Kullanılması.	---	Binary/47	11
		ASLA	Seyrek Sunum	Seyrek Temel Bileşen Analizi	Parçacık Süzgeci	Model Guncelleme. Parçacık Süzgeci.	---	Matlab/48	12
	TTMC	TMC	Renk Histogram	Yerel Modun Manzarası	Basın Hopping Monte Carlo	Esnek yada Bükülebilir Olmayan Hedeflerin Takibi.	---	Matlab/49	14
ACT		HSV Histogram	Bayesçi Yaklaşım	Kalman Süzgeci	Esnek yada Bükülebilir Olmayan Hedeflerin Takibi.	---	Matlab-C/50	15	
LIT		Seyrek Sunum	LI Azaltma Yöntemi	Parçacık Süzgeci	Ön Plan ve Arkaplanın Guncellemede Kullanılması.	---	Matlab/51	16	
Ayrıntı Yöntemler	TDC	FBT	Piksel İle Gabor Süzgeçleme	Doğrusal Diskriminant Analizi	Üniform	Hedef İle Arkaplanın Modellemesi	Arkaplan İle Hedefin Benzerlik Göstermesi Durumunda Takip Problemi	---	22
		MIT	Haar	Online Adaboost	Dairesel Alan İçinde	Haar Öznitelikleri Ölçek ve Rotasyona Karşı Gürbüz.	Örnekleme Modelinin Dinamik Harekete Karşı Zayıflığı	C++/52	23
		TLD	LBP	P-N Öğrenme	Lucas Kanade	Hatalı Etiketlemelerin Düzeltilmesi	---	C++/53	24
		KCF, DCF	Piksel veya HOG	Sirt Regresyonu İle DFT	Dolanır Matris Kullanımı	İşlem Hızı Çok Yüksek	Affin Transformasyon Parametre Takibinin Olmaması.	Matlab/54	25, 26
	TDCC	STRUCK, THUNDERSTRUCK	Piksel, Haar ve HOG	Destek Vektör Makineleri İle SMO Opt.	Dairesel Alan İçinde	Hedef İle Arkaplan Model Öğrenme Doğruluğu	Örnekleme Modelinin Dinamik Harekete Karşı Zayıflığı	C++/55	27,28
		DLSSVM	Cie-Lab ve LRT İle tek bileşenli sunum	Destek Vektör Makineleri İle DCD Opt.	Dairesel Alan İçinde	Öznelik Haritalarının Tek Bileşenli Sunumu	Değişken Ölçek Parametre Kullanımı İşlem Hızı Azaltmaktadır.	Matlab/56	29
		MEEM	Cie-Lab ve LRT İle tek bileşenli sunum	Destek Vektör Makineleri İle SMO Opt. ve PLL İle öğrenme	Dairesel Alan İçinde	Ciddi Örtme ve Model Farklılığına Karşı Gürbüz	Sadece İki Boyutlu Hareket Parametrelerinin Takibi	Matlab-Mex/57	30
	TDL	HCFT	CNN Öznelikleri	İliti Süzgeci Ağırlık Katsayısı	İliti Süzgeci	Uzaysal Ve Görsel Bilginin Takibi	Hedef Model Hatasının Kontrol Edilememesi	Matlab/58	31
		DT	CNN Öznelikleri (piksel ve gradyan)	SGD	Gauss Dağılımı	Hedefi Ayıran En İyi Özneliklerin Öğrenimi	---	---	32



Ayşın ERTÜZÜN

Dr. Ayşın Ertüzün, 1981 yılında Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden BS derecesi (onur derecesi ile), 1984'de McMaster Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden M. Eng. derecesi (yüksek onur derecesi ile) ve 1989 yılında Boğaziçi Üniversitesi Elektrik-Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden doktora derecesi aldı. 1988 yılından bu yana Boğaziçi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesidir; halen profesör olarak görev yapmaktadır. Kasım 2016'dan beri araştırmasından sorumlu rektör yardımcılığı görevini yürütmektedir.

Dr. Ertüzün'ün araştırma faaliyetleri istatistiksel sinyal işleme üzerine yoğunlaşmıştır; özellikle kestirim, algılama ve nesne izleme problemleri üzerinde çalışmaktadır. Bayesçi sinyal işleme, kör sinyal işleme, uyarlanabilir sinyal işleme, doku analizi ve örüntü tanıma ilgi alanlarına girmektedir. Boğaziçi Üniversitesi Sinyal ve İmge Laboratuvarı (BUSIM) ve Akıllı Sistem Laboratuvarı (ISL) ile bağlantılıdır.

Parçacık filtreleri ve Bayesçi sinyal işleme, alfa kararlı dağılımlar, bağımsız bileşen analizi, doku hata algılama ve örüntü tanıma, istatistiksel yöntemlerin hata tespit probleminde uygulanması, ters evrişim ve kaynak ayrıştırması, rüzgar hızı tahmini, görüntülerin gürültüden arınması, 2-boyutlu kafes süzgeçler, uyarlanabilir sinyal işleme, yüksek mertebeden istatistikler, dalgacıklar ve uygulamaları gibi konularda dergilerde ve konferans bildiri kitapçıklarında 80'den fazla bilimsel makalenin yazarlığını ve/veya ortak yazarlığını yapmıştır.

IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Dernekleri, IAPR – International Association of Pattern Recognition (Uluslararası Örüntü Tanıma Derneği), IEICE – The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (Elektronik, Bilgi ve İletişim Mühendisleri Enstitüsü) ve TOTIAD – Türk Örüntü Tanıma ve İmge Analizi Derneği üyesidir. IAPR'de çeşitli komite ve kurullarda yer almıştır. Birçok ulusal ve uluslararası konferansın düzenleme ve/veya teknik komitelerinde görev yapmıştır. 2011 yılından beri "Elsevier Signal Processing" dergisinin editörler kurulunda; 2016 yılından beri EMO Bilimsel Derginin Danışma Kurulu'nda yer almaktadır.

**Bahri MARAŞ**

Bahri MARAŞ, 2005 yılında Deniz Harp Okulu'ndan BS derecesi almıştır. 2005-2010 yılları arasında Deniz Kuvvetleri Komutanlığı bağlı muhtelif firkateyn ve hücumbotta elektronik subayı ve silah subayı görevlerini yerine getirmiştir. 2010 yılında, Güney California Üniversitesi, Los Angeles, CA, Elektrik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2012 yılında M.Eng. derecesini aldıktan sonra Gölcük Tersanesi Komutanlığı, Kocaeli'de Silah Sistemleri Mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. Halihazırda Gölcük Tersanesi Komutanlığında Silah Sistemleri Fabrika Müdürlüğü görevinde bulunmakta olup görevi süresince güdümlü mermi atıcı sistemleri ile atış kontrol sistemlerinin Deniz Kuvvetleri Komutanlığına bağlı savaş gemilerinde entegrasyon ve bakım faaliyetlerinin planlanması ve yönetimini sağlamaktadır. Aynı zamanda 2013 yılından günümüze kadar geçen sürede ise Boğaziçi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimine devam etmektedir. Motivasyonu sayısal sinyal işleme, imge işleme, bilgisayarla görme, örüntü tanıma, bayesçi sinyal işleme ve uyarlanabilir süzgeç teorisi hakkında olmakla birlikte mevcut araştırma alanı alçak irtifalarda uçan İHA (İnsansız Hava Aracı)'dan elde edilen videolarda hedef takibi konusu üzerinde yoğunlaşmıştır.

**Nazif ARICA**

Nazif Arıca, 1991 yılında Deniz Harp Okulu'ndan BS derecesi almıştır. Deniz Kuvvetleri Komutanlığında dört yıl süreyle muhabere ve hareket subaylığı görevlerini yerine getirmiştir. 1995 yılında, hem M.Eng. hem de doktora derecesini aldığı ODTÜ (Orta Doğu Teknik Üniversitesi) Bilgisayar Mühendisliği Bölümüne katılmıştır. 1998 yılında, hazırlamış olduğu tez ODTÜ'de yılın tezi olarak ödüllendirilmiştir. Doktora sonrası araştırma çalışmalarını, Illinois Üniversitesi Beckman Enstitüsü, Urbana-Champaign, IL ve Naval Postgraduate School, Monterey, CA Bilişim Bilimi Bölümünde gerçekleştirmiştir. 2004 ile 2013 yılları arasında Deniz Harp Okulu Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul'da öğretim üyesi olarak çalışmıştır. Halihazırda Bahçeşehir Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde profesör olarak görev yapmakla birlikte ayrıca Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü görevini de yerine getirmektedir. Mevcut araştırma alanları cisim tespit, tanıma ve takip, İHA (İnsansız Hava Aracı)'lar için yol planlama ve yüz ifadesi analizi konularını içermektedir. IEEE üyesidir.

İşbirlikli Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemleri için Röle Seçim Teknikleri

Relay Selection Techniques for Network Coded Cooperative Systems

Semiha Tedik Başaran, Güneş Karabulut Kurt

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
İstanbul Teknik Üniversitesi
tedik@itu.edu.tr, gkurt@itu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada pratikte uygulanabilir bir işbirlikli ağ kodlamalı dik frekans bölmeli çoklu erişim (NCC-OFDMA) sistem tasarımı hedeflenmiştir. Bu amaçla, iletimde kullanılacak kaynak atama problemlerinin çözümü için yöntemler geliştirilmiştir. Kaynak atama problemleri olarak OFDMA alttaşıyıcılarının seçimi, bu alttaşıyıcıların çıkış güçlerinin belirlenmesi ve iletime yardımcı olması için kullanılacak rölelerin seçimi ele alınmıştır. İlgili sistem modeli ikili çoklu-grafik (hyperdiagram) yapıları kullanılarak oluşturulmuş ve bu sistemde optimum kaynak ataması için Hungarian yöntemi tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Sistem başarımı benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: İşbirlikli ağ kodlama, OFDMA, ikili eşleme, alt-taşıyıcı atama, güç atama.

Abstract

In this work, design of a practically applicable network-coded-cooperative orthogonal frequency division multiple access (NCC-OFDMA) system is targeted. With this goal, techniques to address the associated resource allocation problems during the communication process are developed. As resource allocation problems, selection of the OFDMA subcarriers, determination of their transmit power level and selection of the relay nodes to aid communication are considered. The associated system model is constructed through bipartite hyperdiagrams and a Hungarian method based algorithm is proposed for optimum resource allocation. The system performance is quantified via simulation results.

Keywords: Network coded cooperation, OFDMA, bipartite matching, subcarrier allocation, power allocation.

1. Giriş

Telsiz haberleşmede gittikçe artan kullanıcı taleplerini karşılamak amacıyla mevcut kaynakların, yani frekans spektrumu ve iletim gücünün, etkili bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak telsiz kanalın haberleşme sistemleri üzerindeki bozucu etkilerinden kurtularak daha yüksek başarımda haberleşebilmek için işbirlikli/röleli sistemler literatürde önerilmiştir [1], [2]. Bu çalışmalarda röle sistemleri kuvvetlendir ve aktar (amplify and forward, AF) ile çöz ve aktar (decode and forward, DF) olmak üzere iki temel yöntemde dayanmaktadır. AF tekniğinde

röle, kaynaktan gelen işaretin sadece genliğini yükseltir ve hedefe gönderir. DF tekniğinde ise röle, kaynaktan gelen işareti çözer ve hedefe gönderir. Bahsedilen çalışmalarda genellikle röle biriminin yarı çift yönlü (half-duplex) iletişim yaptığı kabul edilerek veri gönderme ve alma işlemleri için birbirine dik (zaman veya frekans bölmeli) kanallar kullanılmaktadır. Böylece toplam ergodik kanal sığasının sadece %50 'sinin kullanılabilmesi mümkün olmaktadır.

İşbirlikli haberleşme sistemleri, fiziksel boyutun küçük olmasından dolayı çok-antenli (multi-antenna) alıcı ve/veya verici yapılarının kullanılmadığı durumlarda çeşitleme kazancını arttırarak sistem başarımını iyileştirmek için kullanılır. İşbirlikli iletişimden dolayı oluşan kazanç, işbirlikli çeşitleme (cooperative diversity) kazancı olarak da isimlendirilir [3], [4]. İşbirlikli haberleşme sistemleri sanal olarak çok girişli-çok çıkışlı (multi-input multi-output, MIMO) anten sistemleri oluşturup MIMO yapıların kullanılmadığı durumlarda uzamsal (spatial) çeşitleme kazancının elde edilmesini, telsiz haberleşme kanalının yayıcı (broadcast) etkisini kullanarak sağlarlar [5]. Klasik işbirlikli iletişim sistemleri zaman bölmeli çoklu erişim (time division multiple access, TDMA) tekniğini kullanır. İşbirlikli iletişimde, başka bir birimin iletişime yardımcı olması, gerekli olan toplam zaman dilimi sayısını arttırmakta ve böylece band verimliliği düşmektedir. Bu problemi gidermek için farklı kullanıcıların aynı röleyi kullanarak birbirleri ile iletişim yapmasını sağlayan ağ kodlama teknikleri kullanılabilir.

Ağ kodlamanın telsiz iletişim kanalında sağladığı faydalar [6] çalışmada önerildikten sonra [7], [8] çalışmalarında işbirlikli yapıya ağ kodlama tekniklerinin eklenmesi önerilmiştir. Bu yolla ağ kodlamalı sistemlerden çeşitleme kazancı da elde edilebilmektedir. Bu sistemler ağ kodlamalı işbirlikli (network coded cooperative, NCC) sistemler olarak isimlendirilir.

NCC sistemlerin bilgi kuramsal başarımlarının belirlenmesi ile ilgili yapılan öncü çalışmalar TDMA tabanlı sistemlerin çeşitleme-çoğullama ödünleşimi (diversity-multiplexing tradeoff, DMT) değerlerini incelemişlerdir [9], [10]. [9] çalışmasında yazarlar rölelerin işaret kalitesine göre dinamik olarak ağ kodlama kararı verdiği bir sistemi ele almışlardır. M adet röle bulunduran bir sistemde çeşitleme kazancının ağ

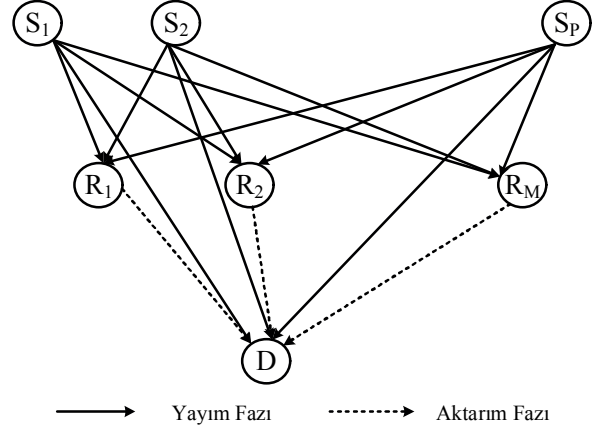
kodlama ile $M + 1$ 'e çıkartılabileceğini ve aynı zamanda spektral verimliliğin arttırılabildiğini göstermişlerdir. Bununla beraber, telsiz iletişim kanalının bozucu etkisi nedeniyle, hedef düğümde her durumda diğer kaynaklardan gönderilen veri doğru olarak çözülemeyebilmektedir. Bu nedenle hedef ile kaynak arası çeşitleme kazancı sadece 2 olmaktadır. Bu çeşitleme kazancının artırılması için Topakkaya ve Wang tarafından yapılan [10] çalışmasında birçok kaynak ve hedef düğüm için röle düğümlerde RNC kullanan işbirlikli sistem (random network coded cooperation, RNCC) ve gerekirci ağ kodlama kullanan işbirlikli sistem (deterministic network coded cooperation, DNCC) önerilmiştir. Bu sistemlerin DMT analizleri yapılmıştır. İki düğüm arasında ağ kodu olarak yüksek mesafede ayrıştırılabilir (maximum distance separable, MDS) kodların sistematik olarak kullanımının tam çeşitleme kazancının elde edilebilmesi için yeterli olduğu gösterilmiştir.

NCC tekniğini içeren [11]-[13] çalışmaları OFDM sistemleri için geliştirilmiştir. NCC-OFDM sistemlerinde spektral verimlilik arttırılabılırken aynı zamanda alıcı yapısı da basitleştirilebilmektedir. Bu öncül çalışmalarda [11] bit hata oranını, [12] ağdaki veri hızını ve [13] ise toplam sığayı (sum capacity) maksimize edecek kaynak yönetimini ele almaktadır. OFDM sistemlerinin birden çok kullanıcı için geliştirilmiş hali olan dik frekans bölmeli çoklu erişimdir (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA).

İşbirlikli ağ kodlamalı sistemler hakkındaki öncül çalışma Chen, Kishore ve Li tarafından 2006 yılında yapılmıştır [7]. Bu sistemlerde ağ kodlamanın yararlarına ek olarak düğümler arasında işbirliği yapılarak uzamsal çeşitleme kazancı sağlanabilmektedir. İlk çalışmalar tek kaynak ve hedef düğüm kullanılarak yapılmış, ilerleyen aşamalarda kaynak ve hedef sayıları arttırılmıştır [7], [14], [15]. Literatürdeki bazı çalışmalarda ağ kodlama ile iletim yapan birimler arasında önceliklendirme yapılması da önerilmiştir. Bu şekilde bazı kaynak düğümlerin çeşitleme kazancı arttırılarak sistem hata başarımı iyileştirilebilmektedir [16], [17].

[18] çalışmasında kanal kalitesine (dolayısıyla işaret gürültü oranına) göre röle düğümünün iletim protokolüne katılıp katılmaması durumları incelenmiştir. Bu sayede sistem başarımı daha da arttırılabilmektedir. Birden fazla röle düğümü ile ağ kodlamalı işbirlikli sistemlerin çeşitleme derecesinin arttırılabildiği [19]'da gösterilmiştir. Bu sistemlerde kod çözme karmaşıklığını düşürebilecek şekilde, rastgele ağ kodlama kullanan bir yapı [20] çalışmasında sunulmuştur. Bu çalışmada, önerdiğimiz sisteme benzer olarak OFDM tabanlı (genişbant) model kullanılmamıştır. Benzer sistemlerde rölelerde çok sekmeli yapılar da incelenmiştir [21].

NCC-OFDMA sisteminin pratikte kullanılabilmesi için sistemin yapısı gereği oluşan kaynak atama problemlerine akıllı yaklaşımlar getirilmelidir. Alt-taşıyıcıların, onların güç değerlerinin ve iletimde kullanılacak röle birimlerinin seçimi gerekmektedir. Buna rağmen, NCC-OFDMA sisteminin kaynak atama problemlerine yönelik çözümler henüz literatürde bulunmamaktadır. Bu makalede, NCC OFDMA sistemlerde kaynak atama problemlerine ikili eşleme (bipartite matching) tabanlı yaklaşımlar önerilmektedir. Önerilen Hungarian tekniği tabanlı algoritma optimum kaynak atama çözümlerini vermektedir.



Şekil 1: NCC-OFDMA için kullanılan sistem modeli.

2. Sistem Modeli

2.1. Ağ Kodlama

P tane kaynak düğümü, M tane röle düğümü ve bir tane alıcı düğümden oluşan NCC-OFDMA sistemi Şekil 1'de verilmektedir. Kaynak düğümleri ve alıcı düğümleri S_i ve R_j ile temsil edilmektedir ($i = 1, \dots, P$, $j = 1, \dots, M$). Sistemde toplam N adet alt taşıyıcı bulunmaktadır. NCC-OFDMA sisteminde iletim iki fazda tamamlanmaktadır. Bunlardan ilki yayım fazıdır. Yayım fazında kaynak düğümleri kendilerine atanmış olan OFDMA alt-taşıyıcılarının seçimini, bunların güçlerinin belirlenmesini ve alt-taşıyıcılara bitlerin atanmasını sistem başarımını optimize ederek sağlarlar ve bu şekilde veri iletimi yaparlar. İletilen işaretler hem röle düğümleri hem de hedef düğümleri tarafından alınır. Güç optimizasyonu, bit atamaları ve alt-taşıyıcı seçimi aşağıda detayları açıklanacağı üzere ikili diyagramlarda eşleme ile yapılmaktadır. Bu fazda ağ kodlama yapılmamaktadır. Buna göre ilk fazda röle düğümleri ve alıcı düğüm tarafından alınan işaretler sırasıyla şu şekilde tanımlanır:

$$Y_{s,r_j}[n] = \sqrt{\rho_i[n]} c_i[n] H_{s,r_j}[n] X_i[n] + W_{s,r_j}[n] \quad (1)$$

$$Y_{s,d}[n] = \sqrt{\rho_i[n]} c_i[n] H_{s,d}[n] X_i[n] + W_{s,d}[n]$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Burada ρ_i , S_i kaynağı için her bir alt-taşıyıcının ortalama iletim gücünü ifade etmektedir. $W_{s,r_j}[n]$ ($W_{s,d}[n]$) j . röle (alıcı) düğümündeki sıfır ortalamalı birim varyanslı Gauss gürültü terimidir. $H_{s,r_j}[n]$ ($W_{s,d}[n]$), i . kaynak ve j . röle (alıcı) düğümleri arasındaki iletim kanalının frekans cevabını göstermektedir. Bu denklemde, $c_i[n]$, n . alt-taşıyıcının i . kaynak düğümü tarafından kullanılıp kullanılmadığını ifade eden gösterge (indicator) fonksiyonudur ve

$$c_i[n] = \begin{cases} 1, & n \text{ alt-taşıyıcı } i \text{ kaynağa atanmış ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2)$$

olarak tanımlanmaktadır.

$X_i[n] \in \mathcal{X}$, n . alt-taşıyıcıdan gönderilen modüle edilmiş işaretir. \mathcal{X} , modülasyonda kullanılan işaret kümesini (signal constellation) ifade etmektedir ve ağ kodlamada notasyonun basit kalması için $|\mathcal{X}| = q$ olarak tanımlanabilir. Modülasyon seviyelerinin genellikle 2'nin kuvveti olarak seçilmesi dolayısıyla bu varsayım, sistemin gerçekleşmesinde önemli bir kısıt oluşturmamaktadır. Örneğin BPSK modülasyonu için $\sqrt{E_m}$ ortalama iletim enerjisini gösterirken, $q = 2$ ve

$$X_i[n] = \begin{cases} +\sqrt{E_m}, & c_i[n] = 1, b_i[n] = 1 \text{ ise,} \\ -\sqrt{E_m}, & c_i[n] = 1, b_i[n] = 0 \text{ ise,} \\ 0, & c_i[n] = 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (3)$$

olmaktadır. Burada $b_i[n]$, i . kaynak düğümden n . alt-taşıyıcı kullanarak gönderilen biti ifade etmektedir. İlk fazda gönderilen i . kaynak düğüme ait işaret, j . röle düğümü tarafından en büyük olasılıklı (maximum likelihood, ML) alıcı yapısı ile

$$\hat{X}_i^j[n] = \arg \min_{\tilde{X} \in \mathcal{X}} |Y_{s_i r_j}[n] - H_{s_i r_j}[n] \tilde{X}| \quad (4)$$

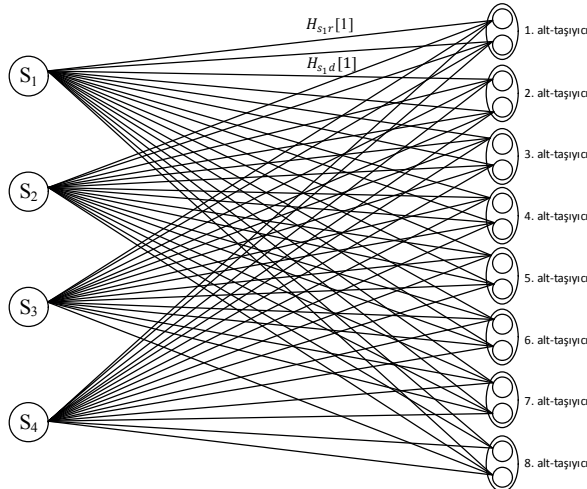
olarak kestirilebilir. Burada sıfır zorlamalı (zero forcing, ZF) karar verici, minimum ortalama karesel hata (minimum mean square error, MMSE) veya $X \in \mathcal{X}$ elemanlarının eşit olasılıkla seçilmemesi durumunda en yüksek sonsal olasılıklı (maximum a posteriori) karar verici teknikleri de kullanılabilir. İkinci faz aktarım fazıdır. Bu fazda röle birimleri öncelikli olarak kaynaktan alınan işaretleri çözerler. Çözülen işaretler rastgele ağ kodlama katsayıları kullanılarak kodlanır. Bu şekilde ağ kodlama sisteme eklenmiş olur. Röle birimleri ağ kodlanmış işaretleri tekrar modüle ederek hedef birimlere iletirler. Hedef birimlerden alınan işaret

$$Y_{r_j d}[n] = \sqrt{\rho_i[n]} c_i[n] H_{r_j d}[n] Z_i[n] + W_{r_j d}[n], \quad (5)$$

olarak yazılabilir. Burada $Z_i[n]$, i . röle biriminden iletilen modüle edilmiş işaretir ve herhangi bir ağ kodlama tekniği için $i \in \mathcal{R}$ olmak üzere,

$$Z_j[n] = f_{j,n}(\hat{X}_1^j[n], \hat{X}_2^j[n], \dots, \hat{X}_p^j[n]) \quad (6)$$

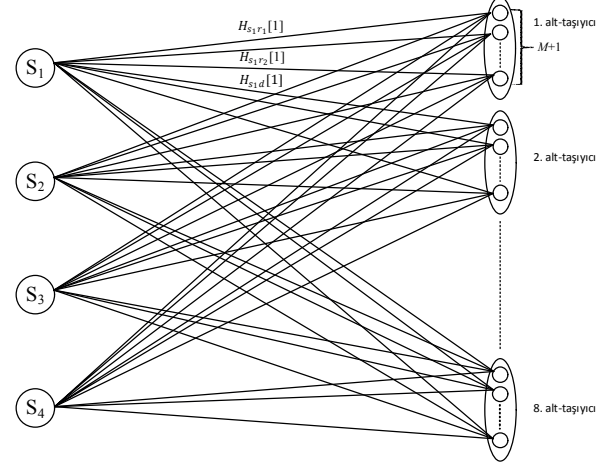
şeklinde hesaplanabilir. Burada $f_{j,n}(\cdot)$ fonksiyonu, j . rölede n . alt-taşıyıcı için kullanılan ağ kodlama fonksiyonunu ifade etmektedir.



Şekil 2: Alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram ($P = 4, N = 8$ ve $M = 1$).

Alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram $P = 4, N = 8$ ve $M = 1$ durumunda Şekil 2'de verilmektedir.

S_1, S_2, S_3 ve S_4 yayım fazında iletim yapan düğümleri göstermektedir. İletim yapan her bir düğümlerle her bir alt-taşıyıcıyı bağlayan iki yol bulunmaktadır. Bu yollardan ilki kaynak ve röle düğümü arasındaki bağlantıdır diğeri ise verici



Şekil 3: Çok röleli durumda alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram ($P = 4, N = 8$ ve $M > 1$).

ve alıcı birim arasındaki doğrudan iletim kanalıdır. Örneğin 1. alt-taşıyıcı ve S_1 arasında iki adet bağlantı bulunmaktadır,

bunlar: $H_{s_1 d}[1]$ ve $H_{s_1 r_1}[1]$. Birden fazla bağlantı olabilmesi nedeniyle incelenen diyagram bir ikili hiperdiyagramdır. Alt-taşıyıcı ve güç atama probleminde elde edilen diyagram yapısı, M adet rölenin olduğu durumda gösterilen ikili hiperdiyagram biçiminde genelleştirilebilir.

Çok röleli durumda alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram $P = 4, N = 8$ ve $M > 1$ durumu için Şekil 3'te gösterilmiştir. İletim yapan her bir kaynak düğümüyle her bir alt-taşıyıcıyı bağlayan $M + 1$ tane yol bulunmaktadır. Örneğin 1. alt-taşıyıcı ve S_1 arasında $M + 1$ tane bağlantı bulunmaktadır, bunlar: $H_{s_1 r_1}[1], \dots, H_{s_1 r_M}$ ve $H_{s_1 d}$. Burada SNR sistemdeki ortalama işaret gürlüğü oranı ve $u \in \{s_i r_j, s_i d, r_j d\}$ iken R_u , u bağlantısı için gerekli hedef iletim oranını göstermektedir. u bağlantısı ise $|H_u[n]|^2 \geq 2^{R_u} - 1 / SNR$ durumunda sağlanmaktadır. Güç atama tekniği yine bağlantı sayısını en yüksek hale getirmek üzere kullanılmaktadır.

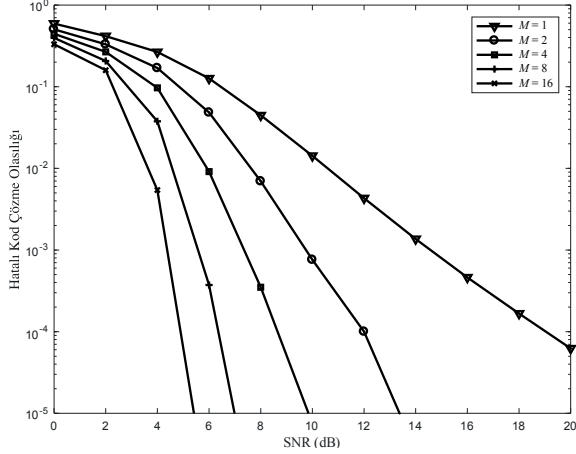
3. Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemleri için Birleşik Güç ve Alt-Taşıyıcı Atama Tekniği

OFDMA sisteminde herhangi bir bağlantının güvenli iletim sağlayabilmesi için gerekli minimum güç seviyesi Rayleigh sönmülemeli kanallar için şu şekilde hesaplanır:

$$P_u \geq \frac{\sigma_n^2 (2^{N_c R_u} - 1)}{|H_u|^2} = P_u^L. \quad (7)$$

Burada R_u , her bir alt-taşıyıcı için gerekli hızdır. Kanaldaki toplam evreyumluluk band genişliği sayısı L olmak üzere $N_c = N/L$, her bir evreyumluluk band genişliğindeki alt-taşıyıcı sayısını göstermektedir. Evreyumluluk band genişliği, kanalın düz olarak tanımlanabildiği frekans aralığı

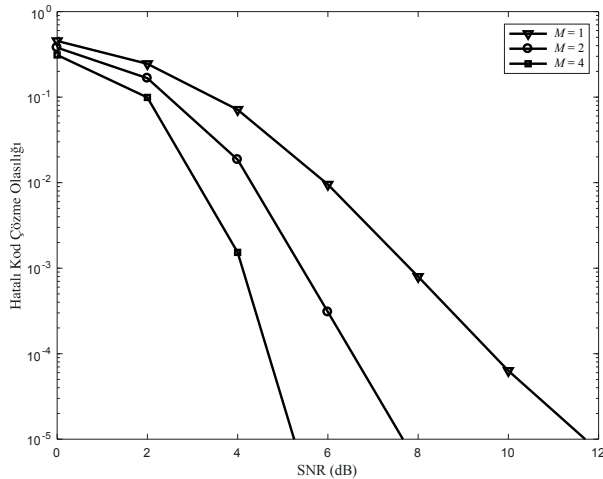
olarak tanımlanmaktadır. Bu durum kanalın, uyumluluk band genişliği içinde tüm spektral bileşenler için yaklaşık olarak eşit kazançlı olduğu anlamına gelmektedir. Aynı evreyuymuluk band genişliği içerisindeki alt-taşıyıcıların eşit kazançlı olduğu ve farklı uyumluluk band genişliği içerisindeki kanal kazançlarının bağımsız olduğu varsayılmıştır [22].



Şekil 4: NC sistemi için değişik sayılarda röle kullanılması durumunda elde edilen servis kesinti olasılığı başarımları.

Her bir alt-taşıyıcı sadece bir kullanıcıya atanabilmektedir. Hedeflenen iletim hızları alt-taşıyıcı başına denk düşecek şekilde tutulmuştur.

OFDMA sistemlerde birleşik alt taşıyıcı ve güç atamasını gerçekleştiren Hungarian tabanlı bir algoritma [23]'te tarafımızdan önerilmiştir. Bu algoritmanın detayları Çizelge 1'de verilmektedir. Çizelge 1'de satır 2, \mathcal{M} eşleşmesinin toplam maliyetini minimize etmeyi amaçlayan Hungarian yöntemini çalıştırır. Hungarian yöntemi, çift yönlü grafiklerde minimum maliyetli mükemmel eşlemeyi hesaplar [24]. \mathcal{G} 'nin minimum maliyetini hesaplayabilmek için u linkinin maliyeti P_u^L ile belirtilmiştir. Hungarian yönteminde P_u^L değerleri, yöntemin girişi olarak ele alınır. $O(N^3)$ işleminden sonra, Hungarian yöntemi çıkış olarak \mathcal{M} 'i verir. \mathcal{M} alt-taşıyıcı atamalarını gerçekleştirir. Toplam güç P_T sınırını aşmadığı sürece maksimum sayıda kullanıcıya servis verilebilir.



Şekil 5: NCC sistemi için değişik sayılarda röle kullanılması durumunda elde edilen servis kesinti olasılığı başarımları

Çizelge 1: Birleşik Güç ve Alt-Taşıyıcı Atama Algoritması

1: (7)'ye göre P_u^L değerlerine karar ver ve bu değerlerle \mathcal{G} matrisini oluştur.
2: Alt-taşıyıcı ataması için Hungarian yöntemini [24] uygula. // \mathcal{G} , Hungarian yönteminin giriş matrisidir. // \mathcal{M} , Hungarian yönteminin çıkışındaki eşleme kuralıdır.
3: Azalan şekilde Sırala: $P_i := P_u^L$
4: $U' = \emptyset$ ve $M^* = M$
5: for $i \leftarrow 1, P$, gerçekte
6: tekrarla
7: eğer $\sum_{i \in \{U, U'\}} P_i > P_T$
8: $U' = U' \cup \{u_i\}$
9: $M^* = M, M(U')$
10: $\sum_{i \in \{U, U'\}} P_i \leq P_T$ doğruysa
11: // Çıkış olarak M^* 'ı ver ve algoritmayı durdur.

Çizelge 2: Röle Seçimi için Birleşik Güç ve Alt-Taşıyıcı Atama Algoritması

1: for $j \leftarrow 1, M$, gerçekte
2: j -röle için (7)'ye göre P_u^L değerlerine karar ver ve bu değerlerle \mathcal{G} matrisini oluştur.
3: Alt-taşıyıcı ataması için Hungarian yöntemini [24] uygula. // \mathcal{G} , Hungarian yönteminin giriş matrisidir. // \mathcal{M} , Hungarian yönteminin çıkışındaki eşleme kuralıdır.
4: Azalan şekilde Sırala: $P_i := P_u^L$
5: $U' = \emptyset$ ve $M^* = M$
6: for $i \leftarrow 1, P$, gerçekte
7: tekrarla
8: eğer $\sum_{i \in \{U, U'\}} P_i > P_T$
9: $U' = U' \cup \{u_i\}$
10: $M^* = M, M(U')$
11: $P_j = \sum_{i \in \{U, U'\}} P_i$, $P_j \leq P_T$ doğruysa
12: Çıkış olarak M_j^* 'ı ver.
13: $M = \max_{j=1, M} M_j^* $ olarak belirle.
14: Eğer $ M > 1$, P_j değeri minimum olan röle seçilir.

Bu makalede önerdiğimiz NCC-OFDMA sistemler için röle seçimli birleşik güç ve alt-taşıyıcı atama algoritması ise Çizelge 2’de verilmiştir. Burada önceki yöntemden farklı olarak her bir röle için Hungarian tabanlı birleşik güç ve alt-taşıyıcı algoritması yardımıyla olası alt-taşıyıcı ve kullanıcı eşlemelerine karar verilir. Bu rölelerden en fazla eşlemeye sahip olan ya da eşit sayıda eşleme olması durumunda en az güç kullanılan durumdaki röle iletim için seçilir. Böylece, sistemde minimum güç harcanarak maksimum sayıda kullanıcının iletim yapması sağlanır.

4. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde önerilen algoritma kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar verilecektir. NCC-OFDMA sistemi $P = 4$, $N = 8$ parametrelerine sahiptir. Ayrıca güç koşulu P_T , N' ’ye eşit seçilmiştir. Farklı röle sayılarına göre elde edilen benzetim sonuçları incelenecektir.

Doğrudan görüş linklerinin olmadığı NC kullanılan OFDMA sistemi için alt-taşıyıcı, güç ve röle seçimini yapan algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4’te verilmiştir. Bu şekilde değişik sayıda röle içeren NC sistemi için elde edilen kesinti olasılığı sonuçları verilmektedir. Her bir durumda sadece tek bir röle seçilerek iletim yapılmaktadır. Şekilden görüldüğü üzere sistemdeki röle sayısının artması servis kesinti olasılığını iyileştirmektedir. Çeşitleme kazancının sistemdeki röle sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir.

NCC sistemi için elde edilen tek röle seçimi sonuçları ise Şekil 5’te verilmektedir. NC sisteminde elde edilen sonuçlarda da gözlemlendiği üzere, röle sayısı arttıkça servis kesinti olasılığı başarımla iyileşmektedir. Yine, çeşitleme kazancı röle sayısının artmasıyla ortaya çıkmaktadır.

5. Sonuçlar

Çalışmamızda pratikte uygulanabilir bir NCC-OFDMA sisteminin tasarımı hedeflenmiştir. Bu kapsamda NCC-OFDMA sistemlerde, kullanıcılar arasında adaletli atamayı sağlayarak rastgele ağırlıklandırılmış grafik yardımıyla minimum güç kullanılan eşleme sağlanmıştır. Böylece toplam iletim gücü birleşik olarak azaltılarak, kesintideki kullanıcı sayısını minimize eden ve röle seçimini gerçekleştiren eniyileme algoritması önerilmiştir.

Her bir kullanıcı-alt-taşıyıcı çiftinin gerekli iletim güç seviyesi bir alttaşıyıcının kesinti olasılığına göre belirlenmektedir. Her bir rölenin iletim için seçilmesi durumunda elde edilecek servis kesinti olasılığı, algoritma yardımıyla belirlenmiştir. Önerilen teknik kullanılarak NCC-OFDMA sistemlerin yüksek başarımla seviyesinde kullanımı mümkün olmaktadır.

6. Kaynaklar

- [1] J. Laneman and G. Wornell, “Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2425, Oct. 2003.
- [2] R. Nabar, H. Bolcskei, and F. Kneubuhler, “Fading relay channels: performance limits and space-time signal design,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1099 – 1109, Aug. 2004.

- [3] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, “User cooperation diversity. part I. system description,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [4] J. Laneman, D. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [5] L. Zheng and D. Tse, “Diversity and multiplexing: a fundamental trade-off in multiple-antenna channels,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073–1096, May 2003.
- [6] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, “Network information flow,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, July 2000.
- [7] Y. Chen, S. Kishore, and J. Li, “Wireless diversity through network coding,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 3, pp. 1681–1686, Apr. 2006.
- [8] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft, “XORs in the air: Practical wireless network coding,” in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 3, pp. 497–510, June 2008.
- [9] C. Peng, Q. Zhang, M. Zhao, Y. Yao, and W. Jia, “On the performance analysis of network-coded cooperation in wireless networks,” in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 8, pp. 3090–3097, Aug. 2008.
- [10] H. Topakkaya and Z. Wang, “Wireless network code design and performance analysis using diversity-multiplexing tradeoff,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 2, pp. 488–496, Feb. 2011.
- [11] H. Gacanin and F. Adachi, “Broadband analog network coding,” in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, pp. 1577–1583, May 2010.
- [12] X. Wang, Y. Xu, and Z. Feng, “Physical-layer network coding in OFDM system: Analysis and performance,” in *Proc. Conference on Communications and Networking in China*, pp. 139–143, Aug. 2012.
- [13] B. Han, W. Wang, and M. Peng, “Optimal resource allocation for network coding in multiple two-way relay OFDM systems,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1642–1647, Apr. 2012.
- [14] M. Fareed, M. Uysal, and T. Tsiftsis, “Error-rate performance analysis of cooperative OFDMA system with decode-and-forward relaying,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 5, pp. 2216–2223, June 2014.
- [15] A. Nasri, R. Schober, and M. Uysal, “Performance and optimization of network-coded cooperative diversity systems,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 3, pp. 1111–1122, Mar. 2013.
- [16] M. Iezzi, M. Di Renzo, and F. Graziosi, “Network code design from unequal error protection coding: Channel-aware receiver design and diversity analysis,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, June 2011.
- [17] —, “Closed-form error probability of network-coded cooperative wireless networks with channel-aware detectors,” in

- Proc. *Global Telecommunications Conference*, pp. 1–6, Dec 2011.
- [18] C. Peng, Q. Zhang, M. Zhao, and Y. Yao, “On the performance analysis of network-coded cooperation in wireless networks,” in Proc. *IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1460–1468, May 2007.
- [19] T. Lv, S. Li, and W. Geng, “Combining cooperative diversity and network coding in uplink multi-source multi-relay networks,” in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [20] J. T. Seong and H. N. Lee, “Predicting the Performance of Cooperative Wireless Networking Schemes With Random Network Coding,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 8, pp. 2951–2964, Aug. 2014.
- [21] Z. Tang, H. Wang, Q. Hu and C. Li, “Performance Analysis of Multi-User Multi-Round Linear Network Coded Cooperation,” in *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1767–1770, Oct. 2014.
- [22] C. Y. Wong, R. Cheng, K. Lataief, and R. Murch, “Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 1747–1758, Oct. 1999.
- [23] S. T. Basaran and G. K. Kurt, “Joint subcarrier and power allocation in OFDMA systems for outage minimization,” in *IEEE Communications Letter*, vol. 20, no. 10, pp. 2007–2010, Oct. 2016.
- [24] H. W. Kuhn, “The Hungarian method for the assignment problem,” *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 2, pp. 83–97, 1955.



Semiha TEDİK BAŞARAN

Semiha Tedik Başaran Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği alanında lisans ve yüksek lisans derecelerini, İstanbul Teknik Üniversitesi, sırasıyla 2011 ve 2013 yıllarında aldı. Halen aynı bölümde doktora çalışmalarını sürdürürken araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışmalarında, tam çift yönlü iletişim, ağ kodlama, kablolu haberleşme ve işbirlikli haberleşme üzerine odaklanmaktadır.



Güneş KARABULUT KURT

Güneş Karabulut Kurt lisans derecesini 2000 yılında Boğaziçi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2002 yılında yüksek lisans derecesini ve 2006 yılında doktora derecesini elektrik mühendisliği alanında, Kanada'nın Ontario eyaletindeki Ottawa Üniversitesi'nden aldı. 2000-2005 yılları arasında Ottawa Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2005-2006 arasında akıllı anten tasarımı ve uygulamaları hakkında TenXc şirketinde, 2006-2008 arasında çok taşıyıcılı modem tasarımı konusunda Edgewater şirketinde çalıştı. 2008 yılında Avrupa Birliği'nin Marie Curie-IRG programı ile Türkiye'ye dönerek Turkcell şirketinde araştırma geliştirime grubunda çalıştı. 2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'ne Yardımcı Doçent olarak katıldı ve 2013 yılında Doçent unvanı aldı. Güneş Karabulut Kurt'un araştırma konuları çok taşıyıcılı, çok antenli iletişim sistemleri, OSI katmanları-arası güvenlik sistemleri, telsiz şebeke optimizasyonu ve bilişsel şebekelerdir.

Gemi Akustik İz Analizi Ship Acoustic Signature Analysis

Umut Fırat¹, Tayfun Akgül²

¹Bilişim Teknolojileri Enstitüsü
TÜBİTAK BİLGEM
umut.firat@tubitak.gov.tr

²Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi
tayfunakgul@itu.edu.tr

Öz

Pervane ve makine kaynaklı gemi gürültülerinden çıkarılan frekans hatları su altı hedef sınıflandırmada kullanılan en önemli verilerdir. Kaviteleme sonucu ortaya çıkan genlik modülasyonlu geniş bant pervane gürültüsü zımnen pervane tonellerini içerirken gemi itki sistemi ve yardımcı makinelerinin su altına yayılan dar bant bileşenleri makine tonellerini oluşturur. Zarf tespitine dayalı Demon ve alçak frekans analizine dayalı Lofar yöntemleri sırasıyla pervane ve makine tonellerinin tespiti için başvurulan temel yöntemlerdir. Bu çalışmada, bu iki yöntemin hedef sınıfını belirlemede nasıl kullanılabileceği İstanbul Boğazı'nda kaydedilmiş gerçek gemi gürültülerinden yararlanılarak tartışılmaktadır. Farklı tipte gemilerin farklı frekanslarda pervane ve makine tonelleri ürettiği gösterilmiştir. Yaşanan başlıca zorluklar arasında, durağan olmayan sinyallere yol açan çevresel şartlar ve gemi gürültülerinin kontrollü deneylerle kaydedilmemiş olması sayılabilir. Gelecek çalışmalarda bu zorlukları aşmak için farklı yöntemler denenmelidir.

Anahtar kelimeler: Gemi gürültüsü, Demon, Lofar

Abstract

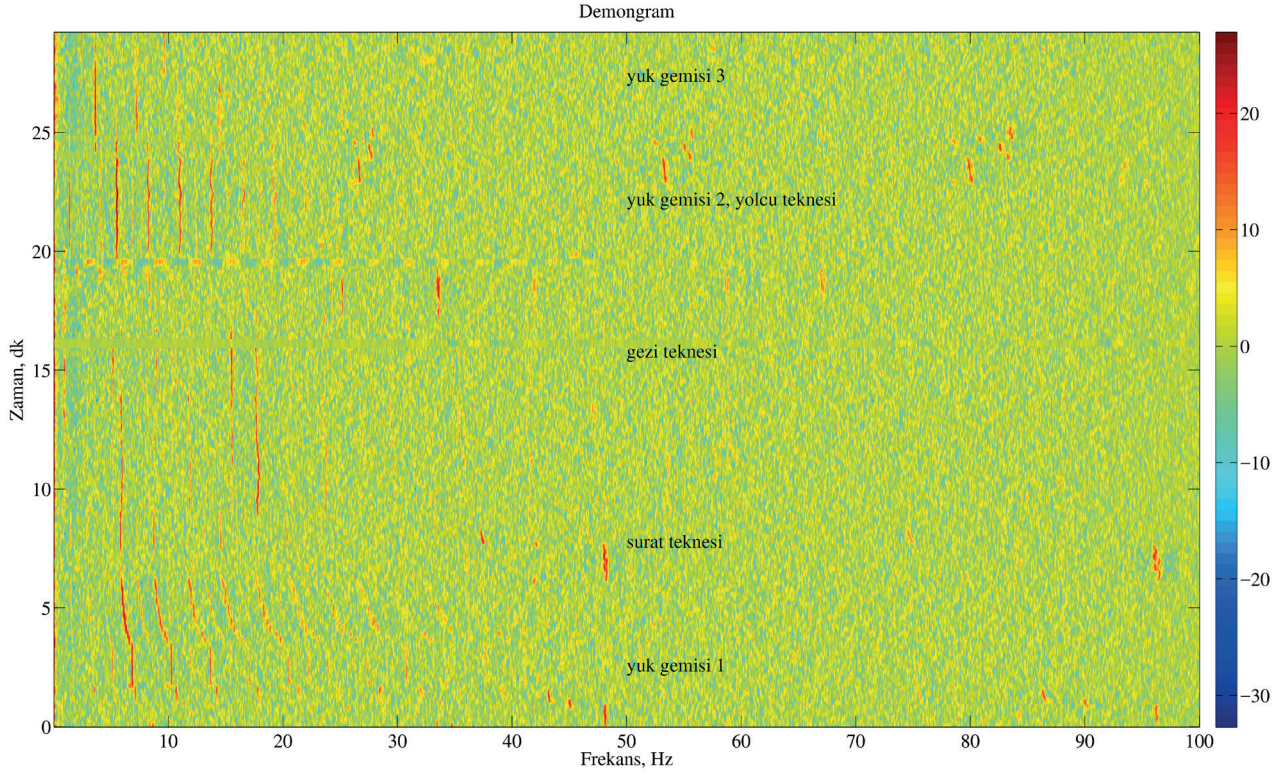
The frequency lines extracted from ship-radiated propeller and machinery noise give the essential information for underwater target classification. Amplitude modulated broadband propeller noise imposed by cavitation contains the implicit propeller tonals while underwater-radiated narrowband propulsion and auxiliary machinery noise gives rise to machinery tonals. Detection of these propeller and machinery tonals are mainly handled by an envelope detection method, Demon and by a low frequency analysis method, Lofar, respectively. In this paper we discuss the utilization of these methods on the identification of targets employing real-world ship noise recorded in the Strait of Istanbul. We showed that different ship types yield different propeller and machinery tonal frequencies. Main challenges are environmental conditions causing nonstationary signals as well as lack of data from controlled experiments. Thus, future work should include the investigation of suitable methods to cope these challenges.

Keywords: Ship-radiated noise, Demon, Lofar

1. Giriş

Gemilerin su altında yayılan gürültülerinin baskın bileşeni pervane kaviteleme sonucu ortaya çıkan geniş bant gürültüdür [1]. Kaviteleme, pervane kanatları üzerinde oluşan hava kabarcıklarının, pervane kanatlarının dikey ekseninde dönüşü sonucu azalan statik basınç nedeniyle patlamasıdır [2, Bl. 7]. Pervane şaftının dönüş hızı belirli bir değeri aştığında görülen bu olgu, pervanenin periyodik dönüşü sonucu geniş bant gürültünün genliğinin modülasyonuna yol açar [2, Bl. 8]. Modüle eden sinyal frekans uzayında pervane (ya da kaviteleme) tonelleri adıyla anılır. Farklı gemi sınıfları için belirli frekans aralıklarında beliren bu tonellerin tespiti sonar hedef sınıflandırmadaki en önemli aşamalardan biridir [3-6]. Pervane tonelleri hidrodinamik süreçlerin sonucudur. Ancak gemilerin su altında yayılan gürültüleri mekanik kaynaklı da olabilir. Gemilerin akustik izlerine katkı sağlayan gemi makineleri dar bant karakteristiğe sahip mekanik kaynaklı gürültülerdir ve temelde iki çeşittir. Biri, geminin itki sisteminden kaynaklanan, diğeri ise yardımcı makinelerin ürettiği gürültüdür.

İtki sisteminden kaynaklanan gürültünün ana bileşeni pervaneyi tahrik eden ana makine gürültüsüdür. Günümüzde gemi ana makineleri çoğunlukla dizel tabanlı olmakla birlikte gaz türbini kullanan gemiler de mevcuttur. İtki sisteminden kaynaklı bir diğer gürültü de aktarma sisteminin sebebiyet verdiği gürültüdür. Gerekli torku üretmek için, ana makine şaftının dönüş hızını azaltarak pervane şaftına ileten dişli çark sistemleri bu türden gürültü kaynaklarıdır. Bunun dışında gemi içerisinde servis ve yardım amaçlı kullanılan makineler de gürültü üretmektedir. Gemi makineleri kaynaklı tüm bu bileşenler, 100 kHz'e kadar [2, Bl. 8] yayılabilen pervane gürültüsünün aksine temelde 1 kHz'e [7] kadar görülen düşük frekans bölgesinde yer alır ve makine tonelleri adıyla anılır. Bu bileşenlerin pervane tonelleri ile birlikte tespiti durumunda gemi sınıfı hatta ilgili sınıfa ait belirli bir gemi teşhis edilebilir. Pervane tonellerinin çıkarımı amacıyla literatürde ve pratik sonar uygulamalarında en çok kullanılan yaklaşım Gürültüde Genlik Modülasyonu Tespiti (Detection of envelope modulation on noise – Demon) adıyla anılan yöntemdir [8]–[15]. Bu yöntem, kabaca, işaretin karesinin alınması ve sonrasında alçak geçiren bir süzgeçten geçirilmesi ile zarf



Şekil 1 – BANAS ile Beykoz açıklarında kaydedilmiş gemi gürültülerine ait Demogram. Kayıt uzunluğu yaklaşık 29 dk, frekans çözünürlüğü yaklaşık 0,05 Hz.

sinyalini kestirir. Bu sinyalin izgesi de, pervane tonellerini verir.

Makine tonellerinin çıkarımı için kullanılan standart yöntem ise, Düşük Frekans Analizi ve Kaydı (Low frequency analysis and recording – Lofar)'dır [16]. Adından da anlaşılacağı gibi düşük frekansta Fourier analizine dayanmaktadır.

Pervane ve makine tonellerinin zamanla değişen frekans ve güçlerini takip edebilmek için Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD)'ndeki gibi uzun bir sinyalin kısa pencerelerde analizi gerekir. Bu analiz sonucu elde edilen pervane ve makine tonelleri zaman-frekans temsilleri, sonar literatüründe, sırasıyla Demogram ve Lofargram olarak adlandırılır.

Bu çalışmanın amacı, İstanbul Boğazı'ndan transit geçen ya da iki yaka arasında çalışan gemilerin akustik izlerinin çıkarılması, izlenmesi ve sınıflandırılması için Demon ve Lofar yöntemlerinin nasıl kullanılabileceğini tartışmaktır. Bunu için, Boğaziçi Ortam Gürültüsü Kayıt Sistemi (Bosporus Ambient Noise Acquisition System – BANAS [17]) ile kaydedilmiş ve farklı tipte gemilerin gürültülerini içeren verilerin Demogram ve Lofargram temsilleri verilmektedir. Makalenin ikinci bölümünde Demon ve Lofar yöntemleri tanıtılmaktadır. Üçüncü bölümde, BANAS ile kaydedilmiş verilerin Demogram ve Lofargram örnekleri verilmekte ve analiz sonuçları tartışılmaktadır. Dördüncü bölümde genel sonuçlar irdelenmekte ve gelecek çalışmalar verilmektedir.

2. Gemi Gürültü Analizi

Bu bölümde, gemilerden yayılan modülasyonlu geniş bant ve dar bant akustik izlerin analizinde standart araçlar olarak kullanılan Demon ve Lofar yöntemleri tanıtılmaktadır.

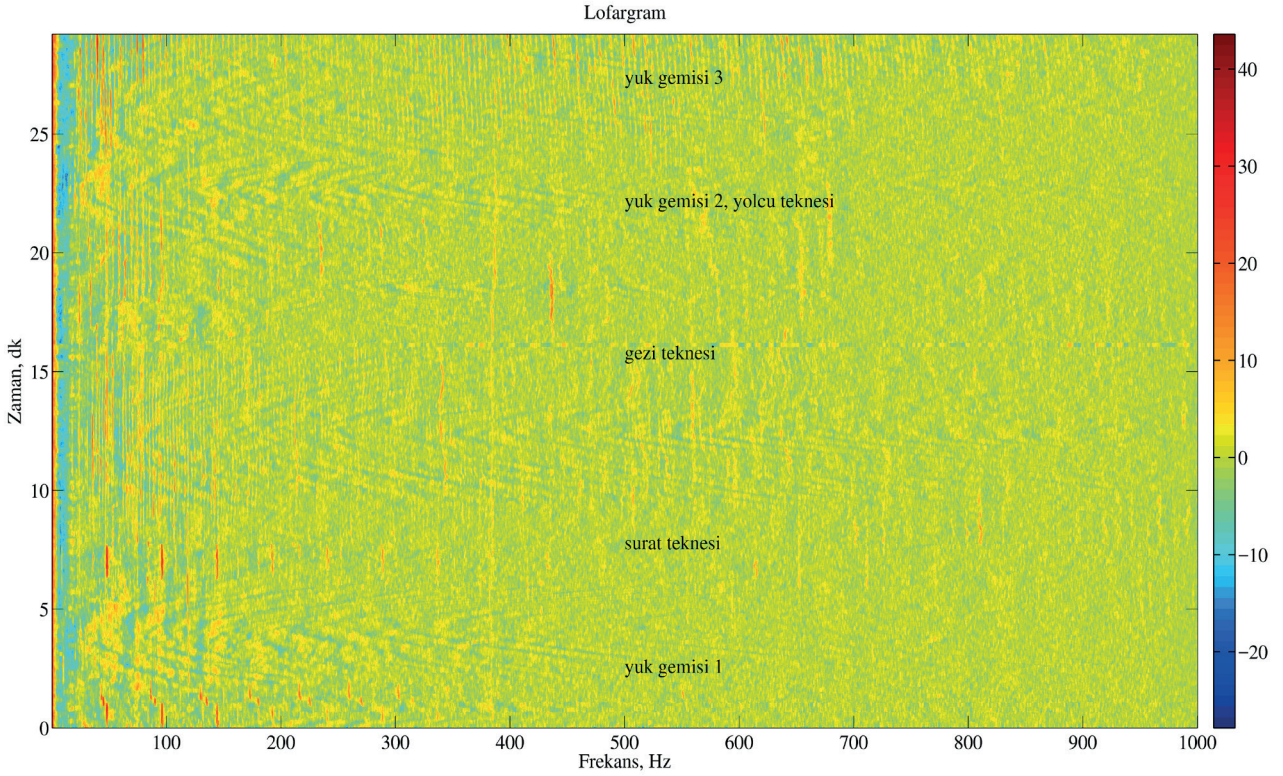
2.1. Demon

Pervane kavitasyonu sonucu meydana gelen patlamalar, her bir pervane kanadı düşük basınç bölgesinden geçerken gerçekleşir. Dolayısıyla, modüle eden sinyal, Pervane Şaftı Dönüş Hızı (Propeller Shaft Rate – PSR) ile Pervane Kanat Sayısı (Number of Blades – NOB)'nın çarpımı ile elde edilen Kanat Dönüş Hızı (Blade Rate – BR) olarak bilinen frekansta bileşenler içerir; $(BR) = (PSR) * (NOB)$.

Kanatlardan biri fiziksel olarak diğerlerinden farklılaşmışsa daha fazla kavitasyona sebebiyet verebilir. Herhangi bir kanadın dönüş hızı pervane şaftınınkiyle aynı olduğundan bu farklılaşmış kanat PSR frekansında ve harmoniklerinde bileşenler üretebilir.

Geminin birden fazla pervaneye sahip olması ve bu pervanelerin çevresel/yapısal etkenlerden dolayı farklı hızlarda dönmesi sonucu birden fazla PSR ve BR belirebilir. Böylece frekans analizinde geminin Şaft Sayısı (Number of Shafts – NOS) da tespit edilebilir. Bunun için farklı pervane tonellerinin frekans uzayında ayrılabilmesi gerekir. Frekans çözünürlüğünün farklı PSR'lerin ayrılmasına yetmediği durumda her bir pervanenin ürettiği BR ya da daha yüksek frekanslardaki harmoniklerinin ayrılabilmesi daha olasıdır.

Pervane tonellerinin frekans analizinde kullanılan temel yöntem Demon'dur. Bu yöntem haberleşme literatüründen borç alınan bir kavram olan zarf işaretini kestirir. Bunun için öncelikle geniş bant kavitasyon gürültüsünün baskın olduğu frekans bandında bir bant geçiren süzgeç sinyale uygulanır. Böylece, kavitasyon görülmeyen bantlardaki istenmeyen gürültü azaltılır. Sonraki aşamada süzülen işaretin karesi alınarak işaret zarfı elde edilir. Tipik PSR ve BR değerleri çok düşük frekanslarda olduğundan zarf işareti alt örneklenir. Son aşamada ise, izge kestirimi yapılarak Demon izgesi elde edilir.



Şekil 2 – BANAS ile Beykoz açıklarında kaydedilmiş gemi gürültülerine ait Lofargram. Kayıt uzunluğu yaklaşık 29 dk, frekans çözünürlüğü yaklaşık 0,5 Hz.

Bu işlem her bir sinyal penceresinde gerçekleştirilerek Demogram oluşturulur.

2.2. Lofar

Giriş bölümünde bahsedildiği gibi günümüzde gemiler genellikle dizel ana makinelere sahiptir. Dizel gürültüsünü üreten en önemli etken silindirlerdeki piston vuruşlarıdır. Bu vuruşlar darbe tipi bir titreşim üretir ve tekne üzerinden su altına yayılır. Belirli bir silindirde gerçekleşen vuruşların frekansı Silindir Ateşleme Hızı (Cylinder Firing Rate – CFR) olarak adlandırılır. Bütün silindirlerde gerçekleşen vuruşların frekansı ise Makine Ateşleme Hızı (Engine Firing Rate – EFR) adıyla bilinir ve Silindir Sayısı (Number of Cylinders – NOC) ile CFR'nin çarpımıyla bulunur, $(EFR) = (CFR) * (NOC)$. Dizel makine iki zamanlı ise, Krank Mili Hızı (Crankshaft Rate – CSR) CFR'ye eşit; dört zamanlı ise CFR'nin iki katıdır, $(CSR) = 2 * (CFR)$. Tüm bu bileşenler darbe tipi periyodik gürültüler sonucu olduğundan frekans analizinde çok sayıda harmonik görülebilir.

Gemilerde, itki sistemi kaynaklı bir diğer gürültü dişli gürültüsüdür. Dişli aktarım sistemi farklı devirlerdeki itki sistemlerinin arasındaki geçişi sağlar. Dişli üretim hataları, dişli hizalama hataları, dişli sertliği, dişli adımı ve en önemlisi dişlerin birbirlerine temasından kaynaklanan vuruşlar dişli gürültüsünü meydana getirir. Dişli gürültüsü izgesi incelendiğinde dişli çarkının hızına ve çark üzerindeki diş sayısına bağlı frekans bileşenleri gözlenebilir.

İtki sistemi dışında gemilerin akustik izlerine katkı yapan diğer bir mekanik kaynak yardımcı makinelerdir. Jeneratörler, tulumalar, fanlar, pompalar, klima üniteleri ve kompresörler gibi destek sistemleri makina gürültüsünde önemli rol oynamaktadırlar.

Makine gürültüleri düşük frekanslarda görülür ve dar bant bileşenler içerir. Makine tonelleri adıyla da adlandırılan bu bileşenler Lofar yöntemi ile kestirilir. Lofar, kısaca, sinyalin alt örneklenmiş halinin güç izgesini verir. Bu işlem her bir sinyal penceresinde gerçekleştirilerek Lofargram oluşturulur. Gelecek bölümde, gerçek dünya kayıtlarından elde edilmiş Demogram ve Lofargram örnekleri ve bunların gemi sınıflandırmada kullanım biçimleri verilmektedir.

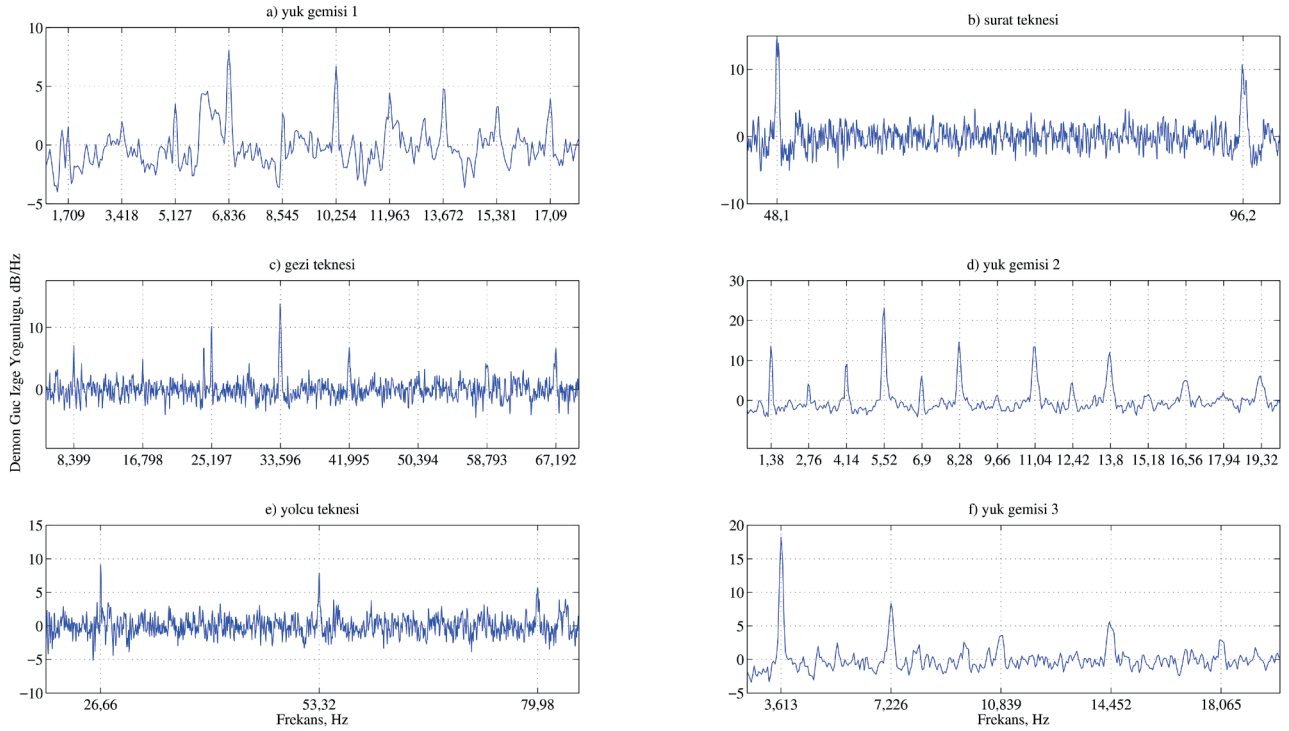
3. Nümerik Örnekler

İstanbul Boğazı yoğun ticari denizcilik faaliyetlerinin yapıldığı önemli bir rota üzerinde yer alır. Boğazı transit geçen çeşitli tipte yük gemilerinin yanında iki yaka arasında çalışan yolcu, sürat ve gezi tekneleri gibi deniz araçları yoğun bir trafik oluşturur.

Bu çalışmada, gemi akustik iz analizi için BANAS ile Beykoz açıklarında kaydedilmiş veriler¹ kullanılmıştır. Bu veriler, literatürde fırsat gemileri (ship of opportunity) olarak bilinen gemilere ait gürültüleri içermektedir. Bir geminin akustik izinin kontrollü deneylerle ölçülmesi pahalı bir süreçtir. Hali hazırda ölçüm sahasından geçen fırsat gemileri bu amaçla tercih edilmektedir. Bu durumun getirdiği dezavantaj ise, gemilerin ayrıntılı pervane ve makine bilgilerinin bilinmemesi, dolayısıyla iz analizinin doğrulamasındaki zorluklardır.

Bu sebeple, yukarıda sayılan gemi sınıflarının Demon ve Lofar analizleriyle sınıflandırılabilmesi için pervane ve makine tonellerinin frekansları kabaca bilinmelidir. Örneğin, modern yük gemilerinin tipik PSR değerleri 1,25-2,25 Hz arasındadır [2, Bl. 8]. Yine tipik olarak 4 ila 6 kanatlı

¹BANAS verileri tüm ilgili araştırmacıların kullanımına açıktır. İletişim: Tayfun Akgül, tayfunakgul@itu.edu.tr



Şekil 3 – BANAS ile Beykoz açıklarında kaydedilmiş gemi gürültülerine ait ortalama Demon izgeleri. Frekans çözünürlüğü yaklaşık 0,05 Hz.

pervanelere sahiplerdir. Dolayısıyla, Demon izgesinde 5 ila 13,5 Hz arasında BR bileşenleri beklenir.

Literatürde yük gemileri dışındaki gemi tiplerinin beklenen pervane tonel frekansları hakkında yeterli nicelik ve nitelikte çalışma yoktur. Kayda değer çalışmalardan birinde [18], farklı yolcu gemileri için 13 Hz civarı ve harmoniklerinde toneller kaydedilmiştir. Yine aynı çalışmada, farklı tipte sürat teknelerinin 25-50 Hz temel frekanslarında ve bu frekansların harmoniklerinde toneller ürettiği gözlenmiştir.

Demon analizi, pervane tonelleri arasındaki ilişki tek bir denklemle ifade edildiği için, çok sayıda makinenin (ana makine, dişli aktarım sistemi, yardımcı makineler) birbirleriyle ilişkisi sonucu oluşan makine tonellerinin analizinden çok daha kolaydır. Makine tonellerinin anlamlandırılması için ise Lofar analizi sonucu elde edilen çok sayıda dar bant bileşenin birbirleri arasındaki ilişkinin tespiti şarttır.

Bu çalışmada kullanılan verilere ait kısıtlı gözlem bilgileri mevcuttur. Ölçüm sistemine, kabaca en yakın yaklaşma noktasından (Closest Point of Approach – CPA) geçen gemilerin geçiş zamanları kaydedilmiştir. Şekil 1 ve 2'de sırasıyla Demogram ve Lofogram'ı görülen yaklaşık 29 dakikalık veri için ilgili gözlem notları gözlemin yapıldığı zamana denk gelecek şekilde gramlarda gösterilmiştir.

Demogram incelendiğinde tüm gemi tiplerine ait pervane tonelleri açıkça görülmektedir. Örneğin, "yuk gemisi 1" için 2-8 dk aralığında yaklaşık 1,71 Hz'ten 1,46 Hz'e doğru azalan PSR bileşeni ve yaklaşık 6,84 Hz'ten 5,81 Hz'e doğru azalan BR bileşeni gözlenmektedir. Bu bilgilerden, ilgili geminin 4 kanatlı pervaneye sahip bir yük gemisi olduğunu söylemek mümkündür.

Demogram'ın 6-7,5 dk aralığında yaklaşık 48,14 Hz ve 96,28 Hz'te iki adet pervane toneli mevcuttur. Bu kadar yüksek

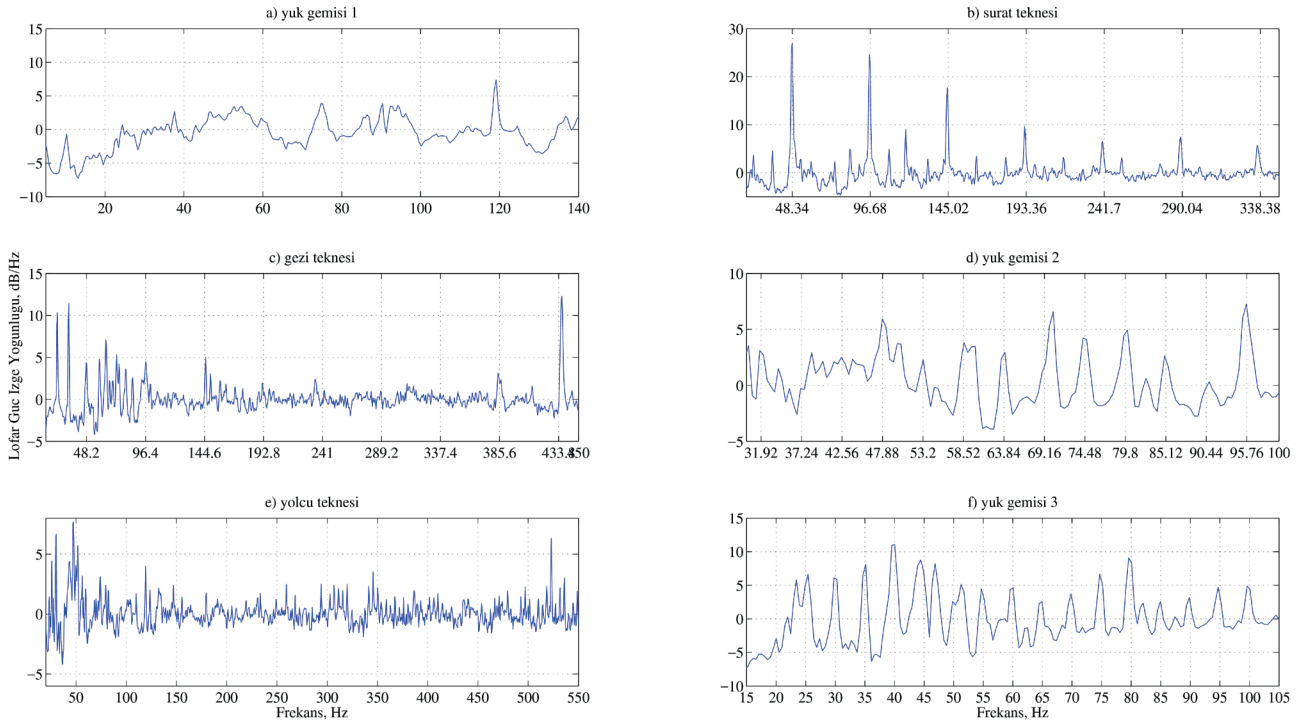
frekanslı bileşenler tipik olarak sürat tekneleri tarafından üretilir. İlgili zaman aralığındaki gözlem bu tespiti doğrulamaktadır.

13,5-16,5 dk aralığında yapılan "gezi teknesi" gözlemi Demogram'da 8,4 Hz ve harmoniklerinde görülen tonellerle ilişkili olabilir. Dördüncü harmonik frekansı 33,6 Hz ile birlikte düşünüldüğünde bu iki frekans sırasıyla PSR ve BR'yi vermektedir. Dolayısıyla "gezi teknesi" 4 kanatlı bir pervaneye sahiptir.

Bir diğer yük gemisinin tonelleri 20-25 dk aralığında açıkça görülmektedir. Yaklaşık 1,37 Hz'lik PSR ve 5,52 Hz'lik BR bileşenleri yine 4 kanatlı pervaneye sahip bir yük gemisine işaret etmektedir. Yine aynı zamanda gözlenen bir gemi 26,66 Hz'ten 27,83 Hz'e doğru artan bir tonel ve iki harmoniğe sahiptir. Bu tonellerin ilgili gözlem zamanından hareketle "yolcu teknesi" etiketli gemiye ait olduğu düşünülmektedir. Son olarak, "yuk gemisi 3" etiketli geminin 3,61 Hz'te BR bileşeni ve birkaç harmoniği gözlenmektedir.

Dikkat edilirse, Demogram'da gözlenen birbiriyle ilgili harmonikler birbirinin tam katı değildir. Ayrıca, bazı toneller belirli bir merkez frekans etrafında gezen değişken frekans bileşenlerine yol açmaktadır. Unutulmamalıdır ki, su altı ortamı karmaşık süreçler barındırır; ses hızı profilinin değişkenliği, çok yönlü yayılım, yüzey dalgaları vb. etkenler durağan olmayan sinyaller üretebilir. Bu durum, frekans tespitlerinde yukarıda saydığımız etkilere yol açabilir.

Şekil 2'de yukarıda bahsedilen gemilere ait Lofogram görülmektedir. Daha önce de bahsettiğimiz gibi gemi makineleriyle ilgili bilgiler yetersizse Lofar analizi yapmak oldukça zordur. Yine de yukarıda sayılan gemi sınıflarıyla ilgili birkaç yorum yapmak mümkündür. Örneğin, yüksek ihtimalle "yuk gemisi 3" etiketli gemiye ait yaklaşık 40 Hz'te bir EFR bileşeni ve yaklaşık 5 Hz aralıklarla tekrarlayan



Şekil 4 – BANAS ile Beykoz açıklarında kaydedilmiş gemi gürültülerine ait ortalama Lofar izgeleri. Frekans çözünürlüğü yaklaşık 0,5 Hz.

harmonikler gözlenmektedir. Buradan, temel frekans 5 Hz'te belirmese de, harmoniklerin arasındaki frekans farklarından bu bileşenlerin CFR harmoniklerini temsil ettiğini söylemek mümkündür. Bu da, 40 Hz'lik EFR ile birlikte düşünüldüğünde 8 silindri bir dizel makine tarafından üretildiklerini gösterir. Benzer şekilde “yuk gemisi 2” etiketli geminin yaklaşık 47,88 Hz'te EFR bileşeni ve yaklaşık 5,32 Hz'te CFR bileşeni görülmektedir. Bu değerlerden hareketle, bu geminin 9 silindri bir dizel ana makine kullandığı söylenebilir. Yine “gezi teknesi” için 48,2 Hz'te bir EFR bileşeni olabileceği değerlendirilmektedir.

Lofargram'daki dikkat çekici bir başka unsur da “surat teknesi” etiketli tekne için 48,2 Hz ve harmoniklerinde bileşenlerin gözlenmesidir. Bunların literatürde [19] mekanik BR adıyla anılan ve çok yakın (çok güçlü) hedeflerin modülasyona uğramış pervane tonelleri olabileceği düşünülmektedir. Zira, hatırlanacağı üzere bu tekne için Demogram'da yaklaşık 48,14 Hz'lik bir PSR tespit edilmiştir. Lofargram'ın tamamında çeşitli frekanslarda dar bant bileşenler görülmektedir. Bu tonellerin gözlem kaydı yapılmış ve yapılmamış birçok gemiye ait ana makine, dişli aktarım sistemi ve yardımcı makinelerden kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 3 ve 4'te, 6 ayrı gemi için sırasıyla pervane ve makine tonellerinin ortalama frekans değerlerinin görülebileceği ortalama Demon ve Lofar izgeleri verilmiştir. Ortalamalar, her bir gemi için ilgili Demogram ve Lofargram tespitleri süresince alınmıştır. Yukarıda değinilen tonel frekansları bu izlerde de açıkça görülmektedir. Tek fark ortalama alındığı için daha güçlü frekansların baskın gelmesidir. Gözlenen tonellerin frekansları izgelerin yatay ekseninde verilmiş, Demon ve Lofar parametreleri ise Tablo 1'de özetlenmiştir. Dikkat edilirse, hem Demogram'da hem de Demon izgesinde herhangi bir gemi için çoklu (çok yakın frekanslarda) BR tespiti yapılmamıştır. Yani, tespit edildiği kadarıyla gemilerin tek shaftlı (NOS = 1) olduğu söylenebilir.

Tablo 1: BANAS verisi Demon ve Lofar Parametreleri

Gemi Tipi	Demon				Lofar		
	PSR	BR	NOB	NOS	CFR	EFR	NOC
yuk gemisi 1	1,71	6,84	4	1			
surat teknesi		48,10		1			
gezi teknesi	8,4	33,60	4	1		48,2	
yuk gemisi 2	1,38	5,52	4	1	5,32	47,88	9
yolcu teknesi		26,66		1			
yuk gemisi 3		3,61		1	5	40	8

4. Sonuç

Bu çalışmada, gemilerden su altına yayılan pervane ve makine kaynaklı gürültülerin oluşturduğu akustik izlerin gemi sınıflandırmada nasıl kullanılabileceği sunulmuştur. Demon ve Lofar yöntemleri tanıtılmış, bu yöntemlerle elde edilen izlerden pervane ve makine tonelleri çıkarılmış, gemi pervane ve makinelerinin özellikleri belirlenmiştir. Bunlar için İstanbul Boğazı gibi zorlayıcı bir akustik ortamda toplanmış çeşitli tipte gemi gürültüleri kullanılmıştır. Başlıca zorluklar arasında, çok sayıda geminin zamanda örtüşen izlerinin analizi zorlaştırması, Boğaz'daki çevresel şartların durağan olmayan sinyallere yol açması ve verilerin kontrolsüz deneylerle elde edilmiş olması sayılabilir. Gelecek çalışmalarda, durağan olmayan sinyallerde daha iyi cevap verecek yöntemler araştırılacak, kontrollü toplanmış verilerle doğrulanabilir bir gemi sınıflandırma çalışması yapılacaktır.

5. Teşekkür

Bu çalışma İTÜ BAP tarafından 39264 nolu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] R. J. Urick, Principles of underwater sound, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [2] D. Ross, Mechanics of underwater noise. Los Altos, California: Peninsula Publishing, 1987.
- [3] J. G. Lourens and M. W. Coetzer, "Detection of mechanical ship features from underwater acoustic sound," in Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'87., vol. 12. IEEE, 1987, pp. 1700–1703.
- [4] J. Lourens, "Classification of ships using underwater radiated noise," in Underwater Acoustic Data Processing. Springer, 1989, pp. 591–596.
- [5] A. Kummert, "Fuzzy technology implemented in sonar systems," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 18, no. 4, pp. 483–490, 1993.
- [6] H. Amindavar and P. P. Moghaddam, "Estimation of propeller shaft rate and vessel classification in multipath environment," in Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. 2000. Proceedings of the 2000 IEEE.
- [7] R. Fischer and R. D. Collier, "Noise prediction and prevention on ships," *Handbook of Noise and Vibration Control* (2007): 1216–1232.
- [8] R. O. Nielsen, "Cramer-rao lower bounds for sonar broad-band modulation parameters," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 24, no. 3, pp. 285–290, 1999.
- [9] A. Kudryavtsev, K. Luginets, and A. Mashoshin, "Amplitude modulation of underwater noise produced by seagoing vessels," Acoustical Physics, vol. 49, no. 2, pp. 184–188, 2003.
- [10] F. Bao, X. Wang, Z. Tao, Q. Wang, and S. Du, "Adaptive extraction of modulation for cavitation noise," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 126, no. 6, pp. 3106–3113, 2009.
- [11] —, "Emd-based extraction of modulated cavitation noise," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 24, no. 7, pp. 2124–2136, 2010.
- [12] P. Clark, I. Kirsteins, and L. Atlas, "Multiband analysis for colored amplitude-modulated ship noise," in Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010, pp. 3970–3973.
- [13] K. W. Chung, A. Sutin, A. Sedunov, and M. Bruno, "Demon acoustic ship signature measurements in an urban harbor," Advances in Acoustics and Vibration, vol. 2011, 2011.
- [14] I. Kirsteins, P. Clark, and L. Atlas, "Maximum-likelihood estimation of propeller noise modulation characteristics," Proc. Underwater Acoustic Measurements, 2011.
- [15] U. Firat and T. Akgul, "Spectral estimation of cavitation related narrow-band ship radiated noise based on fractional lower order statistics and multiple signal classification," in Oceans - San Diego, 2013, Sept 2013, pp. 1–6.
- [16] N. N. De Moura, J. M. De Seixas, and R. Ramos, "Passive sonar signal detection and classification based on independent component analysis," INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [17] U. Ulug, T. Akgul, and C. Gezer, "Ambient noise measurements in the strait of istanbul," in Proceedings of the Institute of Acoustics, Conference on Underwater Noise Measurement, Impact and Mitigation, vol. 30, oct 2008, pp. 35–42.
- [18] K. W. Chung, A. Sutin, A. Sedunov, and M. Bruno, "DEMON acoustic ship signature measurements in an urban harbor," *Advances in Acoustics and Vibration*, 2011.
- [19] P. T. Arveson and D. J. Vendittis, "Radiated noise characteristics of a modern cargo ship," *The Journal of the Acoustical Society of America* 107.1 (2000): 118-129.



Umut FIRAT

Umut Firat, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2003 yılında lisans, 2006 yılında yüksek lisans derecelerini almıştır. Şu anda İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde doktora çalışmalarını sürdürmektedir. Aynı zamanda TÜBİTAK BİLGEM Bilişim Teknolojileri Enstitüsü'nde araştırmacı olarak çalışmaktadır. Araştırma ilgi alanları arasında sualtı akustik işaret işleme, örüntü tanıma ve sıkıştırımlı algılama vardır.



Tayfun AKGÜL

Prof. Dr. Tayfun Akgül lisans ve yüksek lisans derecelerini, sırasıyla 1985 ve 1988 yıllarında İTÜ Elektronik ve Haberleşme Bölümünde tamamladı. Doktorasını 1994 yılında Pittsburgh Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümünde bitirdi. 1986 - 1988 arası TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Enstitüsü'nde, Eylül 1988'den itibaren Çukurova Üniversitesi'nde çalışmaya başladı. 1989-1994 arasında Pittsburgh Üniversitesi'nde doktora çalışması yaptı. 1996'da Çukurova Üniversitesi'nde Doçent oldu. 1997-1999 tarihleri arasında Drexel Üniversitesi'nde bulundu. 1999 - 2002 arasında TÜBİTAK-MAM'da Başuzman Araştırmacı unvanıyla çalıştı. Temmuz 2002'de İTÜ'ye Profesör unvanıyla atandı. Halen İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde görev yapmaktadır. İTÜ ARIS Lab (Advanced Research on Images and Signals – İleri Sinyal ve Görüntü İşleme) adlı araştırma laboratuvarının yöneticisidir.

Sinyal ve görüntü işleme alanında (yakın zamanda özellikle "yüz tanıma" konusunda) araştırmalar yapmakta ve karikatür çizmektedir.

Keyfi Şekilli Dielektrik Yüklü Dalga Kılavuzları için Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi

Determination of Scattering Parameters for Waveguides Loaded with Arbitrarily Shaped Dielectric Materials

Alican Uysal¹, Ahmet Aydoğan^{1,2}, Sedat Kılınç^{1,3}, Tuğhan Çağlayan¹, Funda Akleman¹

¹Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
uysala@itu.edu.tr, caglayant@itu.edu.tr, akleman@itu.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Marmara Üniversitesi
ahmet.aydogan@marmara.edu.tr

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Üniversitesi
sedat.kilinc@istanbul.edu.tr

Öz

Keyfi şekilli cisimle yüklenmiş dikdörtgen kesitli dalga kılavuzlarında en genel halde TE ve TM tipi modlar uyandırılmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak keyfi şekilli manyetik olmayan dielektrik malzeme yüklü dikdörtgen kesitli dalga kılavuzları için TE tipi mod ayrıklaştırılması incelenmiştir. Dalganın ilerleme yönünde dielektrik malzemenin süreksizlik ara yüzeyleri (jonksiyon) üzerinde oluşan manyetik alanın uzunlamasına bileşeni, doğası gereği TE tipi modlara aittir. Bu sayede yalnızca jonksiyon üzerinde oluşan manyetik alanın uzunlamasına bileşeninden TE tipi modal bileşenleri çekmek mümkün olmaktadır. İkinci aşama olarak, yapılan mod ayrıklaştırma ile baskın mod bilgisine geçilmiş ve incelenen yapıya ait saçılma parametreleri ele alınan yaklaşım ile elde edilmiştir. Yapılan çalışma, keyfi şekilli dielektrik malzemeler ile yüklenmiş dalga kılavuzlarının modal analizi için temel oluşturmaktadır. Ele alınan yöntemin doğrulanması için hem ticari paket programlar kullanılmış, hem de ölçüm yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dikdörtgen dalga kılavuzu, modal analiz, genelleştirilmiş saçılma matrisi

Abstract

In the most general case, arbitrarily dielectric loaded rectangular waveguides allow the excitation of TE and TM modes. In this study, TE mode extraction for arbitrarily shaped, non-magnetic, dielectric loaded rectangular waveguide is analyzed as a first step. Longitudinal component of magnetic field on the discontinuity junctions of the dielectric obstacle is of TE type modes, inherently. Hence, TE type modes can be extracted from the data of longitudinal magnetic components. By this means, extraction of dominant mode is performed and scattering parameters of the analyzed cases are obtained. This study is a basis for the analysis of a

complete modal analysis of dielectric loaded waveguides. Validation of the proposed approach is carried out by a commercial software and measurement results.

Keywords: Rectangular waveguide, modal analysis, generalized scattering matrix

1. Giriş

Dalga kılavuzları, yüksek güç taşıma kapasiteleri, termal kararlılıkları, düşük kayıp ve yüksek kalite faktörüne sahip olmak gibi özelliklerinden dolayı uydu haberleşmesi, askeri uygulamalar ve mobil haberleşme sistemlerinde tercih edilen mikrodalga araçlarıdır. Dalga kılavuzları ile mikrodalga cihazı tasarımında genel olarak izlenen yöntemler 1) kılavuz içerisine metalik süreksizlikler yerleştirmek (örn: indüktif açıklıklar, kapasitif yapılar) 2) kılavuz içerisine dielektrik süreksizlikler yerleştirmek olarak sınıflandırılabilir. Kılavuz içinde metalik süreksizliklerle tasarım yapılması imalat bakımından zor bir sürece neden olmaktadır. Ayrıca dielektrik yapıların kılavuz içerisinde sabit olarak bulunma zorunluluğu olmadığı için, cihazın kullanımında esneklik sağlanmaktadır. Örneğin metalik süreksizliklerle tasarlanmış bir dalga kılavuzu filtrenin karakteristiği sabit iken, dielektrik yüklü bir dalga kılavuzu rahatça başka dielektrik yapılar ile yüklenerek farklı amaçlar için kullanılabilir. Aynı zamanda, dielektrik yüklü dalga kılavuzları ile daha küçük boyutta filtre tasarımlarının mümkün olabileceği öngörülebilir. Bu ise hem maliyet, hem de malzeme kaynaklı kayıplardan dolayı dezavantaj oluşturmaktadır. Tüm bu nedenler göz önüne alındığında dielektrik yüklü dalga kılavuzları ile yapılan tasarımlar daha ilgi çekici olmaktadır. Dielektrik yüklü dalga kılavuzları mikrodalga mühendisliğinde faz kaydırıcı, filtre, empedans uygunlaştırıcı gibi birçok uygulama alanına sahiptir [1-4]. Bu tür cihazların tasarımı için incelenen yapıya ait saçılma parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Dalga kılavuzlarının kesiti tamamen doldurulduğunda yapının uzunlamasına doğrultudaki süreksizlik yüzeyinde her mod yalnızca kendisi ile etkileşimdedir. Bu yüzden, baskın mod ile uyarılma durumunda yapının süreksizlik yüzeyinde sadece baskın mod etkileşimine bakmak, toplam yapının modal analizi için yeterli olacaktır. Bu durumda tüm yapı iki kapılı devre gibi modellenebilir ve yapının saçılma parametreleri cinsinden analizi, seçilen iletim matrislerinin (ABCD Matrisi, T Matrisi vb.) basit matematiksel bağıntıları ile yapılabilir. Kesiti tam doldurmayan yüklemelerde modların çapraz etkilişimi nedeni ile üst modlar uyarılabilir. Baskın mod bölgesinde çalışırken üst modlar boş kılavuz içerisinde sönümlenme özelliğinde olsa da, arka arkaya bağlı süreksizliklerin modal etkileşim analizinde gözardı edilmesi sayısal hesaplamalarda kararsızlığa neden olur. Bu durumda, incelenen yapının analizi için iki kapılı devre modeli geçerliliğini yitirmekte ve yapının N kapılı bir devre gibi modellenmesi gerekmektedir. Ele alınan modelde, her kapı hesaba katılan bir modu temsil etmektedir ve modların birbiri ile ilişkisinin tayini ile oluşmaktadır. Bu tür yapıların analizi için en çok başvurulan yöntem mod eşleştirme yöntemi olduğu için, iki kapılı yapıya ait saçılma parametrelerinin yerini, N kapılı yapıya ait Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (GSM) alır. GSM'nin eldesi ile beraber, kaskat süreksizliklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Literatürde incelenen bir çok çalışmada, analizinin kolaylığı nedeni ile TE^{m0} tipi modların uyarıldığı durumlar ele alınmıştır [5-7]. TE^{1m} ve TM^{1m} modlarının uyarıldığı özel bir yüklem (H-düzlem dielektrik yüklem) ayrıca [8]'de incelenmiştir. Her ne kadar kaskat süreksizliklerin analizi GSM yöntemi ile kolayca yapılsa da, ele alınan birim yapıların modal analizi keyfi şekilli malzeme süreksizlikleri için oldukça karmaşık hale gelmektedir. [9] çalışmasında, dikdörtgen bir dalga kılavuzu keyfi şekilli dielektrik malzeme ile yüklendiğinde oluşan alan ifadelerini tanımlayan integral denklemin Moment Yöntemi ile çözümü incelenmiştir. Her ne kadar tüm modların hesaba katıldığı etkili bir yöntem olsa da, Moment yönteminin dezavantajı, hesaplama yükünün fazla olmasıdır.

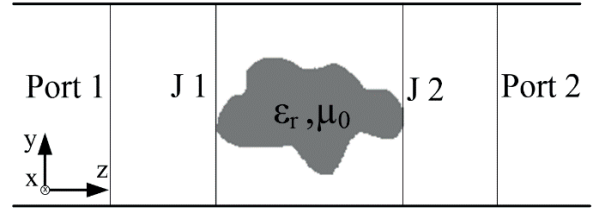
Bu çalışmada, dalga kılavuzu içerisinde keyfi şekilli dielektrik yüklem durumunda baskın mod ile oluşacak baskın mod ile yüksek dereceli TE modların etkileşimi incelenmiştir. Bu amaçla dalga kılavuzu farklı geometride dielektrikler ile yüklenmiş ve süreksizlik üzerindeki alan dağılımından TE mod bileşenleri, modların dikliği esasından faydalanılarak çekilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğu yansıma ve iletim katsayıları cinsinden hem sayısal modelleme hem de ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Sunulan çalışma şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci kısımda problemin sunumu ve ele alınan probleme ait tanımlamalar yapılmıştır. Üçüncü kısımda, incelenen problemin çözümü için önerilen yaklaşımlar ve çözüme temel oluşturan matematiksel bağıntılar verilmiştir. Dördüncü kısımda, farklı senaryolar içeren örnekler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Sonuç kısmında ise, bu çalışmada elde edilen tecrübelerden faydalanılarak incelenmesi düşünülen problemler tanıtılmış ve çalışmanın literatüre katkısı tartışılmıştır. İncelenen çalışmada zaman bağımlılığı $e^{i\omega t}$ alınmış ve ifadelerde gösterilmemiştir.

2. Problemin Tanımı

Ele alınan problemin geometrisi Şekil 1 ile verilmiştir. Dalganın ilerleme yönünde kesiti değişmeyen (tekdüze) dikdörtgen boş dalga kılavuzu içerisine manyetik olmayan ($\mu = \mu_0$), bağıl dielektrik değeri ise ϵ_r olan bir cisim yerleştirilmiştir. En genel halde, malzemenin dielektrik değeri konumla değişebilir ve/veya cisim ayrık parçalardan oluşabilir. *Port 1* ve *Port 2* sırasıyla yansıma ve iletim katsayılarının ölçüldüğü düzlemleri, *J1* ve *J2* ise dalganın

ilerleme yönünde sırasıyla cismin başlangıç ve bitiş düzlemlerini temsil etmektedir.



Şekil 1: Problemin geometrisi.

J1 ve *J2* jonksiyonları üzerinde tüm modlar oluşmaktadır. Bu çalışmanın amacı dalga kılavuzuna yerleştirilmiş keyfi şekilli dielektrik cisimlere ait GSM'nin elde edilmesi için temel oluşturulmaktadır. Çalışmanın hedefi, *J1* ve *J2* jonksiyonları üzerinde oluşan TE tipi modal bileşenleri belirlemektir. Doğrulama için hem sayısal hem de gerçek ölçüm düzeneklerinden ve önerilen yaklaşımdan elde edilen yansıma ve iletim katsayıları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle alan gözlemlerinin yapılacağı *Port 1* ve *Port 2* zayıflayan modların yeterince sönümleneceği kadar uzağa yerleştirilmiştir. Dalga kılavuzu *Port 1*'den uyarılmış ve baskın mod bölgesinde çalışılmıştır. Bölüm 3'te çalışmanın amacına yönelik kullanılan temel bağıntılar verilmiştir.

3. Temel Bağıntılar

Keyfi doldurulmuş bir dalga kılavuzunda süreksizlik nedeni ile oluşan alan bileşenleri en genel halde TE ve TM modlarına ait alanların toplamı olarak ifade edilmektedir. Bu alan ifadeleri özellikle jonksiyon bölgelerinde 6 bileşeni ($E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$) de ihtiva eder. En genel anlamda bu bileşenlerden E_x, E_y, H_x ve H_y hem TE hem de TM polarizasyonlara ait olabilmektedir. Dolayısıyla bu alan bileşenleri doğrudan polarizasyon ayrıklaştırılması için kullanılamamaktadır. Dalganın ilerleme yönündeki E_z ve H_z bileşenleri ise polarizasyona özgü olup bu bileşenler vasıtasıyla TE ve TM modları birbirinden bağımsız olarak elde edilebilmektedir. Dikdörtgen dalga kılavuzu için TE_{mn} ve TM_{mn} modlarına ait uzunlamasına alan bileşenleri H_z ve E_z 'nin modal ifadeleri sırası ile (1a) ve (1b) bağıntıları ile verilmiştir.

$$H_{mn}(\vec{r}) = A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-i\beta_{mn}|z-z'|} \quad (1a)$$

$$E_{mn}(\vec{r}) = B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-i\beta_{mn}|z-z'|} \quad (1b)$$

Bu bağıntılarda A_{mn} ve B_{mn} ilgili moda ait kompleks modal bileşen katsayılarını, β_{mn} ilgili moda ait faz sabitini, z' ise kaynak (uyarma) düzlemini göstermektedir. Dikdörtgen dalga kılavuzunun yatay ve düşey boyutları ise a ve b ile gösterilmiştir. Herhangi bir kesit ele alındığında kesit üzerindeki uzunlamasına alan bileşenlerinin toplam ifadesi ise (2a) ve (2b) bağıntılarında gösterildiği gibi olmaktadır.

$$H_z(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (2a)$$

$$E_z(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (2b)$$

Görüldüğü üzere uzunlamasına alan bileşenleri kesit üzerinde iki boyutlu sinüs ve kosinüs Fourier serileri şeklinde yazılabilmektedir. Eşitliğin sol tarafındaki büyüklükler bilindiği takdirde bilinmeyen A_{mn} ve B_{mn} katsayıları (3a) ve (3b) bağıntılarında verildiği şekilde elde edilebilir. Bu bağıntılarda Ω dalga kılavuzunun kesit alanını göstermektedir.

$$A_{mn} = \frac{\iint_{\Omega} H_z(x,y) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega}{\iint_{\Omega} \cos^2\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos^2\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega} \quad (3a)$$

$$B_{mn} = \frac{\iint_{\Omega} E_z(x,y) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega}{\iint_{\Omega} \sin^2\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin^2\left(\frac{n\pi}{b}y\right) d\Omega} \quad (3b)$$

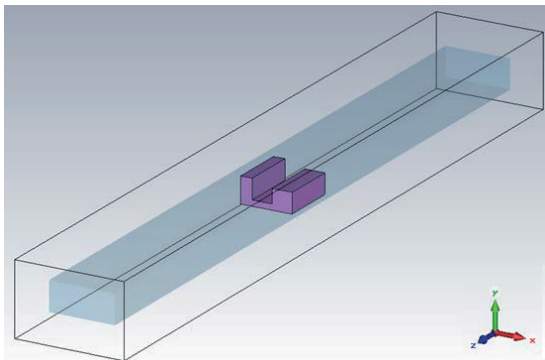
Bu bağıntılar uygun uyarma altında J1 ve J2 jonksiyonlarında kullanıldığında A_{mn} ve B_{mn} katsayıları sırası ile bu jonksiyonlar üzerinde TE_{mn} ve TM_{mn} modlarının uyarılma katsayılarına eşit olmaktadır. Dalga kılavuzu, sadece dominant mod yayılacak şekilde uyarıldığı takdirde jonksiyonda oluşacak üst modlar da sönmümlü olacaktır. Bu durumda ilerleyen modun genliği ve fazı sadece TE_{10} modunun katsayısı ile yani, A_{10} ile ilişkili olacaktır. Bu durumda H^i gelen alanı ifade etmek ve d_1 ve d_2 sırası ile jonksiyonların portlara uzaklığını göstermek üzere sistemin yansıma (S_{11}) ve iletim katsayıları (S_{21}), sırasıyla (4a) ve (4b) ile verilmiştir. z_1 ve z_2 sırası ile jonksiyon düzlemlerini ifade etmektedir.

$$S_{11} = \frac{A_{10} - H^i}{H^i} e^{-i\beta_{10}d_1} \Big|_{z=z_1} \quad (4a)$$

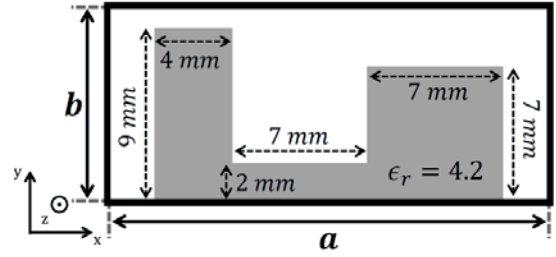
$$S_{21} = \frac{A_{10}}{H^i} e^{i\beta_{10}d_2} \Big|_{z=z_2} \quad (4b)$$

4. Sayısal Sonuçlar

Bir önceki bölümde anlatılan yöntemle elde edilen sayısal sonuçların doğruluk analizi, referans olarak alınan çözüm ve/veya ölçümler ile elde edilen değerler ile karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle jonksiyonlardaki kesit içi uzunlamasına manyetik alan bileşeni H_z , paket program CST Microwave Studio ile elde edilmiştir. Farklı geometriler için bir önceki kısımdaki bağıntılar vasıtası ile hesaplanan S parametrelerinin genliği, CST Microwave Studio ile elde edilen S parametreleri ile karşılaştırılmıştır. (4a) ve (4b)'den görüldüğü üzere yansıma ve iletim katsayılarının hesaplanması için kaynaktan jonksiyona gelen manyetik alanın da bilinmesi gerekir. Bu ise yüksüz dalga kılavuzu için ilgilenilen z düzlemlerindeki alanlara eşdeğerdir. Gelen alan bileşenleri için boş dalga kılavuzunun benzetimi yapılmış ve H^i büyüklüğü de bu sonuçlardan elde edilmiştir. İlk örnekte kayıpsız, homojen ve bağıl dielektrik değeri $\epsilon_r = 4.2$ olan keyfi şekilli cisim, Şekil 2'de gösterildiği gibi kılavuz kesitini kısmen dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Dielektrik cismin kesitteki görünümü ve uzunluk değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Uzunlamasına yönde cismin uzunluğu $l = 20 \text{ mm}$ 'dir. Cisim dalgakılavuzuna, x yönünde orta noktaları çakışık olacak şekilde yerleştirilmiştir.

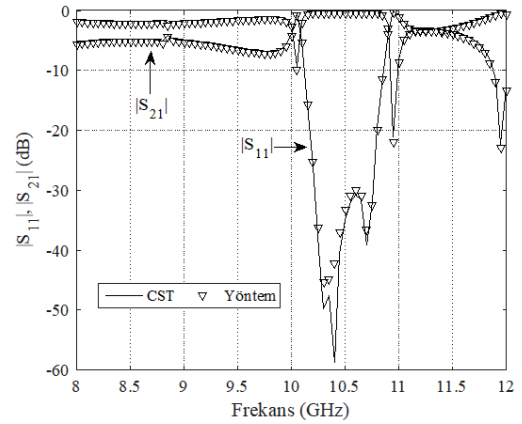


Şekil 2: Dielektrik yüklü dalga kılavuzunun 3 boyutlu görünümü.



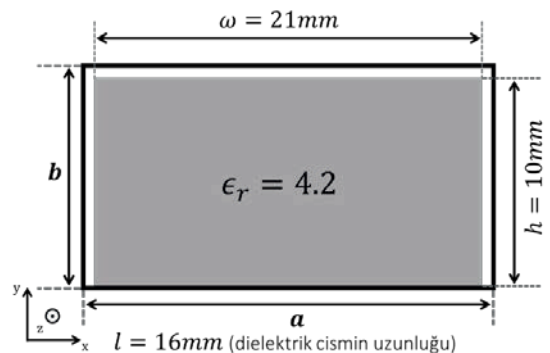
Şekil 3: Örnek 1 - Dielektrik yüklü dalga kılavuzunun kesit görünümü.

Bu probleme ilişkin S_{11} ve S_{21} büyüklükleri hem 3. bölümde anlatılan yöntemle hem de CST ile elde edilmiştir ve Şekil 4'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere her iki yöntem de birbiri ile uyumludur.

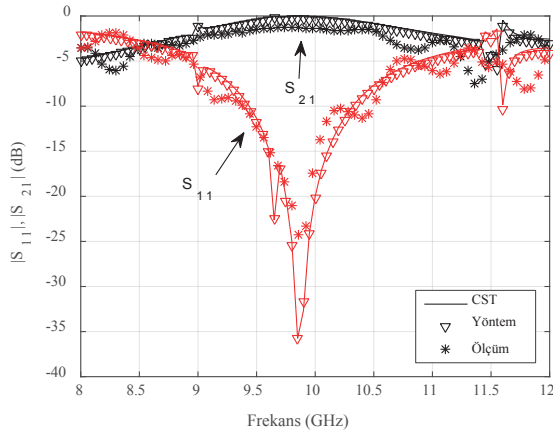


Şekil 4: Örnek 1 - Dielektrik yüklü dalga kılavuzuna ilişkin S parametreleri

İkinci örnekte ise gerçek ölçüm sonuçları ile önerilen yaklaşımın karşılaştırılması yapılmıştır. Ölçümde kullanılacak $(x,y,z) = (21\text{mm} \times 10\text{mm} \times 16\text{mm})$ boyutlarındaki düşük kayıplı malzemenin bağıl dielektrik değerinin gerçel kısmı 4.2'dir fakat iletkenliği tam olarak bilinmemektedir. Cismin kesit görünümü Şekil 5'teki gibidir ve cisim, kılavuzun ortasına $y = 0$ düzleminde x - ekseninde simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kayıpsız olarak kabul edilen malzeme ile kısmi olarak doldurulan dalga kılavuzuna ilişkin saçılma parametreleri, öncelikle CST ile elde edilmiştir. Bu benzetimden elde edilen kesit içi alan dağılımları kullanılarak önerilen yöntemle S parametreleri yeniden hesaplanmıştır. Her iki yöntemle bulunan değerler Şekil 6'da gösterildiği gibi ölçüm sonuçları ile de karşılaştırılmıştır.

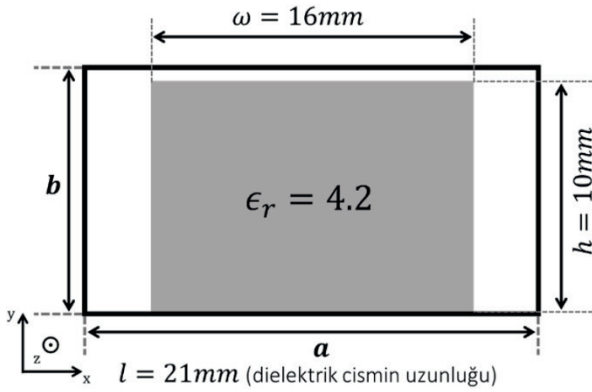


Şekil 5: Örnek 2- Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzu kesiti



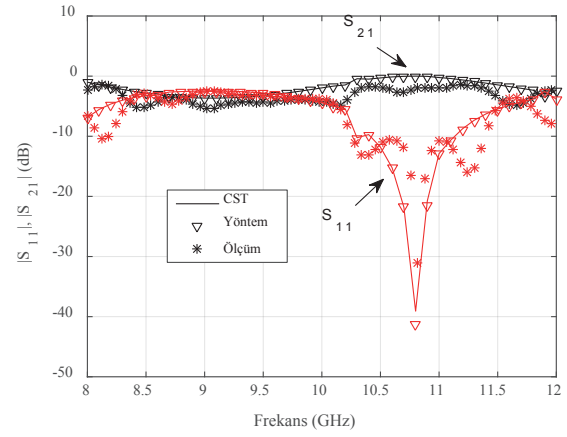
Şekil 6: Örnek 2 - Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzuna ilişkin S parametreleri.

Bir sonraki örnekte, aynı cisim kılavuz içerisine farklı yönelimde, (x, y, z) yönlerinde sırası ile $(16\text{mm} \times 10\text{mm} \times 21\text{mm})$ olacak şekilde yerleştirilerek benzer işlemler tekrarlanmıştır. Bu örnek için yüklü kılavuzun kesit görünümü Şekil 7'de, elde edilen S parametreleri ise Şekil 8'de gösterilmiştir.

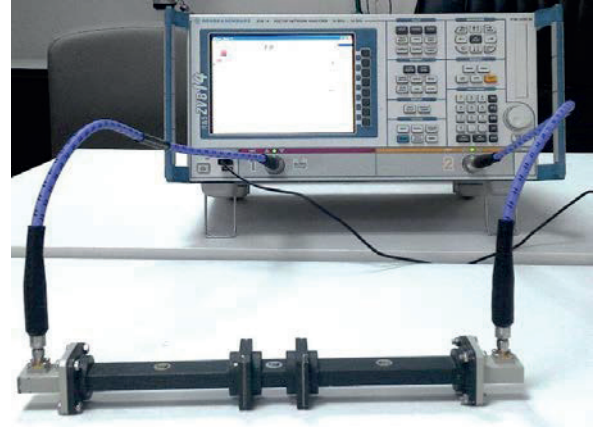


Şekil 7: Örnek 3 - Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzu kesiti.

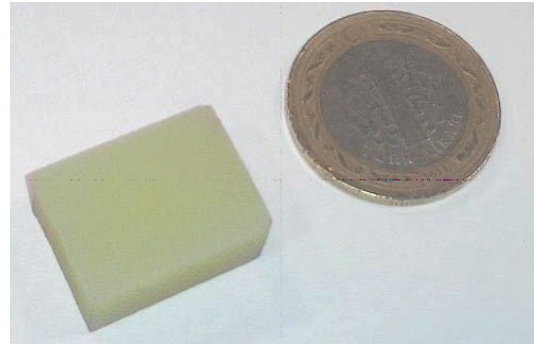
Şekil 6 ve Şekil 8 göz önüne alındığında ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçlarına ve çalışmada önerilen yöntemle elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir. Ölçüm sonuçlarındaki sapmalar, dielektrik malzemenin kayıp tanjantı bilgisinin bilinmemesinden ve ölçüm ortamının ideal olmamasından kaynaklanmaktadır. İkinci ve üçüncü örnekte saçılma parametrelerinin ölçümü için kullanılan "R&S ZVB14 Network Analyzer" ve ilgili düzenek Şekil 9'da, ölçülen dielektrik malzemenin fotoğrafı ise Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8: Örnek 3 - Dielektrik prizma yüklü dalga kılavuzuna ilişkin S parametreleri.



Şekil 9: S parametrelerinin belirlenmesi için oluşturulan ölçüm düzeneği



Şekil 10: Kullanılan dielektrik cisim ve 1 TL

5. Sonuçlar

Bu çalışmada dikdörtgen kesitli dalga kılavuzuna yerleştirilmiş keyfi şekilli dielektrik cisimlere ait GSM'nin kurulması için temel oluşturulmuştur. GSM ele alınan problem için modal ilişki bilgilerini içermektedir. Bu amaçla ilk adım olarak baskın mod ile uyarılan dalga kılavuzunda, dielektrik süreksizlik yüzeyinde oluşabilecek *TE* ve *TM* tipi modların ayıklanması hedeflenmiş ve ilgili formülasyon gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımın doğrulanması için, açıklanan baskın mod bileşeni yansıma ve iletim portlarında gözlemlenmiş ve ticari bir paket program olan CST ile saçılma parametrelerinin genlikleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca iletkenlik değeri bilinmeyen bir dielektrik malzeme kayıpsız kabul edilerek önerilen yöntem, CST ve ölçüm sonuçları yansıma ve iletim katsayıları cinsinden karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, baskın mod ile besleme durumunda süreksizlik yüzeylerinde indüklenen sönümlü modların uyarma katsayılarının hesaplanması için gerekli formülasyon gösterilmiştir. Bunun için ilgili bileşenin jonksiyondaki kesit içi toplam alan dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Eğer jonksiyonda sönümlü modlara ilişkin uyarmalar tanımlanabilirse, en genel halde GSM elde edilebilir. Bu çalışmada kullanılan sayısal modelleme yönteminde sönümlenen modlar ile jonksiyonun uyarılması gerçekleştirilemediğinden, incelenen probleme ait GSM bütün bir şekilde kurulmamıştır, yalnızca baskın mod ve diğer modlar arasındaki ilişki incelenebilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, sönümlenen modlar ile uyarılmanın incelenmesi neticesinde dalga kılavuzuna yerleştirilmiş dielektrik süreksizliklere ait genelleştirilmiş saçılma matrisinin kurulması amaçlanmakta, böylece dalga kılavuzuna yerleştirilmiş keyfi şekilli kaskat dielektrik süreksizliklere ait saçılma parametrelerinin belirlenmesi için yeni bir yaklaşım ön görülmektedir.

Her ne kadar *TE* ve *TM* modlar açıklanan yöntem ile ayrıştırılabilirse de, hesaplanan mod katsayılarının doğruluğunun analizi için kaskat yapıların GSM modellemesiyle elde edilen *S* parametrelerinin aynı yapının GSM kullanmadan doğrudan (örn. paket programdan elde edilen sayısal sonuçlar veya gerçek ölçüm sonuçları ile) hesaplanan *S* parametreleri ile karşılaştırılması uygun olacaktır.

6. Kaynaklar

- [1] F. Arndt, A. Frye, M. Wellnitz ve R. Wirsing, "Double Dielectric-Slab-Filled Waveguide Phase Shifter," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 5, pp. 373-381, May 1985.
- [2] M. Khalaj-amirhosseini, "Wideband Differential Phase Shifters Using Waveguides Filled by Inhomogeneous Dielectrics," *Prog. Electromagn. Res.* pp. 1513-1516, 2009.
- [3] S. Şimşek, E. Topuz, ve E. Niver, "A novel design method for electromagnetic bandgap based waveguide filters with periodic dielectric loading," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 66, no. 3, pp. 228-234, 2012.
- [4] Aydoğan, A.; Akleman, F., "Dielectric Loaded Waveguide Filter Design," 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, 2016
- [5] Leviatan, Y. ve Sheaffer, G. S., 1987. Analysis of inductive dielectric posts in rectangular waveguide, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 35, 48-59.
- [6] C. Bachiller, "Hybrid Mode Matching Method for the Efficient Analysis of Metal and Dielectric Rods in H Plane Rectangular Waveguide Devices," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 12, pp. 3634-3644, Dec. 2010.
- [7] Simsek, S.; Topuz, E., "Some Properties of Generalized Scattering Matrix Representations for Metallic Waveguides With Periodic Dielectric Loading," *Microwave Theory and*

- Techniques, *IEEE Transactions on*, vol.55, no.11, pp.2336,2344, Nov. 2007
- [8] W. K. McRitchie ve M. M. Z. Kharadly, "Properties of interface between homogeneous and inhomogeneous waveguides," in *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 121, no. 11, pp. 1367-1374, November 1974.
- [9] J. J. H. Wang, "Analysis of a Three-Dimensional Arbitrarily Shaped Dielectric or Biological Body Inside a Rectangular Waveguide," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 26, no. 7, pp. 457-462, Jul 1978.



Alican UYSAL

1990 yılında İstanbul'da doğdu. Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 2012 yılında Elektronik Mühendisliği ve 2015 yılında Telekomünikasyon Mühendisliği programlarında aldı. 2015 yılında Telekomünikasyon Mühendisliği bölümünde başladığı Doktora eğitimi devam etmektedir. 2013 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanları arasında antenler, mikrodalga pasif devre tasarımı ve hesaplamalı elektromanyetik bulunmaktadır.



Ahmet AYDOĞAN

1987 yılında Mardin'de doğdu. İstanbul Teknik Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği programında Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini sırasıyla 2009 ve 2012 yıllarında aldı ve aynı programda 2012 yılında başladığı Doktora çalışmalarına devam etmektedir. 2009 ve 2010 yılları arasında FP7 ve Tübitak destekli projelerde araştırmacı, 2011 ve 2013 yılları arasında Doğuş üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2013 yılında Marmara Üniversitesi Elektrik Elektronik mühendisliği bölümünde başladığı Araştırma görevlisi pozisyonunda çalışmaya devam etmektedir. Çalışma alanları arasında elektromanyetikte ters problem ve sayısal yöntemler ile metalik dalga kılavuzu analizleri bulunmaktadır.



Sedat KILINÇ

1990 yılında Kayseri'de doğdu. Lisans derecesini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden, Yüksek Lisans derecesini İstanbul Teknik Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği programından sırasıyla 2012 ve 2015 yıllarında aldı. 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği programında başladığı Doktora eğitimi devam etmektedir. 2012 yılında İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve halen bu göreve devam etmektedir. Çalışma alanları arasında mikrodalga güç kuvvetlendiricileri, RF-elektroniği ve mikrodalga devrelerinin tasarımına yönelik yarı-analitik yaklaşımlar yer almaktadır.



Tuğhan ÇAĞLAYAN

1992 yılında Antalya’da doğdu. Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini İstanbul Teknik Üniversitesi’nde 2014 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ve 2016 yılında Telekomünikasyon Mühendisliği programlarında aldı. 2016 yılında Telekomünikasyon Mühendisliği bölümünde başladığı Doktora eğitimine devam etmektedir. 2014-2015 yılları arasında 113E977 numaralı Tübitak 1003 projesinde araştırmacı olarak çalıştı. 2015-2016 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı. Çalışma alanları arasında elektromanyetik ters problem, mikrodalga görüntüleme teknikleri ve medikal uygulamaları bulunmaktadır.



Funda AKLEMAN

1973 yılında Çanakkale’de doğdu. İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Programında Lisans, Yüksek Lisans ve Doktora derecelerini sırasıyla 1995, 1998 ve 2002 yıllarında aldı. 1995-1996 yılları arasında NETAŞ A.Ş.’de Test Mühendisi olarak çalıştıktan sonra 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde Profesör kadrosunda öğretim üyesi olarak çalışmaya devam etmektedir. Doktora sırasında ve sonrasında ABD ve İngiltere’de çeşitli üniversite ve araştırma laboratuvarlarında çalışmalar yapmıştır. Araştırma konuları arasında elektromanyetik saçılma ve elektromanyetik yayılım problemlerinin sayısal yöntemler ile analizi, radyodalga yayılımı, elektromanyetikte melez yöntemlerin uygulanması, düz ve ters saçılma problemlerine ilişkin yaklaşımlar bulunmaktadır.

