



## Development of semi-real time multi-frequency band supported passive radar system for aerial target detection

Burak Tüysüz\*

Recep Tayyip Erdogan University, Electrical & Electronics Engineering Department, 53100, Rize, Turkey

### Highlights:

- Development of open source code PIRE passive radar system
- Near real time operation
- Multi-frequency support

### Keywords:

- Passive radar
- Aerial target detection
- Software defined radio

### Article Info:

Research Article  
Received: 22.05.2017  
Accepted: 21.12.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416478

### Acknowledgement:

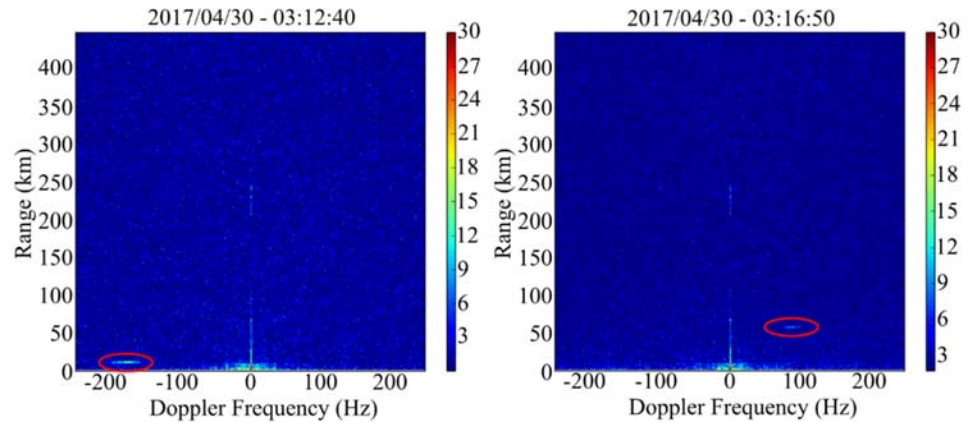
We would like to thank TRT employee Hasan Altan for providing the necessary technical information about TRT FM transmitters.

### Correspondence:

Author: Burak Tüysüz  
e-mail:  
burak.tuysuz@erdogan.edu.tr  
phone: +90 532 381 1936

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, PIRE, multi-frequency band supported open source passive radar system is developed for detecting aerial targets. The frequency and time synchronization of the multi-static system is provided by the global positioning system (GPS) receivers. Also, the employed software defined radio (SDR) technology provides the required flexibility to the system to be used with FM radio, GSM, Wi-Fi and TV transmitters. Initial tests of the proposed system are performed by employing a commercial FM transmitter as the “transmitter of opportunity” in which the system successfully operated near-real time.



**Figure A.** Generated Range-Doppler frequency surfaces from the near-real time operation of the PIRE system which demonstrates a detected commercial plane flying nearby

**Purpose:** The purpose of this study is to develop an open source platform for a multi-static passive radar system that can operate on different frequency bands with various transmitters. For this reason, the RF front end of the system is kept as simple as possible and the required processing blocks are implemented in the software.

**Theory and Methods:** The developed PIRE system adopts SDR technology for easy adaptation to different frequency bands. The multi-static operation is supported by synchronizing spatially separated receivers with GPS receivers and the least squares method is used in the system for direct signal suppression. Additionally, the signal processing blocks are realized in a parallel manner to provide near real time operation.

**Results:** The developed system is tested by employing an available commercial FM transmitter which is 89.6 km far from the reference receiver. Two separate systems are used for the collocated reference and the surveillance receivers for testing of multiple receiver synchronization. In the presented range-Doppler frequency surfaces, two aerial targets are detected at 20km and 50km slant ranges which are approximately 12 dB above the ground clutter.

**Conclusion:** In this study, a multi-channel, flexible and cost-effective passive radar system has been developed by using SDR technologies. The software and hardware components of the PIRE passive radar system have been explained and the performance has been tested by detecting aerial targets. Also, the source codes of the PIRE system software is shared for training, repetition and continuous improvement.



## Hava hedeflerinin tespiti için yakın gerçek zamanlı çoklu frekans bandı destekli pasif radar sisteminin geliştirilmesi

Burak Tüysüz\*<sup>ID</sup>

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Açık kaynak kodlu PİRE pasif radar sisteminin geliştirilmesi
- Yakın gerçek zamanlı operasyon
- Çoklu frekans desteği

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 22.05.2017  
Kabul: 21.12.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416478

### Anahtar Kelimeler:

Pasif radar,  
hava hedef tespiti,  
yazılım tabanlı radyo

### ÖZET

Pasif radarlar, kendilerine ait bir verici bulundurmayan fakat ortamda bulunan vericilerden faydalanarak hedef tespit ve takibi yapabilen radar sistemlerdir. Geçmiş 1934 yılına dayanan pasif radar sistemlerine olan ilgi, özellikle son yıllarda birim işlem maliyetinin düşmesi ve analog-sayısal çeviricilerin yaygınlaşması ile hızlı bir artış göstermiştir. Bu tip sistemlerin en büyük avantajları olarak ise vericileri bulunmadığı için maliyet etkin olmaları ve ticari frekans bantlarında çalıştıkları için tespit edilemez olmaları gösterilebilir. Bu çalışmada, yazılım tabanlı radyo (YTR) teknolojileri kullanılarak özellikle hava hedeflerin tespiti için bir pasif radar sistemi, PİRE, geliştirilmiştir. Sistemin frekans ve zaman senkronizasyonu küresel konumlama sistemi (KKS) ile sağlanmış ve YTR teknolojileri sayesinde sistem FM radyo, GSM, Wi-Fi ve TV vericileri ile de kullanılabilir esneklikte tasarlanmıştır. Bu çalışmada geliştirilen PİRE pasif radar sisteminin donanım ve yazılım bileşenleri tanımlanmış, daha sonra potansiyel VHF FM radyo verici kaynakları incelenmiş, bu kaynakların uygunluk analizi yapılmış ve geliştirilen otomatik veri toplama-işleme yazılımı ile yakın gerçek zamanlı hava hedef tespiti yapılmıştır. Ayrıca PİRE için geliştirilen yazılım açık kaynak kodlu olarak paylaşılmıştır.

## Development of semi-real time multi-frequency band supported passive radar system for aerial target detection

### H I G H L I G H T S

- Development of open source code PİRE passive radar system
- Near real time operation
- Multi-frequency support

### Article Info

Research Article  
Received: 22.05.2017  
Accepted: 21.12.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416478

### Keywords:

Passive radar,  
aerial target detection,  
software defined radio

### ABSTRACT

Passive radars are radar systems that do not have a transmitter of their own but can identify and follow targets by using the transmitters located in the environment. The interest in passive radar systems, whose history dates back to 1934, has shown a rapid increase in recent years, as the unit processing cost has decreased and the spread of analog-to-digital converters has widened. The greatest advantages of such systems are that they are cost effective because they do not have any transmitters and undetectable as they work in commercial frequency bands. In this study, the PIRE passive radar system is developed by using software based radio technologies especially for detecting aerial targets. The frequency and time synchronization of the system is provided by the global positioning system (GPS). Additionally, the software based radio (SDR) technology increases flexibility and enables the system to be used with FM radio, GSM, Wi-Fi and TV transmitters. In this study, the hardware and the software components of the developed PIRE passive radar system are introduced, then the potential VHF FM radio transmitter sources are examined, the compliance analysis of these sources is made, and the semi-real time aerial target detection is performed with the developed automatic data acquisition and processing software. Also, the developed software of the PIRE system is shared as open source code.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: burak.tuysuz@erdogan.edu.tr / Tel: +90 312 586 8091

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, elektromanyetik spektrumdaki doluluk sebebiyle yeni kablosuz teknolojiler için uygun frekans bandı bulmak gittikçe zorlaşmaktadır. Aynı zamanda, artan kablosuz vericilerin oluşturduğu elektromanyetik kirliliğin insan sağlığı üzerinde oluşturabileceği potansiyel etkiler henüz tam olarak bilinmemektedir [1]. Bu sebepler dolayısıyla yeni kablosuz teknolojilere frekans bandı sağlayan ve elektromanyetik kirliliği artırmadan çalışan kablosuz sistemlerin tasarlanması ve var olan sistemlerin frekans spektrumunu daha verimli kullanımının sağlanması büyük önem arz etmektedir [2].

Pasif radarlar, kendine ait bir vericisi olmadan ortamda bulunan vericilerin sinyallerini kullanarak hedef tespiti ve takibi yapabilen sistemler olarak frekans spektrumunun verimli kullanılmasına imkan sağlayan teknolojiler arasında gösterilebilir [3]. Pasif radar sistemlerinde, ortamda bulunan FM radyo, TV, Wi-Fi veya GSM gibi kaynaklara ait vericiler sinyal kaynağı olarak kullanılabilirler [4]. Bu vericiler genellikle “fırsat vericileri” olarak adlandırılmakta ve hedef tespit performansı, çıkış gücü, kapsama alanı gibi özelliklerine göre farklı uygulamalarda kullanılabilirler [5]. Genellikle pasif radar uygulamalarında sisteme ait alıcılardan bir tanesi referans alıcısı olarak adlandırılır ve faydalanılacak vericinin yaydığı sinyalleri yüksek sinyal gürlüğü oranı ile toplamakla görevlendirilir. Sistemin keşif alıcısı olarak adlandırılan diğer alıcılardan ise sadece hedeflerden yansıyan sinyalleri toplaması ve mümkünse vericiden gelen doğrudan sinyallere maruz kalmaması beklenir [6]. Daha sonra, keşif alıcılardan ve referans alıcısından topladığı verilerin karşılaştırılmasıyla hedef tespiti ve takibi yapılabilir. Pasif radar sistemlerinde hedef tespiti için bir referans alıcısı ve bir keşif alıcısı olmak üzere en az iki adet alıcı gereklidir. Bu sebeple pasif radar sistemleri bi-statik radarlar içerisinde sınıflandırılmıştır. Ayrıca, birden fazla keşif alıcısı kullanılarak hedefin noktasal tespiti ve takibi de mümkündür [7].

Özellikle son yıllarda birim sinyal işleme maliyetlerinin düşmesi, analog sayısal çeviricilerin fiyatının azalması ve verici sayılarının artması sebebiyle pasif radarlar atmosferik araştırmalar, savunma uygulamaları ve güvenlik gibi birçok farklı alanda uygulama imkanı bulmuştur. Verici maliyeti olmaması sebebiyle pasif radarların atmosferik araştırmadaki kullanımı ilk olarak Sahr vd. tarafından FM radyo frekans bandında denenmiş ve spesifik olarak arora elektrojet türbülansının incelenmesi için kullanılmıştır [8]. Genellikle 50 MHz’de çalışan atmosferik gözlem radarları iyonosferik dağılma ve saçılmaya maruz kalabilmektedir. Fakat FM radyo frekanslarındaki sinyaller 50 MHz’e göre daha az saçılma ve dağılmaya maruz kaldığı için pasif radarlar ile uzun süreli ve menzilli atmosferik radar izlemeleri mümkün olmaktadır. Bu amaçla ekvatorial elektrojet ve meteor araştırmaları için Tuysuz vd. tarafından

CAPRI sistemi geliştirilerek manyetik ekvator bölgesindeki iyonosferik E ve F bölgesini de kapsayan ilk uzun menzilli pasif radar gözlemleri gerçekleştirilmiştir [9]. Fakat referans ve keşif alıcısının farklı noktalarda bulunduğu bu sistemde hedef tespiti yapılabilmesi için toplanan verilerin tek bir noktaya taşınması gerekmiş ve pasif radar sistemlerindeki bu dezavantaj sistem devamlılığını etkilemiştir. Buna rağmen yapılan çalışmalarla ekvatorial elektrojetin pasif radarlar üzerindeki etkileri de araştırılmış ve toplanan veriler simülasyon sonuçları ile ilişkilendirilerek ekvatorial elektrojetin FM sinyalleri için bir iletişim kanalı görevi gördüğü ve sistem performansını olumsuz etkilediği gösterilmiştir [10]. Pasif radar sistemlerinin en büyük avantajlarından birisi de kendine ait bir vericisi olmaması sebebiyle tespit edilememesidir. Dolayısıyla bu sistemler savunma ve güvenlik uygulamalarında da sıklıkla tercih edilmektedir [11]. Vericiye bağımlı olarak çalışması sebebiyle güvenlik uygulamalarında oluşabilecek performans ve devamlılık kaygılarından dolayı ana radar sistemlerine ek olarak da tercih edilen pasif radarlar aynı zamanda yüzen hedeflerin tespitinde de kullanılabilirler. Capria vd. tarafından OFDM tabanlı geniş bant sinyalleri kullanarak yapılan kavram kanıtı çalışmasında kıyıda yaklaşık 2 km uzakta bulunan yük gemilerini tespit edilmiştir [12]. Ayrıca, pasif radarla belirlenen hedeflerin radar kesit izlerinden yararlanılarak sınıflandırılmasına yönelik bir çalışmada uçan hedeflerin belirlenmesi sağlanmıştır [13].

Bu çalışmada YTR teknolojileri kullanılarak çoklu frekans destekli PİRE (Pasif İnterferometrik Radar Enstrümanı) pasif radar sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde analog ön uç kullanımı minimum seviyede tutularak sistemin FM radyo, GSM, Wi-Fi veya TV gibi verici tipleriyle sadece küçük RF ön uç değişikliklerle çalışabilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen kontrol yazılımı ile çalışma frekansı, örnekleme hızı, entegrasyon zamanı gibi belirlenen yapılandırma özelliklerine göre otomatik olarak menzil-Doppler frekansı yüzeylerinin oluşturulması ve sistemin yakın gerçek zamanlı biçimde çalışması sağlanmıştır. PİRE sisteminin performans testleri gerçekleştirilmiş ve FM radyo vericileri ile hava hedefleri tespit edilerek sistemin doğrulaması yapılmıştır. Ayrıca geliştirilen sisteme ait yazılımın kaynak kodları paylaşılarak yapılan testlerin tekrarlanabilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmanın 2. bölümünde donanım ve yazılım alt başlıkları altında geliştirilen sistemin yapısı anlatılmıştır. 3. bölümde ise gerçekleştirilen veriler ile belirlenen bir vericiye ait sinyaller kullanılarak hava hedeflerinin tespitine yer verilmiştir. Son olarak 4. bölümde ise geliştirilen sistemin testlerinden elde edilen sonuçlar aktarılmıştır.

## 2. SİSTEM YAPISI (SYSTEM STRUCTURE)

Geliştirilen pasif radar sisteminin farklı frekans bantlarında yayın yapan vericilerle ve hedef tipleriyle kolaylıkla

çalışabilmesi için esnek olması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda geliştirilen sistemin donanım ve yazılım kısımları bu bölümde iki başlık altında incelenmiştir.

### 2.1. Donanım (Hardware)

PİRE sistemi, referans ve keşif anteni birbirinden farklı noktalara konumlandırılabilir özellikte ve birden fazla keşif anteni ile çok kanallı interferometri çalışmalarına uygun olarak YTR teknolojileri ile tasarlanmıştır. YTR, antenden alınan verilerin tüm filtreleme ve sinyal işleme işlemlerinin yazılım ortamında yapılmasına verilen isimdir. Böylece yazılım tabanlı olarak frekans ve örnekleme hızı değiştirilebilmekte, donanım değişikliği yapılmadan yazılım tabanlı olarak sinyal kodlama ve kod açma yapılabilmektedir. YTR sistemlerinde özellikle kullanılacak frekans seçici RF ön uç elemanlarının mümkünse sistemden tamamen kaldırılması gerekmektedir. Günümüzün sınırlı sinyal işleme kapasitesi sebebiyle pratikte bu hedefe ulaşmak henüz mümkün değildir. Fakat RF ön uç eleman sayıları azaltılıp bir donanım ile sinyal örnekleme hızı düşürülerek bilgisayar ortamına aktarılması pratikteki YTR sistemlerinde uygulanmaktadır. PİRE sisteminde de uygulanan bu yöntem sonucu elde edilen donanım birimleri ve bileşenleri arasındaki bağlantılar Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekilden görülebileceği gibi PİRE sistemi anten, RF ön uç, YTR donanımı, küresel konumlama sistemi (GPS) disiplinli saat, bilgisayarlar ve sinyal işleme kümesi birimlerinden oluşmaktadır.

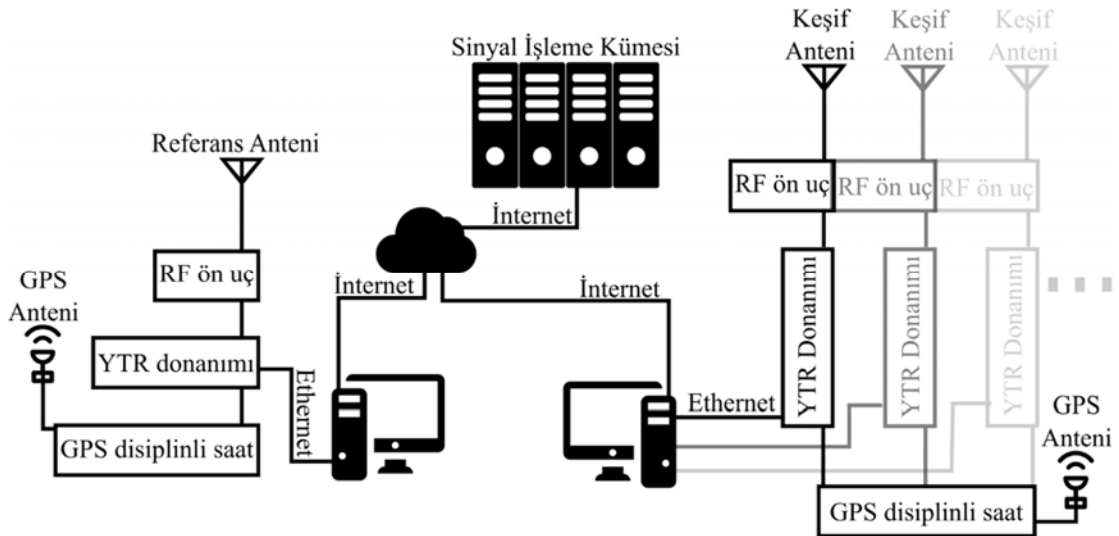
Geliştirilen sistemde referans anteni ve keşif antenleri sistem donanımının ilk elemanıdır ve belirlenen fırsat vericisinin çalışma frekansına uygun olarak seçilmelidir. Referans alıcısı ve her keşif alıcısı için farklı bir anten kullanılmaktadır. Antenler tarafından algılanan zayıf sinyallerin seviyelerinin yükseltilmesi ve gerekirse analog olarak filtrelenmesi için ise her antenden sonra bir RF ön uç biriminin kullanılması öngörülmüştür. Yükseltile

sinyallere, kullanılan vericinin bant genişliğine göre YTR donanımında örnek seyreltme işlemi uygulanmaktadır. PİRE sisteminde YTR donanımı olarak 100 MS/s analog/dijital çevirici ile ethernet portu üzerinden 20 MHz bant genişliği sağlayabilen USRP N210 kullanılmıştır [14]. Bu donanım üzerine eklenebilen kartlar ile 0-4400 MHz frekans aralığındaki herhangi bir vericiye ait sinyal 100 MHz hızında doğrudan örneklenip, FPGA üzerinde filtreleme ve örnek seyreltme ile örnekleme hızı düşürülerek ethernet portu üzerinden bilgisayara aktarılmaktadır. Birden fazla ve farklı noktalara konuşlandırılmış referans ve keşif alıcılarına ait farklı saat kullanan YTR donanımının frekans ve zaman senkronizasyonu ise GPS disiplinli saat birimi tarafından üretilen 10 MHz referans ve 1 PPS sinyalleri ile sağlanmaktadır. Böylece her YTR birimi örnekleme aynı anda başlamakta ve birimler arası faz kayması önlenmektedir. Senkronize olarak veriler YTR donanımı birimlerinden bilgisayara aktarılmakta ve geri kalan sinyal işleme aşamaları yazılım tabanlı olarak bilgisayarda gerçekleştirilmektedir.

### 2.2. Yazılım (Software)

PİRE sistemi için geliştirilen yazılım, YTR birimleri tarafından toplanan verilerin temizlenmesi, hdf5 formatında kaydedilmesi ve menzil-Doppler frekansı yüzeylerinin oluşturulması işlemlerini gerçekleştirmektedir. Bu işlemler sırasında gerekli sinyal işleme operasyonları ve menzil-Doppler frekansı yüzeyinin oluşturulması için Unix tabanlı işletim sisteminde GNU Radio yazılımı ve Python programlama dili kullanılmıştır [15, 16].

İlk olarak YTR donanımından yüksek hızda gelen verilerin, veri kaybı olmadan kaydedilmesi gereklidir. Bu amaçla devamlı gelen verilerin kaydedilmesi için bir ilk giren ilk çıkar (FIFO) oluşturulmuş ve buradan eşit sayıda veriler alınarak farklı dosyalara ikili sistemde kaydedilmiştir. Bu aşamada kaydedilen verilerin herhangi bir başlık bilgisi bulunmamaktadır. Yeni nesil radar sistemlerinde esnek,



Şekil 1. PİRE sisteminin donanım şeması (Hardware diagram of the PIRE system)

verimli giriş/çıkış ve yüksek hacimli karmaşık veri depolanması için hdf5 formatı kullanılmaktadır. PİRE sisteminde de verilerin başlık bilgisi eklenerek depolanmasında hdf5 formatı tercih edilmiştir. Veriler hdf5 formatında kaydedilmeden önce PİRE sisteminde kullanılan USRP N210 YTR donanımı içerisindeki voltaj kontrollü osilatörün rastgele faz açısıyla operasyona başlaması sebebiyle oluşan faz farkı düzeltilmektedir. Frekans senkronizasyonu sağlandığı için bu faz farkı veri toplama işlemi boyunca sabit kalmaktadır. Bu faz farkı düzeltilerek veriler istenilen süre boyutlarında hdf5 formatında kaydedildikten sonra Şekil 1'de gösterildiği gibi ethernet ağı üzerinden sayısal işleme kümesine gönderilmektedir.

Veriler ile menzil-Doppler frekansı yüzeylerinin oluşturulması ve hedef tespiti için kullanılan çapraz belirsizlik fonksiyonu Eş. 1'de verilmiştir.

$$|A(\tau, \theta)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{keşif}}(t) s_{\text{referans}}(t - \tau) e^{-j2\pi\theta t} dt \right|^2 \quad (1)$$

Verilen eşitlikte  $|A(\tau, \theta)|$ , çapraz belirsizlik fonksiyonunu,  $s_{\text{referans}}$  referans sinyalini,  $s_{\text{keşif}}$  keşif sinyalini,  $\tau$  ve  $\theta$  ise sırasıyla zaman gecikmesini ve Doppler frekansını ifade etmektedir. Çapraz belirsizlik fonksiyonu, keşif sinyalini referans sinyalinin  $\tau$  süresi kadar geciktirilmiş kopyaları ile karşılaştırarak, belirlenen Doppler frekans gecikmelerindeki örtüşmeleri test etmektedir. Denklem gerçekleştirilmesi için PİRE sisteminde keşif sinyali, referans sinyalinin geciktirilmiş kopyasının eşleniği ile çarpılarak bir tespit vektörü oluşturulmuştur. Tespit vektörüne Hızlı Fourier Dönüşümü uygulanarak her gecikme zamanı için menzil-Doppler frekansı yüzeyinde bir kolon elde edilmiştir. Elde edilen tespit sinyalleri birbirinden bağımsız olduğu için PİRE sisteminde işlemlerin paralel olarak gerçekleştirilmesi sağlanmış ve yakın gerçek zamanlı operasyon elde edilmiştir. Tablo 1'de değişen integrasyon zamanları için farklı işlemci sayıları ile elde edilen menzil-Doppler frekansı yüzeylerinin oluşturulma zamanları gösterilmiştir. Tabloya göre 1 çekirdekte 10 sn.'lik verinin işlenmesi için gereken süre yaklaşık 40.96 sn. olarak ölçülmüş, fakat bu işlem 8 çekirdekte paralel olarak yaklaşık 12.9491 sn.'de tamamlanmıştır. Daha yüksek integrasyon zamanlarında ise paralel işlemin getirdiği zaman kazancı göze çarpmaktadır. PİRE sisteminde paralel biçimde çok çekirdekli birden fazla bilgisayar kullanılarak yakın gerçek zamanlı operasyon sağlanmıştır. Kullanılacak bilgisayar ve çekirdek sayısı ise vericinin ve sinyalin özelliklerine göre farklılık göstermektedir.

Çapraz belirsizlik fonksiyonunda kullanılan keşif sinyali içerisinde bulunan, vericiden gelen doğrudan sinyaller, özellikle zayıf hedeflerin tespitini büyük ölçüde engellemektedir. Zayıf hedeflerin tespiti için keşif alıcısı tarafından toplanan verilerden doğrudan gelen sinyal ve parazitlerin temizlenerek dinamik çözünürlüğün artırılması büyük önem taşımaktadır. Literatürde doğrudan gelen sinyallerin ve parazit yankıların temizlenmesi için birçok yöntem mevcuttur [17, 18]. PİRE sisteminde referans alıcısına gelen doğrudan sinyallerin temizlenmesinde çok yüksek verimli olarak çalışabilmesinden dolayı en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır [19]. Bu yöntemde parazit ve doğrudan gelen sinyallerin sadece ilk K menzil hücrelerinden yansıdığı farz edilmiş ve buna göre bu alanda gücün mümkün olduğu kadar azaltılması amaçlanmıştır. İlk olarak örneklenmiş referans sinyalinin K menzil hücrelerine kadar sırayla birer hücre geciktirilmiş kopyalarıyla Eş. 2'de gösterildiği gibi bir  $S_{\text{ref}}$  matrisi oluşturulmuştur. Bu matrisin kolonlarını oluşturan referans sinyalinin uzunluğu örnekleme hızı ile integrasyon zamanının çarpımına eşittir.

$$S_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} s_{\text{ref}}(0) & 0 & \dots & 0 \\ s_{\text{ref}}(1) & s_{\text{ref}}(1) & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & s_{\text{ref}}(K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{\text{ref}}(n-1) & s_{\text{ref}}(n-1) & \dots & s_{\text{ref}}(n-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Daha sonra, oluşturulan  $S_{\text{ref}}$  matrisinin her kolonuna Eş. 3'te gösterildiği gibi belirli bir faz farkı,  $\theta$  eklenerek,  $D_{\theta}$  matrisi oluşturulmuştur. Bu eşitlikte  $t$  zaman vektörü 0 ile 1 arasında, uzunluğu örnekleme hızı ile integrasyon zamanının çarpımı kadar olacak şekilde tanımlanmıştır.

$$D_{\theta} = [S_{\text{ref}}[1]e^{-j2\pi\theta t} \dots \dots S_{\text{ref}}[K] e^{-j2\pi\theta t}] \quad (3)$$

$D_{\theta}$  matrisinin belirlenen aralıkta farklı faz değerleri için hesaplanıp birleştirilmesiyle  $X$  vektörü Eş. 4'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

$$X = [D_{-\theta} \dots D_{-1} D_0 D_1 \dots D_{\theta}] \quad (4)$$

Elde edilen  $X$  vektörü, en küçük kareler yöntemi ile Eş. 5'de gösterildiği gibi keşif vektörünün, doğrudan sinyal ve parazit yankıların oluşturduğu alt uzaya olan izdüşümünü bulmak için kullanılmıştır. Temizlenmiş keşif sinyali,  $S_{\text{temizlenmiş keşif sinyali}}$  ise keşif sinyalinden bu izdüşümün çıkarılmasıyla elde edilmiştir.

**Tablo 1.** PİRE sisteminde 100 kHz hızında örneklenmiş veriler ile menzil-Doppler frekansı yüzeyi üretme süreleri (Range-Doppler frequency surface generation times of the 100kHz sampled data at PIRE system)

İntegrasyon Zamanı	1 Çekirdek	4 Çekirdek	8 Çekirdek
1 sn	4,6696 sn	1,9602 sn	1,8815 sn
10 sn	40,9601 sn	14,9371 sn	12,9491 sn
30 sn	140,8391 sn	45,1192 sn	38,4450 sn
50 sn	232,7638 sn	76,0951 sn	65,2660 sn

$$S_{\text{stemizlenmiş keşif sinyali}} = [I_{n \times n} - X(X^H X)^{-1} X^H] S_{\text{keşif}} \quad (5)$$

Uygulanan bu filtrenin performansı kullanılan K menzil hücresi sayısına ve X vektörü oluşturulurken belirlenen faz değerlerinin sıklığına göre değişmektedir. PİRE sisteminin operasyonu için belirlenen integrasyon zamanına göre, keşif sinyali filtrelenerek çapraz belirsizlik fonksiyonunda referans sinyali ile birlikte çapraz belirsizlik fonksiyonunun elde edilmesinde kullanılmıştır. Son olarak elde edilen menzil-Doppler frekansı yüzeyleri operatör değerlendirmesi için kaydedilmektedir.

### 3. SİSTEM TESTLERİ (SYSTEM TESTS)

Geliştirilen PİRE sisteminin testleri için kıyıya paralel dağların ve derin vadilerin yoğun olduğu Doğu Karadeniz bölgesi seçilmiştir. Bir referans ve bir keşif anteni olmak üzere iki kanallı olarak test edilen sistem ile uçan cisimlerin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Sisteme ait referans ve keşif anteni Rize şehir merkezinde 41,037770° E, 40,494420° N noktasına yerleştirilmiştir. Trabzon, Hıdırnebi'de 40.969667° E, 39.43227897° N konumundan 97.0 MHz'de 4900 Watt nominal çıkış gücüyle yayın yapan bölgenin en güçlü FM vericisi ise "fırsat vericisi" olarak belirlenmiştir. Antenlerin konuşlandırıldığı nokta ile vericinin bulunduğu nokta Şekil 2'de harita üzerinde gösterilmiştir. Şekilde vericilerin bulunduğu nokta mavi, alıcıların bulunduğu nokta ise yeşil renk ile belirtilmiştir. Aralarındaki mesafe ise yaklaşık 89.6 km olarak ölçülmüştür.

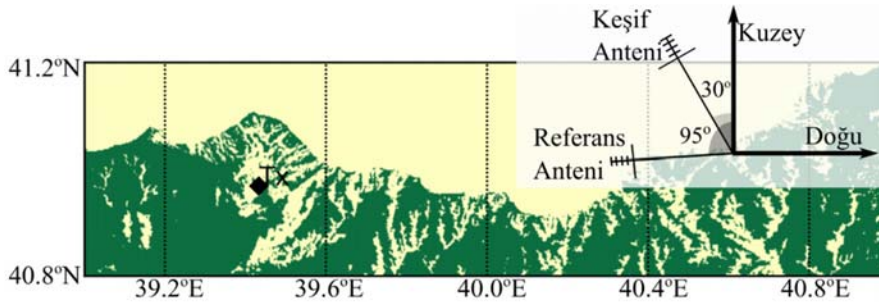
Referans alıcısının konuşlandırıldığı noktanın verici noktasına doğrudan görüşünün olması yüksek sinyal gürültü oranına sahip referans verilerinin elde edilebilmesi için

büyük önem taşımaktadır. Şekil 3'de vericinin bulunduğu noktaya göre elde edilen açık görüş hattı analizi verilmiş ve antenlerin yönleri gösterilmiştir. Verilen haritada yeşil renk doğrudan görüşün olduğu ve alıcının yerleştirilebileceği noktaları göstermektedir. Haritadan da görülebileceği gibi, vericinin bulunduğu noktanın bölgeye hakim bir noktada olması sebebiyle birçok noktadan doğrudan görüşe sahiptir. Bu sebeple vericiden çıkan sinyallerin 89.6 km uzakta bulunan referans alıcısına, yansıma ve çok yolluluk sebebiyle bozulmadan ulaşması beklenmektedir. Verici konumuna doğrudan görüşe sahip noktaya yerleştirilen referans alıcısı için 7 dBd kazançlı Yağı-Uda anten kullanılmış ve anten Kuzey ile 95 derece açı yapacak şekilde vericiye yönlendirilmiştir. Aynı noktaya konuşlandırılan keşif anteninin doğrudan sinyalleri almasını önlemek için ise spektrum analizörü yardımıyla keşif anteni anten ışına örüntüsü boşluğu verici yönünde ayarlanmıştır. Şekil 3'den de görülebileceği gibi, yönlü ve yaklaşık 7 dBd kazançlı Yağı-Uda keşif anteni Kuzey ile 30 derece yapacak şekilde konuşlandırılmıştır. Bu geometride doğrudan sinyal seviyesinde düşüş elde edilmiş fakat tam olarak doğrudan sinyal izolasyonu sağlanamamıştır. Bu sebeple en küçük kareler yöntemi kullanılarak sinyal işleme aşamasında yansıyan sinyallerin ve doğrudan sinyallerin referans sinyalinden ayrılması sağlanmıştır.

Referans anteni ve keşif anteni tarafından yakalanan sinyallerin filtrelenmesi ve güçlendirilmesi için Şekil 4'te gösterilen RF elemanları dizisi ön uç olarak kullanılmıştır. Sistem testleri sadece 97 MHz'de yapılsa da, YTR ile tüm FM radyo frekans bandını kapsayacak bir RF ön uç tasarlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak FM bandı dışında kalan

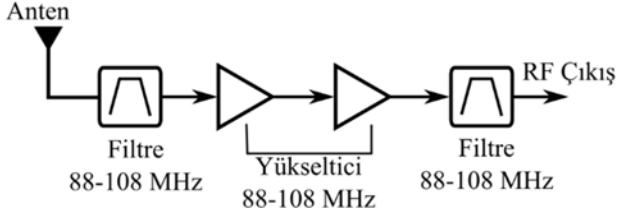


**Şekil 2.** Trabzon, Hıdırnebi yaylasında bulunan ve 97.0 MHz'de yayın yapan VHF FM radyo vericisi ve Rize'ye konuşlandırılan referans alıcısının harita üzerindeki gösterimi (VHF FM radio transmitter, which broadcasts on 97.0 MHz in Trabzon, Hıdırnebi plateau, and the reference receiver located in Rize are shown on the map.)



**Şekil 3.** Trabzon, Hıdırnebi yaylasında bulunan vericiye doğrudan görüşün bulunduğu Referans noktalarının harita üzerindeki gösterimi (Representation of the locations with direct-view to the transmitter at Trabzon, Hıdırnebi)

bölgenin analog olarak filtrelenmesi ve olası örtüşmenin önlenmesi için 88-108 MHz bant geçiren filtre kullanılmıştır. Daha sonra iki adet 20 dB kazançlı yükseltici ile 88-108 MHz frekans bandı 40 dB güçlendirilmiştir. Son olarak bir 88-108 bant geçiren filtre ile bant dışı sinyaller filtrelenmiştir.

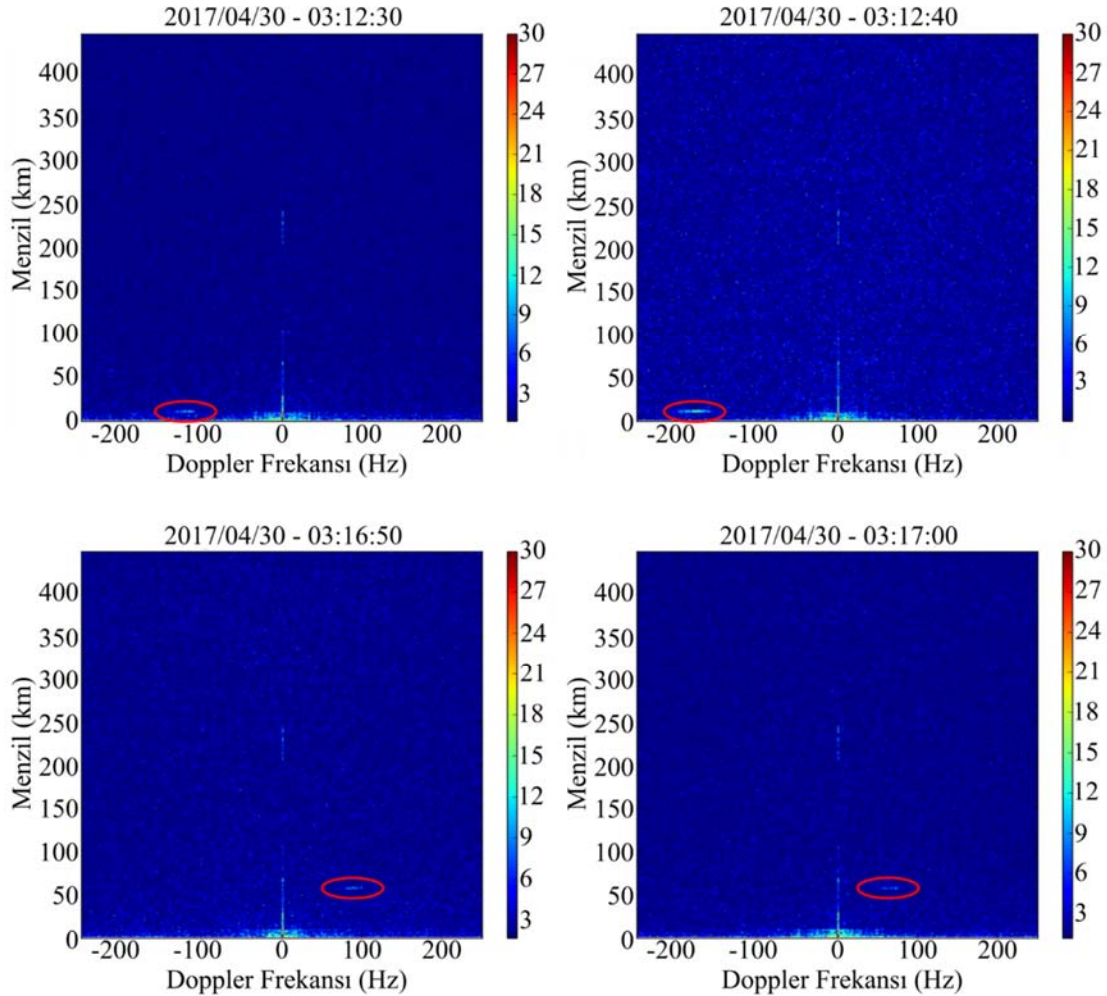


**Şekil 4.** PİRE test sisteminde kullanılan RF ön uç donanımı (RF front-end of the PIRE test system)

FM radyo standardında genellikle her kanal 200 kHz bant genişliğine sahiptir. Fakat güç yoğunluğu bu bant genişliğinin 100 kHz'lik kısmındadır ve geri kalan kısım çoğunlukla gürültü seviyesini artırmaktadır [20]. Bu sebeple, yapılan testlerde RF ön uç çıkışının bağlandığı YTR donanımında merkez frekans 97 MHz olarak seçildikten

sonra 100 MHz çıkışlı analog dijital dönüştürücünün örnek seyreltilerek 100 kHz hızına indirilmesi gerekmektedir. Kullanılan yazılım tabanlı radyo donanımı ile en alt sınır olan 200 kHz'de örneklenen 97 MHz sinyalleri daha sonra GNU Radio yazılımında bilgisayarda filtrelenip örnek seyreltilerek 100 kHz örnekleme hızında, faz hizalı olarak, 10 dakikalık dosyalar halinde hdf5 formatında kaydedilmiştir.

Oluşturulan hdf5 dosyalarında bulunan veriler yakın gerçek zamanlı olarak sayısal işleme kümesinde 10 sn integrasyon zamanı ile işlenerek menzil-Doppler yüzeyi elde edilmiştir. Şekil 5'te PİRE sistemi tarafından 10 saniye aralıklarla elde edilen dört menzil-Doppler frekansı yüzeyine ait grafik gösterilmiştir. Şekil 5a'da gösterilen grafikte 30 Nisan 2017 saat 03:12:30'da yaklaşık -100 Hz Doppler frekansında 20 km eğik mesafede tespit edilen bir uçak görülmektedir. Şekil 5b'de, aynı tarihte 10 saniye sonrasında yani saat 03:12:40'ı gösteren grafikte ise aynı uçağın yansımasıyla oluşturulan iz yaklaşık -200 Hz'de görülebilmektedir. Şekil 5c ve 5d'de ise yine aynı tarihte, bir önceki hedeften yaklaşık 5 dakika sonra tespit edilen farklı bir uçağın radar izleri görülmektedir. Şekil 5c'de saat 03:16:50'de yaklaşık 100 Hz Doppler



**Şekil 5.** 30 Nisan 2017'de toplanan verilerden elde edilen Menzil-Doppler frekansı yüzeyleri (Range-Doppler frequency surfaces obtained from the data of 30 April 2017)

frekansı ile 50 km eğik mesafede bulunan uçağın izi, Şekil5d'de görülebileceği gibi 10 saniye sonrasında yaklaşık 80 Hz'de tespit edilmiştir.

Şekil 5'te verilen dört farklı grafikte 0 Hz Doppler frekansında oluşan ve özellikle 250 km'de yoğunlaşan izin çevrede bulunan bir yükselti sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Bu yankı spesifik sinyal işleme metotları ile giderilebilir fakat referans ve keşif sinyalleri arasındaki korelasyonun bir göstergesi olarak grafiklerde korunmuştur. Ayrıca düşük menzilde bulunan ve çoğunlukla 0 Hz Doppler frekansı çevresinde yoğunlaşan yankıların ise denizden geldiği düşünülmektedir. Çünkü bu izlerdeki devamlı değişimin denizdeki dalgaların büyüklüğü ile orantılı olarak arttığı ve azaldığı belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada YTR teknolojileri kullanılarak geliştirilen, yakın gerçek zamanlı olarak çalışan, çok kanallı, esnek ve maliyet etkin bir pasif radar sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen PİRE pasif radar sisteminin yazılım ve donanım bileşenleri açıklanarak, performansı test edilmiş ve sistem ile uçan cisimler tespit edilmiştir. Ayrıca PİRE sisteminin yazılımı eğitim ve tekrarlama amaçlı olarak açık kaynak kodlu olacak şekilde paylaşılmıştır [21].

Sistemin testi 97.0 MHz'de Trabzon Hıdırnebi yaylasından yayın yapan bir VHF FM radyo vericisine ait sinyaller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde frekans spesifik analog RF elemanları yerine geniş bant RF elemanları kullanılarak YTR donanımı ile istenilen FM radyo frekansına ayarlanabilen operasyon kabiliyeti elde edilmiştir. Verici noktası için yapılan açık görüş hattı analizi neticesinde referans ve keşif alıcısı vericiden yaklaşık 89.6 km uzaklıktaki Rize'ye yerleştirilerek menzil-Doppler frekansı yüzeyinde hedef tespitine çalışılmıştır. PİRE sisteminin, kullanılan geniş bant analog RF elemanları, çok uzak referans vericisi ve aynı noktada bulunan keşif ve referans antenlerine rağmen uçan hedeflerin yakın gerçek zamanlı olarak başarıyla tespit edebildiği görülmüştür. İki farklı hedef için verilen örneklerde hedeflerin 20km ve 50km eğik menzil uzaklığında ve gürültü yüzeyinin yaklaşık olarak 12dB üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu hedeflerin yakın gerçek zamanlı tespiti için iki 24 çekirdekli bilgisayar kullanılmış ve sistemde yığılma olmadan veri akışı ve işlemesi gerçekleştirilmiştir. Pasif radar sistemlerinde menzil ve Doppler frekans çözünürlüğü, tespit edilen hedeflerin konumlandırmasının daha kesin yapılabilmesi için önemlidir. Bu sebeple PİRE sisteminin FM radyo sinyallerine kıyasla çok daha geniş bant genişliğine sahip Wi-Fi ve GSM vericilerine ait sinyaller kullanılarak test edilmesi ile belirlenen hedeflerin otomatik sınıflandırması ve takibi gerçekleştirilebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

PİRE sisteminin testleri için bölgede bulunan FM radyo vericilerinin özellikleri ve konumları konusunda

yardımlarından dolayı TRT çalışanı Hasan Altan'a teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lin J.C., Human exposure to RF, microwave, and millimeter-wave electromagnetic radiation [Health Effects], IEEE Microwave Magazine, 17 (6), 32-36, 2016.
2. Setoodeh P., Haykin S., Fundamentals of cognitive radio, John Wiley & Sons, New Jersey, 2017.
3. Griffiths H.D., Baker C.J., An introduction to passive radar, Artech house, Massachusetts, 2017.
4. Palmer J., Cristallini H., Kuschel H., Opportunities and current drivers for passive radar research, 2015 IEEE Radar Conference, 145-150, 2015.
5. Klemm R., Nickel C., Gierull P., Lombardo H., Griffiths H., Koch W., Novel radar techniques and applications: real aperture array radar, imaging radar and passive and multistatic radar, SciTech Publishing, United Kingdom, 2017.
6. Edrich M., Schroeder A., Meyer F., Design and performance evaluation of a mature FM/DAB/DVB-T multi-illuminator passive radar system, IET Radar, Sonar & Navigation, 8 (2), 114-136, 2014.
7. Meyer M.G., Sahr J.D., Passive coherent scatter radar interferometer implementation, observations, and analysis, Radio science, 39 (3), 1-10, 2004.
8. Sahr J.D., Lind F.D., The Manastash Ridge radar: A passive bistatic radar for upper atmospheric radio science, Radio Science, 32 (6), 2345-2358, 1997.
9. Tuysuz B., Urbina J., Lind F.D., Development of a passive VHF radar system using software-defined radio for equatorial plasma instability studies, Radio Science, 48 (4), 416-426, 2013.
10. Tuysuz B., Urbina J.V., Mathews J.D., Effects of the equatorial electrojet on FM-based passive radar systems, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55 (7), 4082-4088, 2017.
11. Olsen K.E., Asen W., Bridging the gap between civilian and military passive radar, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 32 (2), 4-12, 2017.
12. Capria A., Giusti E., Moscardini C., Conti M., Petri D., Martorella M., Berizzi, F., Multifunction imaging passive radar for harbour protection and navigation safety, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 32 (2), 30-38, 2017.
13. Ehrman L.M., Lanterman, A.D., A robust algorithm for automatic target recognition using passive, IEEE Southeastern Symposium on System Theory, Atlanta-USA, 102-106, 14-16 March, 2004.
14. Ettus Research. N200/N210. [http:// kb.ettus. com/ N200/ N210](http://kb.ettus.com/N200/N210). Yayın tarihi Haziran 20, 2018. Erişim tarihi Kasım 13, 2018.
15. Blossom E., GNU radio: tools for exploring the radio frequency spectrum, Linux journal, 2004 (122), 4, 2004.
16. Python Software Foundation. Python 2.7 documentation. <https://docs.python.org>. Yayın tarihi Kasım 13, 2018. Erişim tarihi Kasım 13, 2018.



17. Cardinali R., Colone F., Ferretti C., Pierfrancesco L., Comparison of clutter and multipath cancellation techniques for passive radar, 2007 IEEE Radar Conference, Boston-USA, 469-474, 17-20 April, 2007.
18. Ustundag M., Avci E., Gokbulut M., Ata F., Denoising of weak radar signals using wavelet packet transform and genetic algorithm, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (2), 375-383, 2014.
19. Levenberg, K., A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, Quarterly of applied mathematics, 2 (2), 164-168, 1944.
20. Griffiths H.D., Baker C.J., Ghaleb H., Ramakrishnan R., Willman E., Measurement and analysis of ambiguity functions of off-air signals for passive coherent location, Electronics Letters, 39 (13), 1005-1007, 2003.
21. Burak Tüysüz. PİRE kaynak kodları. <https://gitlab.com/labaspire/pire>. Yayın tarihi 13 Kasım, 2018. Erişim tarihi 13 Kasım, 2018.

