

OFDM İşaretlerinin Çevrimsel Otokorelasyon Fonksiyonu ile Ayırıştırılması

Identification of OFDM Signals using Cyclic Autocorrelation Function

Kürşat Tekbiyık¹, Hakan Alakoca¹, Halim Bahadır Tuğrel¹, Cem Ayyıldız², Güneş Karabulut Kurt¹

¹ Telsiz Haberleşme Araştırma Laboratuvarı (THAL)

İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
{tekbiyik, alakoca, tugrel, gkurt}@itu.edu.tr

² Turkcell Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı

Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş., İstanbul, Türkiye
cem.ayyildiz@gmail.com

Özet

Çeşitlenen ve gelişen telsiz haberleşme teknolojileri ile birlikte birçok problem de ortaya çıkmaktadır. Frekans bandının verimli kullanımı ve güvenlik konuları ortaya çıkan ana sorunlardır. Bu gibi sorunların üstesinden gelmek için ortaya konulan uygulamalar, işaret tipinin tespitine şiddetle ihtiyaç duyar. İstenmeyen işaretler tespit edildiğinde bu işaretler durdurulabilir veya veriler bu istenmeyen işaretlerden ayrılabilir. Bu bildiride farklı çevrimsel öntakılara sahip olan dik frekans bölmeli çoğulanmış (OFDM) işaretlerin çevrimsel otokorelasyon fonksiyonu (cyclic autocorrelation function, CAF) tabanlı yöntemle ayırıştırılması problemi ele alınmıştır. İşaretlerin bu yöntemle çevrimsel önek uzunluklarına göre birbirinden ayırt edilebileceği benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

Abstract

Diversifying and developing wireless communication technologies give rise to many problems. Two of the main problems are efficient usage of frequency spectrum and security. The techniques that are used to solve such problems strictly need detection of signal types. When unwanted symbols are detected, these signal sources can be stopped or their interfering components can be canceled from the information bearing signal. In this paper, the problem of identifying cyclic prefixed-orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals is considered by using a (cyclic autocorrelation function, CAF) based approach. Via simulation results, it is shown that with the proposed approach, the signals can be distinguished from each other according to their cyclic prefix lengths.

1. Giriş

Telsiz haberleşme sistemleri mühendislik dünyasının en hızlı gelişen alanlarından biridir. Haberleşme teknolojisindeki bu gelişmeler, kullanıcıların yoğun talep ve ilgi artışıını beraberinde getirmektedir. Telsiz haberleşme teknolojilerindeki artan talebi yeterli düzeyde karşılayabilmek için yüksek sistem kapasitelerine ihtiyaç duyulur. Sistem kapasitesi hizmet verilecek frekans bant aralığını genişleterek artırılabilir. Fakat frekans bant aralığını genişletmek bazı izinlere tabi olduğu ve

dünya genelindeki kurumların onayını gerektirdiği için pek kolay gerçekleştirilemez. Bu durumda kısıtlı olan elektromanyetik spektrumu verimli kullanmak için yöntemler geliştirmek önemli bir hal almaktadır. Ayrıca lisanssız spektrum işgalleri de verimi düşürmektedir. Hali hazırda kullanılan yöntemlerde spektrumu izinsiz işgal eden frekans kaynaklarının tespit edilmesi ve durdurulması amaçlanmaktadır. Spektrum verimliliği gibi konularda fiziksel katman güvenliğini sağlamak en ön sırada yer alır. Örneğin, işaret bozucu tarafından alıcı tarafına saldırı yapıldığında eğer işaret bozucunun iletimi tesbit edilebilir ve verilerden ayrılabilirse sistem güvenliği garanti altına alınır [1]. Ayrıca [2] ve [3]'te bahsi geçen konumlandırma yöntemleri, işaret kimliklendirmeye ciddi anlamda ihtiyaç duyar. Alınan işaretlerin tespit edilmesi ve kimliklendirilmesi bu gibi problemlerle başa çıkmada gerekli hal alır.

Bu bildiride işaret sınıflandırılması farklı bir yönden ele alınarak aynı tip işaretlerin (OFDM), alınan işarete çeşitli avantajlar kazandıran çevrimsel öntakıların uzunluk farklarına göre ayrılabilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan benzetim ortamında üretilen farklı uzunluklarda çevrimsel öntakılara sahip OFDM işaretleri kullanılarak çevrimsel otokorelasyon fonksiyonu (cyclic autocorrelation function, CAF) tabanlı yöntem aynı ortamda test edilmiştir. Yapmış olduğumuz bu çalışma aynı tür işaretlerin farklı karakteristik özelliklerinin saptanmasında ve ayırıştırılmasında; farklı tür işaretlerin belirlenmesinde ve saptanmasında temel teşkil etmektedir.

2. İlgili Çalışmalar

25 yılı aşkın süre önce Gardner tarafından hazırlanan [4], dönemli-durağan işaret analizinde lokomotif görevini üstlenmiştir. Bu çalışmadan faydalanılarak [5–7] gibi birçok uygulama geliştirilmiştir. Ayrıca [8, 9] çalışmalarında dönemli-durağan özellikler ve sınıflandırıcılar kullanılarak alıcılarda işaretin modülasyon tipi tespit edilmiştir. [10, 11] çalışmalarında ise dönemli-durağan teknikleri USRP üzerinde gerçekleştirilmiş ve bilişsel radyolar için sonuçları değerlendirilmiştir. Esasen CAF'ın Fourier dönüşümü olan spektral korelasyon fonksiyonu ve USRP platformu [12]'de RF işaretlerinin ayrılması için kullanılmıştır. Tespit edilen işaret tipine ait tahmini taşıyıcı frekansı ve sembol oranı sonuçlara eklenmiştir.

İşaret kimliklendirilmesinde birden fazla yöntem olmasına karşın CAF tabanlı teknikler önerilir. Örnek olarak düşük desibel seviyelerinde (-10 desibelin altında) CAF tabanlı tespit tekniği, enerji algılayıcı (energy detection, ED) tabanlı yön-

Bu çalışma Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş. tarafından desteklenmektedir (Proje No: BSTB032384).

temlere kıyasla daha iyi sonuç vermektedir. ED 16000 örneğe ihtiyaç duyarken CAF yalnızca 256 örneğe gereksinim duyar [13]. Literatürde konu hakkında [14–16] gibi yayınlar bulunmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla [13, 15, 17] dışında deneysel verilere bağlı kalınarak sonuçları verilen çalışma bulunmamaktadır. Çoğu çalışma önerilen yöntemlerin performansını sadece benzetim sonuçları üzerinden göstermektedir. Bu çalışmada da CAF kullanılarak OFDM işaretlerinin öntakı uzunluklarına göre ayırt edilebileceğinin gösterilmesi hedeflenmiştir.

3. Sistem Modeli

3.1. OFDM İşaret Modeli

Tipik OFDM sistemlerinde veriler her bir alttaşıyıcı üzerinden girişime izin vermeden iletilirler. Böyle bir sistemi ortaya koyabilmek için öncelikle işaretler frekans bölgesinde elde edilir. Daha sonra ters Fourier dönüşümü ile sembollerin zaman bölgesindeki gösterimleri elde edilir. Bu gösterime çevrimsel öntakı (cyclic prefix) eklenerek frekans seçici kanal üzerinden iletilir. Alıcı tarafında çevrimsel öntakı, veri sembollerinden ayrıldıktan sonra geriye kalan işaretlerin Fourier dönüşümü alınarak semboller elde edilir. OFDM sembollerine ait olan verici ve alıcı şemaları Şekil 1’de verilmiştir.

Alıcıda çevrimsel öntakıları veri sembollerinden ayırmadan, bunlar CAF tabanlı algoritmaya tabi tutulur ve bu sayede öntakı uzunluk bilgisi ile işaretler ayırt edilebilir. Genel olarak öntakı uzunluklarının seçimi önemlidir. Alttaşıyıcılar arası girişimin önlenmesi için, çevrimsel öntakı uzunluğu telsiz kanalının en büyük gecikme değerinden büyük olacak şekilde seçilmelidir [18]. Belirtilen şartı sağlayarak belirlenen öntakı uzunluğu, alttaşıyıcıların gecikmeli tekrarlarının gözetim aralığında faz geçişi göstermesine sebep olur. Ayrıca, alıcıda gözetim aralığı çıkarıldıktan sonra Fourier dönüşümü uygulandığı için alttaşıyıcılar ve gecikmeli versiyonları arasındaki diklik korunur [18].

i. OFDM sembol aralığı için N kodlanmamış veri elemanı $s[k]$ olarak gösterilebilir. Burada $k = (i - 1)N, (i - 1)N + 1, \dots, (i - 1)N + N - 1$ ’dir. $s[k]$ OFDM sembolü olarak N uzunluklu gruplara, $s[i]$, ayrılır. Alttaşıyıcı modülasyonu ise ters Fourier dönüşümü ile sağlanır ve zamandaki işaret

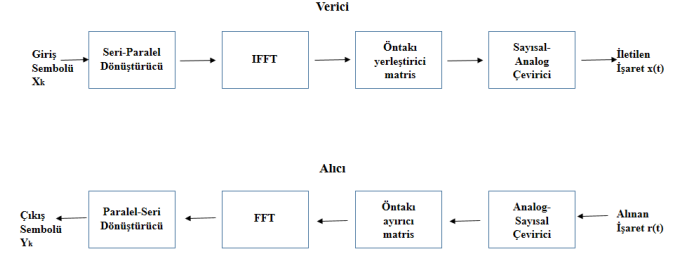
$$u[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=(i-1)N}^{(i-1)N+N-1} s[k] e^{j2\pi nk/N}, \quad (1)$$

olarak elde edilir. Bunu takiben vericiden işaretlerin iletilmesinden önce, işaretin sonundaki P adet örnek OFDM işaretinin başına, çevrimsel öntakı olarak kopyalanır. Ters Fourier dönüşümünden sonra öntakı eklenerek $u[i] = [u[(i - 1)P], u[(i - 1)P + 1], \dots, u[(i - 1)P + P - 1]]^T$ elde edilir, burada P blok uzunluğudur. Öntakı yerleştirilmiş örnek bir OFDM sembolü Şekil 2’deki gibidir.

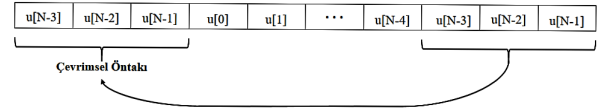
3.2. Çevrimsel Otokorelasyon Fonksiyonu

OFDM işaretlerine yapay olarak yerleştirilen gizli desenler, işaretlerin kimliklendirilmesinde kullanılabilir. Bu desenler periyodiklik ile karıştırılmaması adına *çevrimsel* terimi ile adlandırılır. Çevrimsel öntakılar semboller arası girişimin oluşmaması ve alttaşıyıcıların diklerinin korunması için kullanılır. İşaretleri birbirinden ayırmak amacıyla çevrimsel otokorelasyon fonksiyonundan yararlanılabilir.

$x(t)$ alınan sürekli işareti temsil etmek üzere, sıfır ortalı malı dönemli-durağan işaret için zaman bağımlı otokorelasyon



Şekil 1. OFDM işaretine ait verici ve alıcı şemaları



Şekil 2. Çevrimsel öntakı içeren OFDM işareti

fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$R_{xx}(t, t + \tau) = E\{x(t)x^*(t + \tau)\}. \quad (2)$$

$R_{xx}(t, t + \tau)$ zaman bölgesinde periyodik olduğundan Fourier serisi yardımıyla aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$R_{xx}(t, t + \tau) = \sum_{\alpha} R_{xx}^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha\tau}. \quad (3)$$

Burada $R_{xx}(t, t + \tau)$ α ’nın tam katları için hesaplanır. Gecikme parametresine, τ , bağlı (3)’ün Fourier katsayıları aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$R_{xx}^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_{xx}(t, t + \tau) e^{-j2\pi\alpha\tau} dt. \quad (4)$$

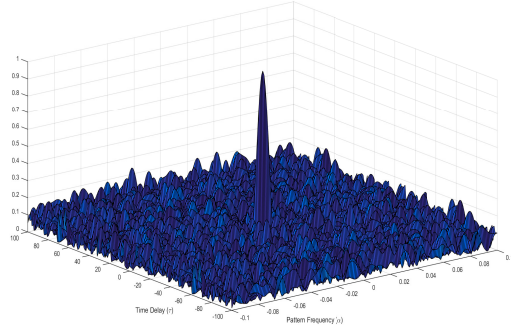
Denklem $R_{xx}^{\alpha}(\tau)$ CAF olarak adlandırılır [19].

Ayrık zamanlı işaretlerle ilgilenirken aşağıda verilecek olan denklem çevrimsel öntakıları tespit etmek için daha uygundur. Ayrıca, alınan OFDM işareti ayrı ayrı işleneceğinden çalışma kapsamında [2]’de verilen fonksiyon kullanılmıştır:

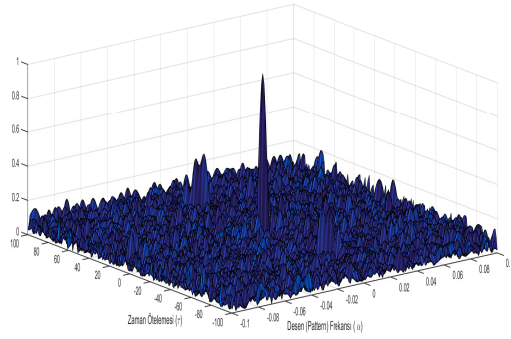
$$R_u^{\alpha}(\tau) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} u[i]u^*[i - \tau] e^{-j2\pi\alpha\tau}. \quad (5)$$

Burada $u[i]$ alınan ayrık işareti temsil eder. Tekrarlı yapılara sahip olan işaret için gecikme τ gizli desenlerinin tekrar periyoduna eşit olduğunda CAF tepe değerine ulaşır. Bu tepe değerler n içerisinde periyodik aralıklarla gözlemlenir. $e^{-j2\pi\alpha\tau}$ üstel terimi, desen frekansı olarak bilinen ve çevrimsel öntakıların tekrar ettiği α değerini hesaplamaya yardımcı olur [4]. Buradan yola çıkarak desen frekansı ve gecikme değeri işaret kimliği hakkında bilgi verir. Kimliklendirme amacıyla CAF’ın Fourier dönüşümü olan spektral korelasyon fonksiyonu’ndan (spectral correlation function, SCF) da yararlanılabilir [4]:

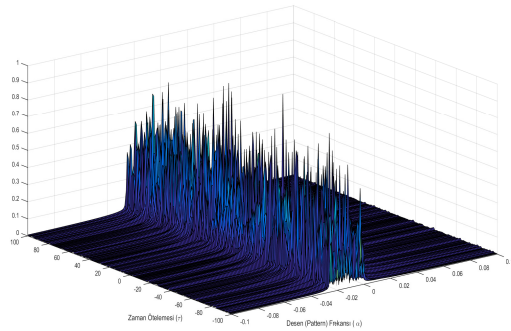
$$S_u^{\alpha}[f] = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_u^{\alpha}[\tau] e^{-j2\pi f\tau}. \quad (6)$$



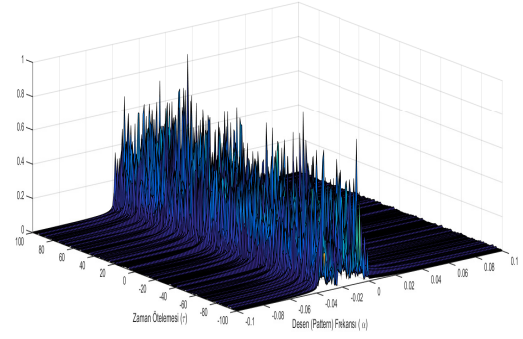
Şekil 3. 128 alttaşıyıcıya ve 4 uzunluklu çevrimsel öntakıya sahip olan OFDM işareti için normalize edilmiş CAF değerleri



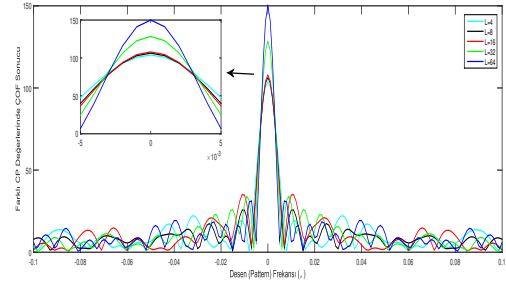
Şekil 4. 128 alttaşıyıcıya ve 64 uzunluklu çevrimsel öntakıya sahip olan OFDM işareti için normalize edilmiş CAF değerleri



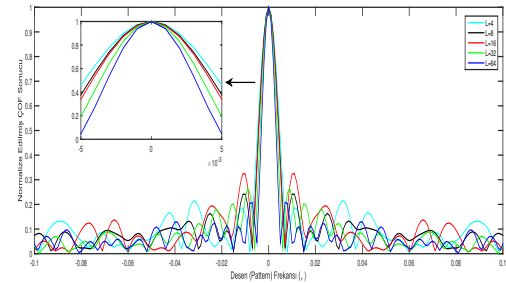
Şekil 5. 128 alttaşıyıcıya ve 4 uzunluklu çevrimsel öntakıya sahip olan OFDM işareti için normalize edilmiş SCF değerleri



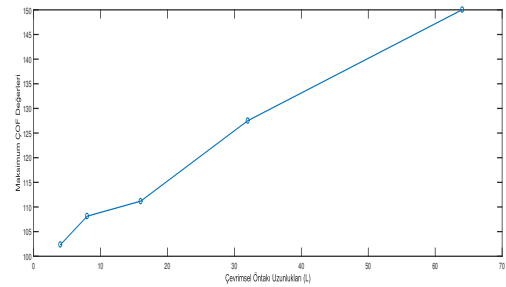
Şekil 6. 128 alttaşıyıcıya ve 64 uzunluklu çevrimsel öntakıya sahip olan OFDM işareti için normalize edilmiş SCF değerleri



Şekil 7. 128 alttaşıyıcılı OFDM işareti için $\tau = 0$ ve farklı çevrimsel öntakı uzunluklarında CAF değerleri



Şekil 8. 128 alttaşıyıcılı OFDM işareti için $\tau = 0$ ve farklı çevrimsel öntakı uzunluklarında normalize edilmiş CAF değerleri



Şekil 9. Değişen çevrimsel öntakı uzunluklarına göre çevrimsel otokorelasyon fonksiyonun aldığı tepe değerler

4. Benzetim Çalışmaları

Çevrimsel öntakıya sahip olan OFDM işaretleri CAF tabanlı algoritmada giriş olarak kullanılmış ve sonrasında farklı öntakı uzunluklarına göre farklı sonuçlar alınmıştır. Buradan hareketle OFDM işaretleri aynı protokolü kullanmasına rağmen öntakı uzunluklarına göre ayrılabilceği tespit edilmiştir. CAF sonuçları zaman bölgesindeki ötelemeye (τ) ve desen frekansına (α) bağlı olarak elde edilmiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4'de sırasıyla 4 ve 64 uzunluklu çevrimsel öntakıya sahip işaretlerin normalize edilmiş CAF grafikleri verilmiştir. Bu grafikler yardımıyla OFDM işaretlerinin içerdiği çevrimsel öntakı uzunluk farklılıklarının neden olduğu değişimler fonksiyon çıktısı üzerinden incelenebilmektedir. Özellikle $\tau = 0$ öteleme anında oluşan değerler, işaretler arasındaki farkı gözlemlemek için daha net görüntü sunar.

Haberleşme uygulamalarında çoğu kez zaman bölgesi yerine frekans bölgesinde işlem yapmak sağladığı avantajlar nedeniyle tercih edilir. Bu sebeple CAF'ın Fourier dönüşümü olan SCF sonuçları da Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'e paralel olarak frekans bölgesindeki bilgileri içeren Şekil 5 ve Şekil 6'da farklılıkları ortaya koymaktadır. Yine bu şekiller yardımıyla OFDM işaretlerinin çevrimsel öntakı uzunlukları hakkında yorum yapılabilir ve işaretler birbirinden ayrılabilir.

Bahsi geçtiği üzere $\tau = 0$ öteleme anında elde edilen veriler işaret karakteristiğini belirlemede daha net bilgiler vermektedir. Bu farklılıkları daha açık görebilmek için öteleme değeri $\tau = 0$ iken elde edilen CAF sonucu ve normalize edilmiş grafiği sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde çevrimsel öntakı uzunluğundaki artışın maksimum CAF değerinde yükselişe ve ana-lobun bant genişliğinde değişimlere sebep olduğu görülmektedir. Alınan en büyük CAF değerinden faydalınarak işaretlerin tespit edilmesi böylece mümkün olmaktadır.

Normalize edilmiş CAF grafiğinde çevrimsel öntakı uzunluğundaki artışın ana lobun bant genişliğinde azalmaya sebebiyet verdiği gösterilmektedir. Bu şekil üzerinden elde edilecek ana-lob bant genişliği ve 3 dB bant genişliği yardımıyla işaretler öntakı uzunluklarına göre sınıflandırılabilir.

Şekil 7'de gösterilen tepe değerlerini açıkça ortaya koyabilmek için Şekil 9'da farklı çevrimsel öntakı uzunluklarında elde edilen maksimum CAF değerleri verilmiştir. Alınan en büyük değerler incelenerek işaretin çevrimsel öntakı uzunlukları hakkında yorum yapılabilir ve işaretler birbirinden ayırdelebilir.

5. Sonuçlar

Bu bildiride CAF tabanlı yöntem kullanılarak farklı çevrimsel öntakı uzunluklarına sahip olan OFDM işaretlerinin birbirinden ayrılabilineceği benzetim sonuçları yardımıyla gösterilmiştir. Çevrimsel öntakı uzunluklarının işaretlere kazandırdığı karakter ortaya çıkarılmıştır. İşaretler, önemli-durağan özelliklerinden faydalınarak birbirlerinden ayrılabilceği gibi kendi içinde de sınıflandırılabilir.

Bu çalışmanın bir sonraki adımında değişen SNR değerlerinin ve alıcı kısmında bulunan filtredeki değişimlerin oluşturduğu farklılığı gözlemlemek için CAF tabanlı yöntem kullanılabilir. İşaretlerin sahip olduğu alttaşıyıcı sayıları temel alınarak yine aynı yöntem kullanılarak işaretler ayrıştırılabilir. Ayrıca OFDM işaretlerinde olduğu gibi yapısında çevrimsel öntakıları bulunduran farklı protokoller için benzer çalışma yapılabilir.

6. Kaynaklar

- [1] M. Mughal, T. Nawaz, L. Marcenaro, and C. Regazzoni, "Cyclostationary-based Jammer Detection Algorithm for Wide-band Radios using Compressed Sensing," in *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, 2015, pp. 280–284.
- [2] S. S. Hong and S. R. Katti, "DOF: A Local Wireless Information Plane," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 41, no. 4, pp. 230–241, Aug. 2011. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2043164.2018463>
- [3] K. Joshi, S. Hong, and S. Katti, "Pinpoint: Localizing Interfering Radios," in *10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI)*, 2013, pp. 241–253.
- [4] W. A. Gardner, "Exploitation of Spectral Redundancy in Cyclostationary Signals," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 2, pp. 14–36, 1991.
- [5] S. Haykin, D. J. Thomson, and J. H. Reed, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 849–877, 2009.
- [6] A. Swami and B. M. Sadler, "Hierarchical Digital Modulation Classification using Cumulants," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 3, pp. 416–429, 2000.
- [7] E. Like, V. Chakravarthy, P. Ratazzi, and Z. Wu, "Signal Classification in Fading Channels using Cyclic Spectral Analysis," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, no. 1, p. 1, 2009.
- [8] A. Fehske, J. Gaedert, and J. H. Reed, "A New Approach to Signal Classification using Spectral Correlation and Neural Networks," in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2005, pp. 144–150.
- [9] M. Davy, A. Gretton, A. Doucet, P. J. Rayner *et al.*, "Optimized Support Vector Machines for Nonstationary Signal Classification," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 442–445, 2002.
- [10] P. Sutton, K. Nolan, and L. Doyle, "Cyclostationary Signatures for Rendezvous in OFDM-based Dynamic Spectrum Access Networks," in *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2007, pp. 220–231.
- [11] L. Bixio, G. Oliveri, M. Ottonello, and C. S. Regazzoni, "OFDM Recognition Based on Cyclostationary Analysis in An Open Spectrum Scenario," in *69th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, 2009, pp. 1–5.
- [12] R. Zhou, X. Li, T. Yang, Z. Liu, and Z. Wu, "Real-time Cyclostationary Analysis for Cognitive Radio via Software Defined Radio," in *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, 2012, pp. 1495–1500.
- [13] B. Aziz and A. Nafkha, "Implementation of Blind Cyclostationary Feature Detector for Cognitive Radios using USRP," in *21st International Conference on Telecommunications (ICT)*, May 2014, pp. 42–46.
- [14] G. Huang and J. K. Tugnait, "On Cyclostationarity Based Spectrum Sensing under Uncertain Gaussian Noise," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 8, pp. 2042–2054, April 2013.

- [15] S. Nariieda and T. Hada, "Experimental Analyses of Spectrum Sensing using Cyclic Autocorrelation Function Diversity Combining Techniques in Cognitive Radio," in *IEEE International Conference Communication Systems (ICCS)*, Nov 2014, pp. 374–378.
- [16] K. Kosmowski, M. Suchański, J. Pawelec, and M. Kustra, "A Novel Ofdm Sensing Method Based on CAF-max for Hybrid Detectors Architecture," in *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, May 2016, pp. 1–4.
- [17] H. Zhang, D. L. Ruyet, and M. Terre, "Signal Detection for ofdm/oqam System using Cyclostationary Signatures," in *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Sept 2008, pp. 1–5.
- [18] A. Narasimhamurthy, M. Banavar, and C. Tepedelenliouglu, *OFDM Systems for Wireless Communications*. Morgan&Claypool, 2010.
- [19] M. Oner and F. Jondral, "Cyclostationarity Based Air Interface Recognition for Software Radio Systems," in *Radio and Wireless Conference, IEEE*, Sept 2004, pp. 263–266.