Varyasyonel Kip Ayırıştırıcı ile Radar Parmak İzi Çıkarımı

Radar Fingerprint Extraction via Variational Mode Decomposition

Gokhan Gok^{*†}, Yasar Kemal Alp^{*}, Fatih Altıparmak^{*}

^{*}Radar Elektronik Harp ve İstihbarat Sistemleri, ASELSAN A.Ş., Ankara, Türkiye

[†]Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Özetçe —Bu çalışmada, radar işaretleri üzerinde bulunan istemsiz modülasyonlar kullanılarak radar parmak izinin oluşturulması için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem radar işareti üzerindeki istemsiz modülasyonları Varyasyonel Kip Ayırıştırıcı (VKA) ile bileşenlerine ayırarak bu bileşenleri karakterize eden öznelikler hesaplamaktadır. Gerçek radarlara ait olan veriler kullanılarak yapılan analizler sonucunda önerilen yöntemin veri setindeki radarları yüksek başarımla ayırıştırabildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler—radar parmak izi, istemsiz modülasyon,

Abstract—In this paper, a novel method for extracting radar fingerprint using the unintentional modulation on radar signals is proposed. Proposed technique decomposes the unintentional modulations into its components using Variational Mode Decomposition (VMD) technique. Then, features that characterize each component are calculated. Simulations using real radar data show that proposed technique can classify radars in the dataset with high performance.

Keywords—radar fingerprint, specific emitter identification (SEI), unintentional modulation on pulse (UMOP)

I. GİRİŞ

Radar parmak izi çıkarımı, aynı tip radarların işaretleri üzerinde bulunan istemsiz modülasyonlar kullanılarak yapılan radar kimliklendirme işinin önemli bir parçasıdır [1]. Radarlar sinyallerini, üzerindeki istemsiz modülasyonlara göre sınıflandıran sistemler temel olarak radar sinyallerini hassas olarak ölçmekte ve sinyal üzerindeki istemsiz modülasyonları tanımlayan öznelikleri radar parmak izi oluşturmak amacıyla hesaplamaktadır. Elde edilen radar parmak izi, ilgili radarın kimliklendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Böylece aynı tip radarların birbirinden ayrışımı sağlanabilmektedir. Klasik Elektronik Harp (EH) sistemleri, darbe genişliği ve darbe tekrarlama aralığı gibi geleneksel radar parametrelerinin hesaplanması ile yapılan kimliklendirme işlevi yoğunlaşan elektromanyetik spektrum, gelişen radar teknolojileri vb. nedenlerden dolayı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle modern EH sistemlerinde, istemsiz modülasyonlar kullanılarak parmak izi çıkarma ve bu parmak izleri ile radarların kimliklendirilmesi önem kazanmıştır. Ayrıca radar parmak izi, radarın üretimi

sırasında oluşan donanımsal farklılıklardan kaynaklanan modülasyonları da içerdiği için aynı tip radarların farklı üretimlerinin de kimliklendirilmesine imkan tanımaktadır.

Literatürde radar parmak izi oluşturmak amacıyla farklı yöntemler bulunmaktadır. Örneğin, [2] ve [3]'de sinyalin spektrumu üzerinden öznelikler hesaplanmaktadır. [4]'de güç yükselteçlerinin oluşturduğu doğrusal olmayan bozulmalar analiz edilmektedir. Ayrıca [5]'de ölçülen sinyalin yüksek dereceli istatistikleri hesaplanarak öznelikler oluşturulmuş ve K-En Yakın Komşu tekniği ile radar sinyalleri sınıflandırılmıştır. Bahsedilen literatürdeki kaynaklar genel olarak teorik yaklaşımlar sağlarken, kullanılan verinin gizliliği sebebiyle saha ortamında elde edilen deneysel sonuçlara ulaşmak genel olarak mümkün olmamaktadır.

Bu çalışmada, radar parmak izini oluşturan özneliklerin hesaplanması için [6]'da verilen Varyasyonel Kip Ayırıştırıcı (VKA) tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem radar darbesinin genlik zarfı üzerindeki istemsiz modülasyonu VKA ile farklı frekanslardaki kiplerine ayırmakta ve bulunan bu kipleri karakterize eden öznelikler hesaplamaktadır. Önerilen yöntemin başarımla saha ortamında alınan gerçek radar kayıtları ile gösterilmiştir.

Bu bildirinin organizasyonu şu şekilde olacaktır. Bölüm II'de gerçek veriler üzerinde gözlenen istemsiz modülasyonlar ile ilgili zaman frekans analizleri verilecektir. Bölüm III'de [6]'da önerilen ve istemsiz modülasyon sinyallerini bileşenlerine ayırmak için kullanılacak olan varyasyonel kip ayırıştırma algoritması ile radar parmak izini oluşturacak öznelikler anlatılacaktır. Bölüm IV'de saha ortamında alınan gerçek veriler üzerinden önerilen yöntemin başarımla gösterilecektir. Son olarak Bölüm V'de değerlendirmeler verilecektir.

II. İSTEMSİZ MODÜLASYONA SAHİP DARBELERİN ZAMAN FREKANS ANALİZİ

Radar işaretleri üzerindeki istemsiz modülasyonların daha iyi anlaşılması için aynı radarın iki farklı üretiminden alınan radar darbelerinin genlik zarfı Şekil 1'de gösterilmektedir. Her iki darbenin üzerinde, darbe çıkış anından itibaren istemsiz genlik modülasyonları gözlenmektedir. Bu modülasyonların daha iyi gözlenebilmesi için yine aynı şekil üzerinde kırmızı ile gösterilen ideal kare dalga her iki sinyalden çıkarılmış ve Şekil 1'de siyah dikey çizgiler ile belirtilen zaman aralığı

Şekil 1: Mavi: Radar-1 genlik zarfı; Yeşil: Radar-2 genlik zarfı; Kırmızı: Aynı darbe genişliğine sahip ideal kare dalga; Siyah: İstemsiz modülasyonların gözlemlendiği zaman aralığı.

Şekil 2: Radar-1 genlik zarfından ideal kare dalga çıkarımı sonrası kalan sinyal (üstte) ve kalan sinyalin KZFD'si (altta). analiz edilmiştir. Kalan zaman sinyalleri ve bu sinyallerin KZFD'leri (Kısa Zaman Fourier Dönüşümleri) Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir. KZFD hesaplanırken standart sapması 5 örnek olan Gauss pencere kullanılmış, ardışık pencere verileri 1 örnek kaydırılarak alınmıştır. Bu iki darbenin zamandaki görünümleri oldukça benzer olmasına rağmen KZFD'lerinde zaman-frekans merkezleri ve bant genişlikleri farklı, zaman frekans destek bölgeleri tıkkız olan sinyal bileşenlerinin olduğu gözlenmektedir. Bu gözleme dayanarak, tüm sinyal içerisindeki bileşenlerin ayrı ayrı çıkarılması ve çıkarılan bu bileşenler üzerinden bazı öznitelikler hesaplayarak radar parmak izinin oluşturulabileceği düşünülmüştür.

III. ÖNERİLEN YÖNTEM

Bu bölümde, bir işaret içerisindeki sinyal bileşenlerini herhangi bir ön bilgiye ihtiyaç duymadan gürbüz bir şekilde hesaplayabilen VKA yöntemi ve bulunan sinyal bileşenleri üzerinden hesaplanan öznitelikler anlatılacaktır.

A. Varyasyonel Kip Ayırıcı

VKA yönteminin amacı gerçek değerli bir girdi sinyali $f(t)$ 'i belirli sayıda ve her biri frekans alanında dar bant

Şekil 3: Radar-2 genlik zarfından ideal kare dalga çıkarımı sonrası kalan sinyal (üstte) ve kalan sinyalin KZFD'si (altta).

genişliğine sahip alt sinyallere (kiplere) ayırmaktır. Bunun için sırasıyla tüm kipler için Hilbert dönüşü kullanılarak frekansta sadece pozitif frekanslarda bileşeni olan analitik sinyal hesaplanmakta, her kip ilgili merkez frekansı kullanılarak taban banta indirilmekte ve son olarak ilgili modun taban bantta genişliğinin kestirilmesi için sinyal gradyanının L^2 normu hesaplanmaktadır. Problem matematiksel olarak aşağıdaki en iyileme problemi ile ifade edilebilir:

$$\min_{\{u_k(t)\}, \{w_k\}} \left(\sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right) \quad (1)$$

öyle ki: $\sum_k u_k(t) = f(t)$.

(1)'de $\{u_k(t)\} := \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_k(t)\}$ sinyale ait kipleri ve $\{w_k\} := \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ sinyale ait kiplerin merkez frekanslarını göstermektedir.

(1)'de verilen en iyileme problemini kısıtsız hale getirmek için ikinci dereceden ceza terimi ve Lagrange çarpanı önerilmiştir [6]. Burada ikinci dereceden ceza terimi gürültü altında problemin çözüme yakınsamasını sağlarken, Lagrange çarpanlarını içeren terim kısıtın sıkı bir şekilde sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu durumda ikinci dereceden ceza teriminide içeren Lagrange işlevini aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz:

$$L(\{u_k\}, \{w_k\}, \lambda) := \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle. \quad (2)$$

(1)'de verilen en iyileme probleminin çözümü Denklem 2'de verilen Lagrange işlevinin durgun noktası olarak belirlenebilir. [6]'da, (2)'de verilen fonksiyonun durgun noktası değişken yönlü çarpanlar metodu (DYÇM) [7] ile en iyileme parametreleri sıralı olarak yinelemeli bir şekilde çözülmüştür. Çözüm yöntemi ilerleyen kısımda detaylandırılmaktadır.

1) *Kip İşaretlerine Göre En İyileme:* $u_k^n(t)$ ve w_k^n , sırasıyla kip işaretlerinin ve ilgili merkez frekanslarının n numaralı yinelemedeki değerlerini gösterebilir. Denklemlerin içerisinde ilgili değişkenin en güncel halinin kullanıldığı durumlarda yineleme indisi denklemlerin okunabilirliğini artırır.

mak amacıyla gösterilmemektedir. k 'nıncı kip fonksiyonunu güncellemek için aşağıdaki en iyileme problemi çözülmelidir:

$$u_k^{n+1}(t) = \arg \min_{u_k(t)} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda}{2} \right\|_2^2 \right\}. \quad (3)$$

(3)'de, L^2 norm işlemi içerisindeki terimler frekans alanına çevrilerek yeniden yazılması durumunda Fourier dönüşümünün isometrik özelliği sebebiyle norm işleminin sonucu değişmeyecektir. Ayrıca zaman alanında gerçek sinyaller olan kip fonksiyonlarının frekans alanında karmaşık eşlenik simetrisi özelliği kullanılarak norm hesabı sadece negatif olmayan frekanslar üzerinden yapılabilir. Bu durumda problem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\hat{u}_k^{n+1}(t) = \arg \min_{u_k \in X} \left\{ \int_0^\infty 4a(w - w_k)^2 |\hat{u}_k(w)|^2 dw + 2 \left| \hat{f}(w) - \sum_i \hat{u}_i(w) + \frac{\hat{\lambda}(w)}{2} \right|^2 dw \right\}. \quad (4)$$

(4)'de $\hat{f}(w) := \mathcal{F}\{f(\cdot)\} := 1/\sqrt{2\pi} \int f(t) e^{-jw t} dt$ olarak tanımlanmıştır. Burada verilen karesel en iyileme problemi ilgili moda göre türevin 0 olması sağlanarak aşağıdaki gibi çözülebilir.

$$\hat{u}_k^{n+1}(w) = \frac{\hat{f}(w) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(w) + \frac{\hat{\lambda}}{2}}{1 + 2a(w - w_k)^2} \quad (5)$$

(5)'de, (3)'de verilen en iyileme problemini çözen u_k kip işaretinin, f işaretinden diğer kiplerin çıkarılması ile elde edilen kalan sinyalin, bulunmak istenen modun frekansı olan w_k çevresinde Wiener filtreden geçirilmesi ile elde edilebileceği gösterilmektedir [6].

2) *Kip Frekanslarına Göre En İyileme:* (1)'de frekans terimleri sadece ilgili modların bant genişliği ile ilgili terimde yer almaktadır. Bu nedenle ilgili problem aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$w_k^{n+1} = \arg \min_{w_k} \left\{ \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-jw_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

Kip fonksiyonları için izlenen yöntemle benzer olarak problem frekans alanında

$$w_k^{n+1} = \arg \min_{w_k} \left\{ \int_0^\infty (w - w_k)^2 |\hat{u}_k(w)|^2 dw \right\} \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir. (7)'de verilen karesel problemin çözümü

$$w_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty w |\hat{u}_k(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(w)|^2 dw} \quad (8)$$

olarak hesaplanabilir. (8)'de problemi çözen frekans değerlerinin ilgili modların güç spektrumunda ağırlık merkezleri olduğu gözlenebilir. (5)'de ve (8)'de verilen denklemler kullanılarak oluşturulan varyasyonel kip ayırıcı algoritmasının işleyişi Algoritma 1'de verilmektedir.

B. Çıkarılan Öz Nitelikler

Bölüm II'de de belirtildiği üzere kip frekansları, kiplerin zamandaki yerleri, zaman ve frekansta ne kadar yayıldıkları radarlar için farklılık göstermektedir. Bu amaçla [8]'de

Algorithm 1 Varyasyonel Kip Ayırıcı

1: *Başlangıç Atamaları:* $\{\hat{u}_k^1\}, \{\hat{w}_k^1\}, \hat{\lambda}^1, n \leftarrow 0$

2: **repeat**

3: $n \leftarrow n + 1$

4: **for** $k = 1 : K$ **do**

5: Kip işaretini güncelle:

$$\hat{u}_k^{n+1}(w) \leftarrow \frac{\hat{f}(w) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(w) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^n(w) + \frac{\hat{\lambda}}{2}}{1 + 2a(w - w_k)^2} \quad (9)$$

6: Kip frekansını güncelle:

$$w_k^{n+1} \leftarrow \frac{\int_0^\infty w |\hat{u}_k^{n+1}(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(w)|^2 dw} \quad (10)$$

7: **end for**

8: Lagrange çarpanlarını güncelle:

$$\hat{\lambda}^{n+1}(w) \leftarrow \hat{\lambda}^n(w) + \tau \left(\hat{f}(w) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(w) \right) \quad (11)$$

9: **until** $\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2 / \|\hat{u}_k^n\|_2^2 > \epsilon$

verilen ve sinyalleri karakterize etmek için kullanılan zaman/frekans merkezi ile zaman/frekans standart sapmaları öznelitlikler olarak $k = 1 \dots K$ kipleri için aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\mu_k^w = \frac{\int_0^\infty w |\hat{u}_k(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(w)|^2 dw}, \quad (12)$$

$$\mu_k^t = \frac{\int_{-\infty}^\infty t |u_k(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^\infty |u_k(t)|^2 dt}, \quad (13)$$

$$\sigma_k^w = \left(\frac{\int_0^\infty (w - \mu_k^w)^2 |\hat{u}_k(w)|^2 dw}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(w)|^2 dw} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

$$\sigma_k^t = \left(\frac{\int_{-\infty}^\infty (t - \mu_k^t)^2 |u_k(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^\infty |u_k(t)|^2 dt} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Radar parmak izi oluşturmak için yapılan darbe içi kayıtlarda kayıt penceresi içerisinde darbelerin geliş zamanı farklı olabileceği için zaman merkezini gösteren öznelitlikler radara ait darbeler arasında farklı olarak bulunabilir. Bu durum zaman merkezi öznelitliklerinin en düşük frekanslı moda göre farkını hesaplayarak ortadan kaldırılabilir. Bu durumda zaman merkezi öznelitlikleri

$$\mu_k^t = \mu_k^t - \mu_0^t \quad k = 2 \dots K \quad (16)$$

olarak hesaplanabilir.

Gerçek veriler ile yapılan analizlerde kip sayısı olan K parametresinin $K = 2$ olarak seçilmesinin uygun olduğu gözlenmiştir. Kip sayısının daha büyük seçildiği durumlarda enerjisi en yüksek olan ilk 2 kip VKA tarafından aynı şekilde bulunurken diğer kipler enerjileri çok düşük sinyaller olarak hesaplanmaktadır.

IV. GERÇEK VERİLER İLE ELDE EDİLEN DENEY SONUÇLARI

Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için iki ayrı veri seti kullanılmıştır. İlk veri setinde aynı radarın 4 farklı üretiminden kayıt edilen 500 ayrı darbeyi içeren işaretler bulunmaktadır. İlgili veri seti için tüm radarlardan örnek bir darbe Şekil 4'de verilmiştir. Önerilen yöntem ile hesaplanan öznelitlikler her darbe için Şekil 5,6,7'de gösterilmektedir. Görüldüğü

Şekil 4: İlk veri seti için ölçülen darbe genlik zarfları.

Şekil 6: İlk veri seti için frekans sapması öznelilikleri.

Şekil 5: İlk veri seti için zaman ve frekans merkezi öznelilikleri.

Şekil 7: İlk veri seti için zaman sapması öznelilikleri.

üzere çıkarılan öznelilikler doğrusal basit bir sınıflandırıcı kullanılarak ayrıştırılabilmektedir.

İkinci veri setinden ise 47 ayrı radara ait olan işaretler bulunmaktadır. Her radar için 10 ayrı zamanda alınan ölçümler kullanılarak tüm veri içerisinde öznelilikler arası normalize Öklit uzaklığı hesaplanmıştır. Oluşturulan 470×470 boyutundaki uzaklık matrisi Şekil 8'de logaritmik olarak verilmiştir. Şekil 8'de gözleneceği üzere tüm radarlar için, sınıf içi mesafe tipik olarak -50 dB değerinden küçük hesaplanırken, sınıflar arası mesafe tipik olarak -20 dB'den büyük hesaplanmıştır.

V. DEĞERLENDİRMELER

Radar parmak izi oluşturmak amacıyla yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin radarları ayırt edici öznelilikler oluşturabildiği gerçek radar verileri üzerinde yapılan analizler ile gösterilmiştir. Oluşturulan özneliliklerin yoğun elektronik harp senaryolarında ortamdaki radarları yüksek başarımla kimliklendirebileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] L. E. Langley, "Specific emitter identification (sei) and classical parameter fusion technology," in *WESCON'93. Conference Record.*, IEEE, 1993, pp. 377–381.
- [2] T.-w. Chen, W.-d. Jin, and J. Li, "Feature extraction using surrounding-line integral bispectrum for radar emitter signal," in *Neural Networks, 2008. IJCNN 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Joint Conference on.* IEEE, 2008, pp. 294–298.

Şekil 8: Sınıflar arası normalize Öklit uzaklığı.

- [3] B. Pei, Z. Bao, and M. Xing, "Logarithm bispectrum-based approach to radar range profile for automatic target recognition," *Pattern recognition*, vol. 35, no. 11, pp. 2643–2651, 2002.
- [4] M.-W. Liu and J. F. Doherty, "Specific emitter identification using nonlinear device estimation," in *Sarnoff Symposium, 2008 IEEE.* IEEE, 2008, pp. 1–5.
- [5] A. Aubry, A. Bazzoni, V. Carotenuto, A. De Maio, and P. Failla, "Cumulants-based radar specific emitter identification," in *Information Forensics and Security (WIFS), 2011 IEEE International Workshop on.* IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [6] K. Dragomiretskiy and D. Zosso, "Variational mode decomposition," *IEEE transactions on signal processing*, vol. 62, no. 3, pp. 531–544, 2014.
- [7] M. R. Hestenes, "Multiplier and gradient methods," *Journal of optimization theory and applications*, vol. 4, no. 5, pp. 303–320, 1969.
- [8] L. Cohen, *Time-frequency analysis*. Prentice Hall PTR Englewood Cliffs, NJ., 1995, vol. 778.