

Elektronik İstihbarat Sistemlerinde Darbe-İçi Faz/Frekans Atlama Parametreleri Kestirimi

Estimation of Inter-Pulse Phase/Frequency Stepping Parameters in Electronic Intelligence Systems

Yaşar Kemal ALP*, Gökhan Gök*†,

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

†Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Özetçe —Bu çalışmada, darbe sıkıştırması için darbe içinde faz/frekans atlama yapan radar darbelerinin kipleme parametrelerinin hassas bir şekilde kestirimini sağlayan yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem önce ölçülen darbelerin çözümlenmiş anlık-faz verisini, faz/frekans atlama anlarını belirginleştiren özel filtrelerden geçirmekte daha sonra GEKK (Gürbüz En Küçük Kareler) kestiricisi ile veri üzerindeki anomalileri tespit etmektedir. Tespit edilen anomalilerin lokal maksimumları ise faz/frekans atlama anlarının hassas kestirimlerini vermektedir. Sentetik veriler üzerinde yapılan benzetimlerde, önerilen yöntemin farklı SGO'larda (Siyal-Gürültü Oranı) ve faz/frekans atlama miktarlarında yüksek başarımla faz/frekans atlama anlarını tespit ettiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler—Darbe içi kipleme, faz/frekans atlama, GEKK algoritması

Abstract—In this work, a new method for estimating the modulation parameters of radar pulses which make interpulse phase/frequency stepping for pulse compression. Proposed method first applies special filters, which magnifies phase/frequency stepping instants, to the instantaneous phase of the measured radar pulse. Then, Robust Least Squares (RobLS) algorithm is utilized for anomaly detection. The local maximum of the detected anomaly points provides the high resolution estimates of the phase/frequency stepping instants. Extensive experiments conducted on synthetic data sets for different SNR (Signal-to-Noise Ratio) levels and phase/frequency stepping values show that proposed method can successfully estimate phase/frequency stepping instants.

Keywords—Inter-pulse modulation, phase/frequency stepping, RobLS algorithm

I. GİRİŞ

Radar sistemlerinde daha yüksek menzil çözünürlüğü için faz ya da frekans kiplemeli darbeler kullanılmaktadır. Belirli bir uzaklık içerisinde kalan tehdit radarların tespit edilip, bu radarların gönderdikleri darbelere uyguladıkları darbe içi kipleme parametrelerinin otomatik kestirimi, bir ELİST (Elektronik İstihbarat) sistemi açısından oldukça önemlidir [1]. Literatürde özellikle sinir ağı tabanlı, otomatik darbe içi kipleme tipi sınıflandırılması için bir çok yöntem önerilmiştir [2]–[5]. Bu yöntemler, çok düşük SGO'larda (Sinyal-Gürültü Oranı) bile, radar darbelerinin kipleme tipini BPSK (Binary Phase Shift

Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), Doğrusal FM (Frequency Modulation) vs. gibi sınıflara ayırabilmekte ancak bahsedilen kipleme tiplerine ait olan parametrelerin kestirimini yapmamaktadır. Başarılı bir ELİST sisteminde, darbe tespiti için gerekli olan SGO seviyesi 10 dB civarındadır. Dolayısı ile ELİST sistemlerinden beklenen daha düşük SGO'larda otomatik kipleme tipi sınıflandırılması değil, en az 10 dB SGO'da radar darbelerinin kipleme parametrelerinin hassas bir şekilde kestirilmesi esastır.

Bu çalışmada darbe içinde faz/frekans atlama yapan radar darbelerinin, faz/frekans atlama anlarının hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlayan yeni bir yöntem önerilmektedir. Faz/frekans atlama anlarının tespitinden sonra, radarın faz dizisi, frekans dizisi, bit dizisi vs. gibi kipleme parametreleri kolaylıkla kestirilebilmektedir. Önerilen yöntem, ölçülen darbenin çözümlenmiş anlık faz verisine birinci derece hermit Gauss fonksiyonu [6] tabanlı bazı filtreler uygulayarak radarın faz/frekans atlama anlarını belirginleştirmekte, daha sonra GEKK (Gürbüz En Küçük Kareler) kestiricisi [7] ile bu veri üzerindeki anomalileri tespit etmektedir. Tespit edilen anomalilerin lokal maksimumları radarın darbe içinde faz/frekans atlama anlarını vermektedir.

Bildirinin planı şu şekildedir: Bölüm-II'de darbe içi faz/frekans atlama modeli anlatılmıştır. Bölüm-III'de önerilen yöntem detaylandırılmıştır. Sentetik veriler üzerinden yapılan benzetimler Bölüm-IV'de verilmiştir. Bölüm-V değerlendirme için ayrılmıştır.

II. DARBE İÇİ FAZ/FREKANS ATLAMA MODELİ

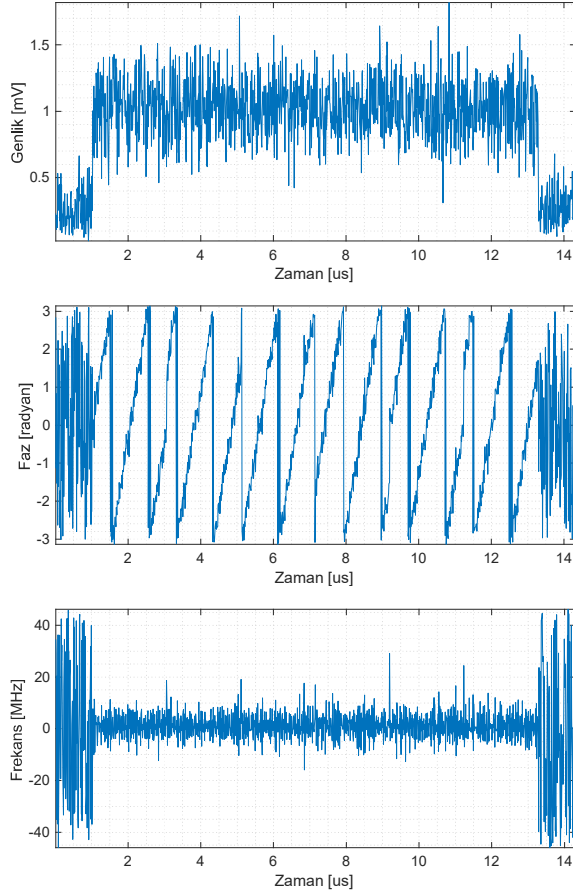
Taban banda indirilerek örneklenmiş radar darbesine ait olan karmaşık IQ(Inphase / Quadrature) örnekler

$$x(t_n) = a(t_n)e^{j\phi(t_n)} + z(t_n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $\phi(t_n)$ darbenin anlık-fazını; $z(t_n)$ ise standart sapması σ_z , ortalaması 0 olan simetrik karmaşık Gauss gürültüsünü; t_n örnekleme anlarını, N ise toplanan örnek sayısını belirtmektedir. Darbenin anlık-zarfi ise

$$a(t_n) = \begin{cases} 1 & \text{if } T_0 \leq t_n < T_0 + T_g \\ e^{-(t_n - T_0)^2 / \sigma_1^2} & \text{else } t < T_0 \\ e^{-(t_n - T_0 - T_g)^2 / \sigma_2^2} & \text{else } T_0 + T_g \leq t \end{cases} \quad (2)$$

ile modellenir. Burada T_0 darbe başlangıç zamanını, T_g ise darbe genişliğini, σ_1 ve σ_2 ise sırasıyla darbe çıkış ve iniş



Şekil 1: Her 2 us'de bir 90 derece faz atlayan bir radar darbesinin, 10 dB SGO'da alınan anlık-genlik (yukarıda), anlık-faz (ortada) ve anlık-frekans (aşağıda) grafikleri.

zamanlarını belirleyen parametrelerdir.

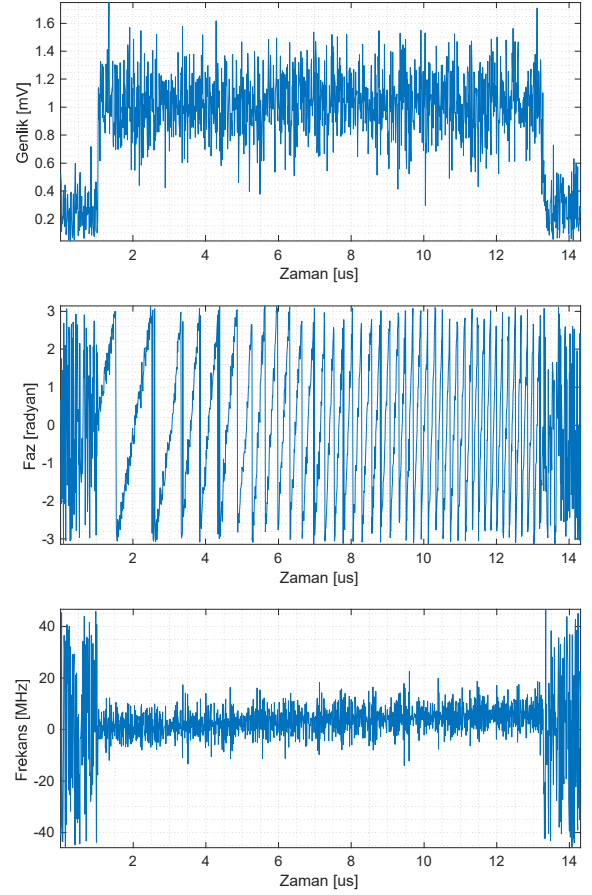
Faz atlamalı bir darbeye, $\{t_{\phi_1}, t_{\phi_2}, \dots, t_{\phi_K}\}$ anlarında ($T_0 < t_{\phi_k} < T_0 + T_g$, $k = 1, 2, \dots, K$) sırasıyla $\phi_{\Delta_1}, \phi_{\Delta_2}, \dots, \phi_{\Delta_K}$ radyan faz atlaması olması durumunda, darbenin anlık-fazı

$$\phi(t_n) = \begin{cases} 2\pi f_s t_n + \phi_0 & \text{if } t_n \leq t_{\phi_1} \\ 2\pi f_s t_n + \phi_0 + \phi_{\Delta_1} & \text{if } t_{\phi_1} < t_n \leq t_0 + t_{\phi_2} \\ \dots & \dots \\ 2\pi f_s t_n + \phi_0 + \sum_{k=1}^{K-1} \phi_{\Delta_k} & \text{if } t_{\phi_{K-1}} < t_n \leq t_{\phi_K} \\ 2\pi f_s t_n + \phi_0 + \sum_{k=1}^K \phi_{\Delta_k} & \text{if } t_n > t_{\phi_K} \end{cases} \quad (3)$$

ile ifade edilebilir. Burada ϕ_0 , $t = 0$ anındaki darbenin faz ofsetini belirtmektedir. Benzer şekilde frekans atlamalı bir darbeye, $\{t_{f_1}, t_{f_2}, \dots, t_{f_L}\}$ anlarında sırasıyla $f_{\Delta_1}, f_{\Delta_2}, \dots, f_{\Delta_L}$ MHz frekans atlaması olması durumunda, darbenin anlık-faz fonksiyonu

$$\phi(t_n) = \begin{cases} 2\pi f_s t_n + \phi_0 & \text{if } t_n \leq t_{f_1} + \\ 2\pi (f_s + f_{\Delta_1}) t_n + \phi_0 & \text{if } t_{f_1} < t_n \leq t_0 + t_{f_2} \\ \dots & \dots \\ 2\pi (f_s + \sum_{l=1}^{L-1} f_{\Delta_l}) t_n + \phi_0 & \text{if } t_{f_{L-1}} < t_n \leq t_{f_L} \\ 2\pi (f_s + \sum_{l=1}^L f_{\Delta_l}) t_n + \phi_0 & \text{if } t_n > t_{f_L} \end{cases} \quad (4)$$

olarak yazılabilir. Şekil 1'de, 10 dB SGO'da, her 2 us'de bir



Şekil 2: Her 2 us'de bir 1 MHz frekans atlayan bir radar darbesinin, 10 dB SGO'da alınan anlık-genlik (yukarıda), anlık-faz (ortada) ve anlık-frekans (aşağıda) grafikleri.

90 derece faz atlayan, darbe genişliği 12 us olan bir radar darbesinin anlık-genlik, anlık-frekans ve anlık-faz grafikleri verilmiştir. Şekil 2 ise aynı grafikler her iki 2 us'de 1 MHz frekans atlayan bir radar darbesi için tekrarlanmıştır. (2)'de darbe genişliği 1 olarak tanımlandığı için, SGO tanımımız $SGO = -20 \log_{10} \sigma_z$ şeklindedir. Görüldüğü üzere 10 dB SGO seviyelerinde, toplanan ham darbe içi veride faz/frekans atlamaları oldukça belirsizdir. Bir sonraki bölümde, toplanan darbe içi veride faz/frekans atlamalarının tespiti için önerilen yöntem anlatılacaktır.

III. ÖNERİLEN YÖNTEM

Zaman serisi veri üzerindeki atlamaların tespiti için literatürde farklı uygulamalarda birçok yöntem önerilmiştir [8]. Temelde bu yöntemler veriyi özel seçilmiş bir yüksek geçiren filtreden geçirmekte, daha sonra sinyal üzerinde belirli bir eşik üzerinde kalan lokal maksimumları bulmaktadır. Bu çalışmada sinyal üzerindeki faz/frekans atlamaları daha belirgin hale getirmek için 1. derece HG (hermite Gauss) fonksiyonu kullanılmıştır [6]. Ölçüm sinyalinin çözümlenmiş anlık-faz verisinin bu fonksiyon ile filtrelenmesinden sonra belirginleşen atlamalar GEKK (Gürbüz En Küçük Kareler Kestiricisi) ile tespit edilmiştir. Aşağıdaki alt başlıklarda önerilen yöntem detaylandırılacaktır.

Algorithm 1 *Bisquare* Ağırlık Fonksiyonu Kullanan Gürbüz en Küçük Kareler Kestiricisi

```

1: Girdiler:  $\mathbf{y} \in \mathcal{R}^K$ ,  $N_i$ ,  $\zeta$ 
2: Çıktılar:  $\mathbf{w} \in \mathcal{R}_+^K$ 
3: Başlangıç Atamaları:  $\mathbf{w} = 1$ ,  $\mathbf{e}^{(0)} = 0$ ,  $\theta = 1$ ,  $i = 1$ 
4: while  $i \leq N_i$  do
5:    $\mathbf{W} = \text{diag}(\mathbf{w})$ 
6:    $\mathbf{b}^{(i)} = (\mathbf{1}^T \mathbf{W} \mathbf{1})^{-1} \mathbf{1}^T \mathbf{W} \mathbf{y}$ 
7:    $\mathbf{e}^{(i)} = \mathbf{y} - \mathbf{1} \mathbf{b}^{(i)}$ 
8:    $\kappa = 6.946 \text{med}(\mathbf{e}^{(i)})$ 
9:    $\mathbf{w}_k = \begin{cases} 0 & \text{if } |\mathbf{e}_k^{(i)}| > \kappa \\ \left[1 - \left(\mathbf{e}_k^{(i)} / \kappa\right)^2\right]^2 & \text{if } |\mathbf{e}_k^{(i)}| \leq \kappa \end{cases}$ 
10:  if  $\|\mathbf{e}^{(i)} - \mathbf{e}^{(i-1)}\| / \|\mathbf{e}^{(i)}\| \leq \zeta$  then
11:    break
12:  end if
13: end while

```

A. Darbe İçi Faz Atlama Tespiti

Sinyalin darbe içindeki faz atlamalarını tespit edebilmek için sinyal, uygun şekilde hem zaman destek bölgesi hem de genlik seviyesi ölçeklendirilmiş,

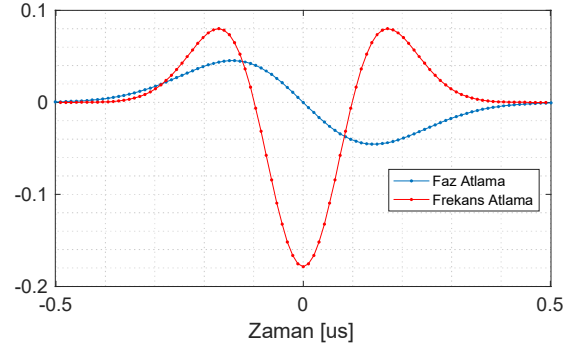
$$h_{\beta, \gamma}(t_n) = \beta 2^{1/4} \sqrt{\pi} e^{-\pi t_n^2 / \gamma^2} t_n / \gamma, n = -N_h, \dots, N_h \quad (5)$$

ile tanımlı 1. derece HG fonksiyonu ile filtrelendir. Burada γ zaman destek bölgesi ölçekleme parametresini, β genlik seviyesi ölçekleme parametresini, t_n , $n = -N_h, \dots, N_h$ fonksiyonun örneklenme anlarını belirtmektedir. γ parametresi, $h_{\beta, \gamma}$ fonksiyonunun destek bölgesi minimum faz atlama süresi (tipik olarak 2 us) olacak şekilde seçilebilir. β_ϕ ise doğru faz atlama değeri kestirimi için $\beta_\phi = 2 / \sum_{n=-N}^N |h_{0, \gamma}(t_n)|$ olarak alınmalıdır. Şekil 3'de faz atlaması tespiti kullanılan filtre (mavi) verilmiştir. Şekil 4'de ise, Şekil 1'de verilen sinyalin çözülünmüş anlık-faz fonksiyonunun (5)'de verilen fonksiyon ile filtrelemesi sonucunda oluşan çıktı (mavi) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kullanılan fonksiyon faz üzerindeki atlamaları oldukça belirgin hale getirmiştir.

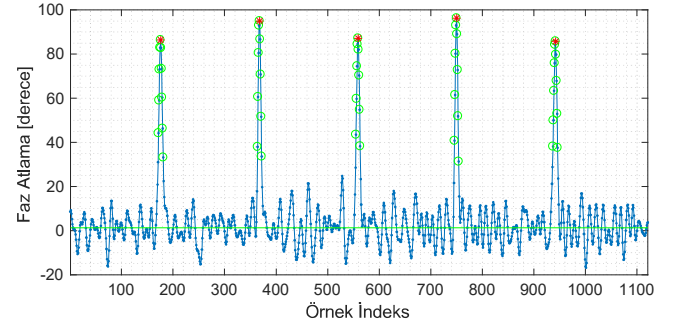
Filtreleme işleminin ardından, oluşan veri üzerindeki anomaliler faz atlama anlarını vermektedir. Bu anomalilerin tespiti için, Algoritma-1'de verilen *bisquare* ağırlık fonksiyonu kullanan GEKK kestiricisi [7] kullanılmıştır. Algoritma girdilerindeki $\mathbf{y} \in \mathcal{R}^K$, ölçüm sinyalinin (5)'de verilen fonksiyon ile konvolüsyonu sonucunu, N_i GEKK yakınsaması için maksimum iterasyon sayısını, ζ GEKK iterasyonları yakınsama eşiğinin belirtmektedir. $N_i = 50$, $\zeta = 10^{-3}$ seçmek uygundur. GEKK iteratif olarak ölçüm vektörünün üzerindeki ağırlık vektörünü \mathbf{w} 'yi güncelleyerek anomali olan noktaların ağırlıklarını azaltmaktadır. İterasyonlar yakınsadığında ise \mathbf{y} içindeki anomali olan noktaların ağırlığı 0 olmaktadır. Şekil 4'de, GEKK iterasyonları sonrasında ağırlıkları 0 olan tespit edilen noktalar (yeşil daire) gösterilmiştir. Bu noktaların lokal maksimumları (kırmızı) ise faz atlama noktalarını vermektedir.

B. Darbe İçi Frekans Atlama Tespiti

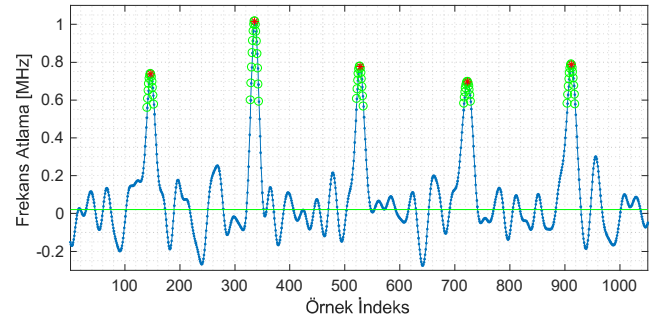
Frekans atlamalarının tespiti için yine ölçüm sinyalinin çözülünmüş anlık faz verisi kullanılmaktadır. Sinyalin anlık-fazı $\phi(t)$ ile anlık-frekansı $f(t)$ arasında $f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi(t)$ ilişkisi olduğu için, anlık-faz verisine uygulanacak olan filtrenin efektif olarak önce verinin türevini alması daha sonra



Şekil 3: Faz atlaması (mavi) ve frekans atlaması (kırmızı) tespiti için kullanılan filtre katsayıları.



Şekil 4: Şekil 1'de verilen sinyalin çözülünmüş anlık-faz fonksiyonunun (5)'de verilen fonksiyon ile filtrelemesi sonucunda oluşan çıktı (mavi); GEKK ile tespit edilen anomaliler (yeşil daire); faz atlama anlarına karşılık gelen, anomalilerin lokal maksimumları (kırmızı).



Şekil 5: Şekil 2'de verilen sinyalin çözülünmüş anlık-faz fonksiyonunun (6)'de verilen fonksiyon ile filtrelemesi sonucunda oluşan çıktı (mavi); GEKK ile tespit edilen anomaliler (yeşil daire); frekans atlama anlarına karşılık gelen, anomalilerin lokal maksimumları (kırmızı).

anomalileri belirgin hale getirmesi gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki fonksiyonu tanımlayalım:

$$g(t_n) = h_{\beta_1, \gamma}(t_n) \star h_{\beta_2, \gamma}(t_n) \quad (6)$$

burada $h_{a, b}(t)$ (5)'de tanımlanmış olup β_1

$$\beta_1 = \frac{F_s \sum_{n=-N}^0 |h_{0, \gamma}(t_n)|^{1.5}}{2\pi \sum_{n=-N}^0 n |h_{0, \gamma}(t_n)|^{1.5}} \quad (7)$$

olarak, β_2 ise $\beta_2 = 2.7 / \sum_{n=-N}^N |h_{0,\gamma}(t_n)|$ ile hesaplanır. Burada F_s örnekleme frekansını belirtmekte olup, $h_{\beta_1,\gamma}(t_n)$ efektif olarak fazın türevini alarak anlık-frekans verisini hesaplamakta, $h_{\beta_2,\gamma}(t_n)$ ise anlık frekans üzerindeki anomalileri belirgin hale getirmektedir. Şekil 5’de ise, Şekil 2’de verilen sinyalin çözümlenmiş anlık-faz fonksiyonun (6)’de verilen fonksiyon ile filtrelemesi sonucunda oluşan çıktı (mavi) gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kullanılan fonksiyon faz üzerindeki atlama-ları belirgin hale getirmiştir. Faz atlama tespitinde olduğu gibi, GEKK ile bu veri üzerindeki anomaliler ve frekans atlama noktaları tespit edilmiş yine aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Görüldüğü üzere önerilen $g(t_n)$ fonksiyonu anlık faz verisi üzerindeki frekans atlama noktalarını başarılı bir şekilde tespit edebilmektedir.

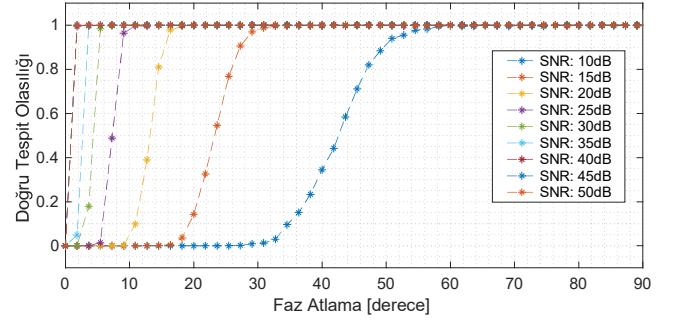
IV. BENZETİM SONUÇLARI

Önerilen faz atlama tespiti yönteminin başarımının analizi için darbe genişliği 12 us, merkez frekansı 0 MHz olan ve her 2 us’de bir Δ_ϕ derece faz atlama yapan farklı SGO’larda sentetik radar darberleri oluşturulmuştur. Faz atlama miktarı Δ_ϕ 0’dan 90 dereceye 2 derece aralıklarla, SGO ise 10 dB’den 50 dB’ye 5 dB aralıklarla değiştirilmiştir. Her Δ_ϕ ve SGO değeri için 1000 Monte-Carlo benzetimi yapılmış, faz atlama anlarının tamamının doğru olarak tespit edildiği durumlar başarılı, en az bir tanesinin hatalı olarak tespit edildiği durumlar başarısız tespit olarak işaretlenmiştir. Şekil 6’da farklı faz atama miktarları ve SGO seviyeleri için yöntemin doğru tespit olasılığı verilmiştir. Görüldüğü üzere tipik bir ELİST sisteminin darbe tespiti yapabildiği en düşük SGO seviyesi olan 10 dB SGO’da, 60 derece üzerinden tüm faz atlamaları %99 olasılıkla doğru olarak tespit edilebilmektedir. 50 dB SGO’da ise 2 dereceden fazla olan faz atlamaları %99 olasılıkla doğru olarak tespit edilebilmektedir.

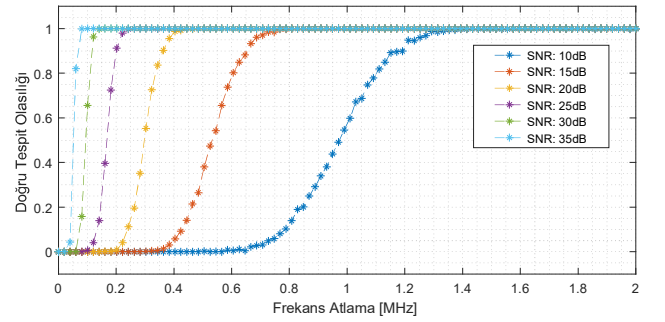
Benzer benzetimler, darbe genişliği 12 us, merkez frekansı 0MHz olan ve darbe içinde her 2 us’de bir Δ_f MHz frekans atlayan bir radar için tekrarlanmıştır. Bu kez Δ_f 0MHz’den 2MHz’e kadar 0.02MHz aralıklarla, SGO ise 10 dB’den 35 dB’ye 5dB aralıklar taranmıştır. Yine her Δ_f ve SGO için 1000 Monte Carlo benzetimi yapılmış, frekans atlama anlarının tamamının doğru olarak tespit edildiği durumlar başarılı, en az bir tanesinin hatalı olarak tespit edildiği durumlar başarısız tespit olarak işaretlenmiştir. Benzetim sonuçları Şekil 7’de verilmiştir. Görüldüğü üzere önerilen yöntem 10 dB SGO’da 1.4 MHz’den büyük frekans atlamalarını, 35 dB SGO’da ise 0.1 MHz’den büyük frekans atlamalarını %99 olasılıkla başarılı bir şekilde tespit edebilmektedir.

V. DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada darbe içinde faz/frekans atlaması yapan radar darbelerinin faz/frekans atlama anlarının hassas bir şekilde tespiti için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem ölçülen çözümlenmiş darbe içi faz verisine önerilen filtreleri uygulayarak, faz/frekans atlamaları anlarının belirginleşmesini sağlamakta daha sonra GEKK kestirici ile atlama anlarının hassas bir şekilde tespit edilmesini olanaklı kılmaktadır. Yapılan benzetimlerle önerilen yöntemin performansı farklı SNR seviyeleri faz/frekans atlama miktarları için analiz edilmiştir.



Şekil 6: Farklı SGO ve faz atlama değerleri için önerilen yöntemin darbe içindeki faz atlama anlarını başarılı tespit ihtimali.



Şekil 7: Farklı SGO ve frekans atlama değerleri için önerilen yöntemin darbe içindeki frekans atlama anlarını başarılı tespit ihtimali.

KAYNAKLAR

- [1] P. Pace, "Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar", Artech House, London, 2009.
- [2] J. Lunden, V. Koivunen, "Automatic Radar Waveform Recognition", Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 1, no. 1, pp. 124-136, June 2007.
- [3] Chao Wang, Hao Gao, Xu-Dong Zhang, "Radar Signal Classification Based on Auto-correlation Function and Directed Graphical Model", 6th International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), Hong Kong, August 2016.
- [4] Chao Wang, Jian Wang, Xu-Dong Zhang, "Automatic Radar Waveform Recognition Based on Time-Frequency Analysis and Convolutional Neural Network", International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, pp.1440-1448, New Orleans, 2017.
- [5] F. C. Akyon, Y. K. Alp, G. Gok, O. Arikan, "Elektronik Harp Sistemlerinde Derin Öğrenme: Otomatik Darbe İçi Modülasyon Tanıma", gönderilmiştir, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, SIU2018.
- [6] Y. K. Alp, O. Arikan, "Time-Frequency Analysis of Signals Using Support Adaptive Hermite Gaussian Expansions", Digital Signal Processing, vol. 22, pp.1010-1023, 2012.
- [7] J. O. Street, R. J. Carroll, D. Ruppert "A Note on Computing Robust Regression Estimates via Iteratively Reweighted Least Squares", The American Statistician. Vol. 42, 1988, pp. 152-154.
- [8] J. Theiler, "Quantitative Comparison of Quadratic Covariance-Based Anomalous Change Detectors", Applied Optics, vol.47, no. 28, 2008.