



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Elektronik destek sistemleri için frekans kestirim yöntemlerinin performans analizi

Performance analysis of frequency estimation methods for electronic support systems

Yazar(lar) (Author(s)): Gamze CABADAĞ¹, Ömer KARAL²

ORCID¹: 0000-0002-9338-7595

ORCID²: 0000-0001-8742-8189

To cite to this article: Cabadağ G. ve Karal Ö., “Elektronik Destek Sistemleri İçin Frekans Kestirim Yöntemlerinin Performans Analizi”, *Journal of Polytechnic*, 28(2): 513-520, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Cabadağ G. ve Karal Ö., “Elektronik Destek Sistemleri İçin Frekans Kestirim Yöntemlerinin Performans Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 28(2): 513-520, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1262997

Elektronik Destek Sistemleri için Frekans Kestirim Yöntemlerinin Performans Analizi

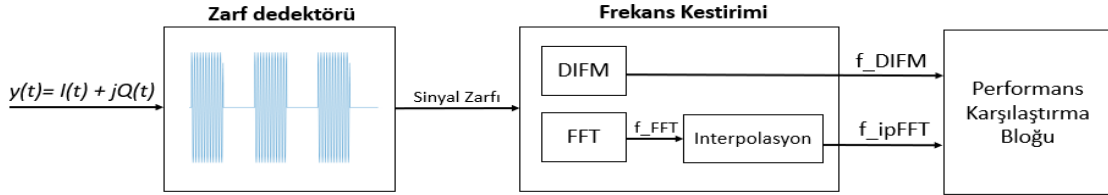
Performance Analysis of Frequency Estimation Methods for Electronic Support Systems

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Elektronik destek sistemleri için frekans tahmini / Frequency estimation for electronic support systems
- ❖ İnterpolasyon yöntemleri ile FFT sonuç iyileştirmesi/ FFT result improvement with interpolation methods
- ❖ FFT ve DIFM yöntemlerinin karşılaştırılması/ Comparison of FFT and DIFM methods

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, farklı SNR seviyelerinde Gauss gürültüsü ile kirlenmiş tehdit sinyalinin frekans kestirimi, DIFM yöntemi ve FFT sonucuna uygulanan Jacobsen Quinn ve Ligges interpolasyon teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. In this study, frequency estimation of the Gaussian noise contaminated threat signal at different SNR levels was performed using DIFM method and the Jacobsen, Quinn and Ligges interpolation techniques applied to the FFT.



Şekil. Frekans kestirim yöntemleri blok diyagramı/ **Figure.** Frequency estimation methods block diagram

Amaç (Aim)

Elektronik destek sistemleri için DIFM ve FFT frekans kestirim yöntemlerinin frekans doğruluğu ve hesaplama zamanı açısından karşılaştırılması. /Comparison of DIFM and FFT based frequency estimation methods for electronic support systems in terms of frequency accuracy and computation time.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

FFT sonucunda hesaplanan frekansı iyileştirmek için Jacobsen, İyileştirilmiş Quinn ve Ligges yöntemleri uygulanmıştır ve yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır. /Jacobsen, Improved Quinn and Ligges methods were applied to improve the frequency calculated in the FFT result and the performance of methods were compared.

Özgünlük (Originality)

Literatürdeki çalışmalarda, FFT tabanlı Jacobsen, İyileştirilmiş Quinn ve Ligges yöntemleri ile elde edilen frekans kestirim sonuçları; farklı SNR seviyesindeki Gauss gürültüsü altında hata oranı ve hesaplama hızı açısından DIFM sonuçları ile detaylı bir şekilde karşılaştırılmamıştır. /In studies in the literature, frequency estimation results obtained by FFT based Jacobsen, Improved Quinn and Ligges methods have not been compared in detail with DIFM results in terms of error rate and computation time under different Gauss noise at different SNR levels.

Bulgular (Findings)

Jacobsen, İyileştirilmiş Quinn ve Ligges yöntemleri, frekans hatasını azaltarak FFT sonucunu önemli ölçüde iyileştirdi. DIFM yöntemi artan SNR değerlerine karşı en başarılı yöntemdir ancak interpolasyon yöntemlerinden daha yavaştır. / Jacobsen, Improved Quinn and Ligges methods significantly improved the FFT result by reducing the frequency error. The DIFM method is the most succesful against increasing SNR values, but it slower than interpolation methods.

Sonuç (Conclusion)

Hassas frekans kestirimi istenen gerçek zaman uygulamalarında DIFM, diğer taraftan daha hızlı hesaplama süresi gerektiren gerçek zamanlı uygulamalarda ise FFT tabanlı interpolasyon yöntemleri kullanılabilir. / DIFM can be used in real time applicaions where accurate frequenecy estimation is required, while FFT based interpolation methods can be used in real time applications that require faster computation time.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Elektronik Destek Sistemleri için Frekans Kestirim Yöntemlerinin Performans Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Gamze CABADAĞ^{1*}, Ömer KARAL¹,

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği ABD, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received: 10.03.2023 ; Kabul/Accepted : 08.05.2023 ; Erken Görünüm/Early View; 09.08.2024)

ÖZ

Elektronik harp sistemlerinde, tehdit radarının frekansının doğru olarak kestirimi radarın kimliklendirilmesi ve elektronik atak uygulanabilmesi için oldukça önemlidir. Hızlı Fourier dönüşümü (FFT) ve Sayısal anlık frekans kestirimi (DIFM) en yaygın kullanılan frekans kestirim yöntemleridir. Tehdit radarının ara frekans (IF) değeri FFT bin'lerinin tam katı değilse FFT yöntemi ile frekans kestirimi istenilen doğrulukta elde edilemez. Doğruluğu artırmak için genellikle FFT'nin çıkışına interpolasyon teknikleri uygulanır. DIFM yönteminde ise, sayısallaştırılmış I/Q sinyali belirli bir süre geciktirilip eşleniği alınır ve eşlenik ile orijinal I/Q sinyali çarpılarak faz hesaplanır. Bu çalışmada, Jacobsen, iyileştirilmiş Quinn ve Ligges interpolasyon teknikleri uygulanmış FFT yöntemi ile uygun gecikme süresi hesaplanmış DIFM yönteminin frekans kestirim performansları, işaret gürültü oranı (SNR) değiştirilerek Gauss gürültüsü altında kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, gerçek zamanlı sistemler için frekans kestiriminin hızlı olması oldukça önemli olduğu için FFT, FFT ve Jacobsen, FFT ve iyileştirilmiş Quinn, FFT ve Ligges ve DIFM frekans kestirim yöntemleri hesaplama zamanı açısından da karşılaştırılmıştır. Her bir yöntem için 100 adet Monte Carlo denemesi uygulanmış ve frekans kestirimindeki hata, ortalama hata kare kökü (RMSE) cinsinden sunulmuştur. Matlab ortamında gerçekleştirilen simülasyonların sonuçlarına göre FFT ve iyileştirilmiş Quinn yönteminin diğer iki interpolasyon yöntemine göre genellikle daha iyi frekans kestirimi yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, SNR seviyesi arttıkça DIFM yönteminin, Jacobsen, Ligges ve iyileştirilmiş Quinn interpolasyon yöntemleri ile kıyaslandığında daha iyi performansa (düşük RMSE değerine) sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Frekans kestirimi, interpolasyon yöntemleri, Jacobsen, Quinn, FFT, DIFM

Performance Analysis of Frequency Estimation Methods for Electronic Support Systems

ABSTRACT

In electronic warfare systems, accurate estimation of the threat radar frequency is so important for radar identification and electronic attack. Digital instantaneous frequency estimation (DIFM) and fast Fourier transform (FFT) are the most widely used frequency estimation methods. If the intermediate frequency (IF) value of the threat radar is not an exact multiple of the FFT bins, frequency estimation with the FFT method cannot be obtained with the desired accuracy. Interpolation techniques are often applied to the output of the FFT to improve accuracy. In the DIFM method, the digitized IF signal is delayed for a certain time and its conjugate is taken and phase is calculated by multiplying the conjugate with the original I/Q signal. In this study, the frequency estimation performances of the FFT technique that Jacobsen, Improved Quinn and Ligges interpolation techniques were applied and DIFM method with appropriate delay time extensively analyzed by changing the signal to noise ratio (SNR) under Gauss noise. Also, since fast frequency estimation is so important for real time systems, FFT, FFT and Jacobsen, FFT and improved Quinn, FFT and Ligges and DIFM frequency estimation methods were also compared in terms of computation time. For each method, one hundred Monte Carlo trials were applied and the error in the frequency estimation is presented in terms of the root mean square error (RMSE). According to the simulation results performed in the MATLAB environment, it has been observed that the FFT and the improved Quinn method generally provide better frequency estimation according to other two interpolation methods. In addition, as the SNR level increased, it was observed that the DIFM method had better performance (lower RMSE value) compared with Jacobsen, Ligges and improved Quinn interpolation methods.

Keywords: Frequency estimation, interpolation methods, Jacobsen, Quinn, FFT, DIFM

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

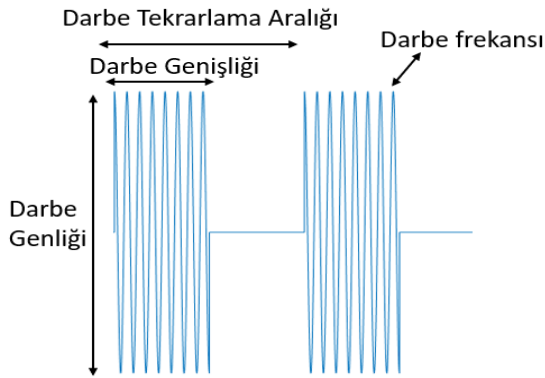
Günümüz dünyasında savaşlar artık elektronik harp boyutunda gerçekleşmektedir. Bundan dolayı son yıllarda elektronik harp sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda önemli bir artış gözlemlenmektedir [1-6]. Elektronik harp sistemleri, Elektronik Atak (Electronic Attack-EA), Elektronik Korunma (Electronic Protection-EP) ve Elektronik Destek (Electronic Support-ES) sistemleri olmak üzere 3 ana kategoriye ayrılır [7].

Elektronik atak sistemleri diğer adıyla Elektronik taarruz sistemleri de kendi arasında, tahribe yönelik taarruz ve tahrip etmeyen taarruz şeklinde ikiye ayrılabilir. Tahribe yönelik taarruzda yönlendirilmiş enerji silahı ya da anti radyasyon silahı gibi tahrip edici yöntemler kullanılırken, tahrip etmeyen elektronik taarruzda menzil kapısı çekme hız kapısı gibi çeşitli karıştırma ve aldatma teknikleri uygulanır [8]. EP sistemi, düşman tarafından gelecek elektronik harp aktivitelerine karşı elektronik harp

*Sorumlu Yazar:

e-posta : gamzecabadag@gmail.com

sistemini korumayı amaçlar. ES sistemleri, radar yayını yapmadan muhabere ortamını dinleyen pasif sistemlerdir. Bu sistemler, anten almına gelen radar sinyali ara frekans (IF) sinyaline dönüştürdükten sonra IF sinyali işleyerek gelen sinyalin darbe tanımlayıcı kelime (Pulse Descriptor Word-PDW) parametrelerini çıkarırlar. Darbe tanımlayıcı kelime; darbe geliş açısı, geliş zamanı, darbe frekansı, darbe genişliği ve darbe genliği olmak üzere 5 ana parametreden oluşur [9-10]. Bu 5 parametre tek bir darbe dizini için elde edilir ve darbe tekrarlama aralığı (Pulse Repeated Interval-PRI) bilgisi bu parametreleri kullanarak elde edilir. PDW parametreleri, Şekil 1 üzerinde gösterilmiştir [9].



Şekil 1. PDW parametreleri (PDW parameters)

Frekans kestirimi elektronik harp başta olmak üzere, biyomedikal mühendisliği [11] ve inşaat mühendisliği uygulamalarında da önem arz etmektedir [12]. Elektronik destek sistemlerinde, tehdit radarının frekansının bulunması, PDW çıkarımı ve darbe ayrıştırma için çok önemlidir. Literatürde, frekans parametresinin çıkarımında hızlı Fourier dönüşümü (FFT), Çoklu Sinyal Sınıflandırma (MUSIC), Dönel Değişmezlik Teknikleri Aracılığıyla Sinyal Parametrelerinin Tahmini (ESPRIT) ve sayısal anlık frekans ölçümü (DIFM) gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. DIFM ve FFT yöntemleri, diğer yöntemlere göre daha az işlem yükü ve hassas frekans kestirimi gibi özelliklerinden dolayı tehdit radarının frekans kestirimi için literatürde sıklıkla tercih edilmektedir [13].

DIFM yönteminde, I/Q (In phase-Quadrature) sinyali belirli bir süre geciktirilip eşleniği alınır ve eşlenik ile orjinal sinyal çarpılarak faz hesaplanır. Fazın türevinden radyal frekans elde edildiği için optimum gecikme süresini hesaplamak frekansın doğru olarak kestirilmesi için önemlidir. DIFM yöntemi ile frekans hesabı için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Herselman ve ark. [14] analog IFM (AIFM) ve DIFM yöntemlerini ayrıntılı olarak tanıtmış ve DIFM yöntemini donanımsal olarak gerçekleyerek optimum gecikme süresini hesaplamıştır. Ayrıca, DIFM yönteminin sıcaklık değişimlerinden etkilenmediği ve periyodik kalibrasyon gerektirmediği sonucuna ulaşmışlardır.

Darvin ve ark. [15], birden fazla gecikme hattı kullanan otokorelasyon temelli bir DIFM algoritması sunmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen algoritma saat titreşimlerinden etkilenmeden farklı sinyal gürültü oranı (Signal to noise ratio-SNR) seviyelerinde ve bant genişliklerinde başarılı sonuçlar verebilmektedir. Niranjan ve Naik [16], darbe zarfı çıkarmak yerine PDW için I/Q yöntemi kullanan bir algoritmayı donanımsal olarak Virtex FPGA'de uygulamıştır. Adaptif gürültü seviyesi belirleme tekniği ile sinyalin varlığı tespit edildikten sonra DIFM ile frekans kestirimi yapılmış ve sırasıyla kalan PDW parametreleri çıkarılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen yöntemin geleneksel yöntemle göre daha fazla darbe genişliği, darbe tekrarlama aralığı ve frekans hassasiyeti ile parametre çıkarımı yaptığı görülmüştür. Kvachev ve ark. [17], iki gecikme hattı kullanan bir DIFM alıcısı tasarlamıştır. Simülasyon sonuçlarından birden fazla gecikme hattı kullanılarak alıcının çalıştığı bant genişliğini daraltmadan alıcının frekans çözünürlüğünün ve hassasiyetinin artırılabilceği görülmüştür.

Sree ve ark. [18], DIFM alıcısının hassasiyetini artırmayı amaçlamıştır. Radar alıcısının hassasiyetinin belirlenmesinde gürültü eşiğinin doğru ayarlanması çok önemlidir. Yüksek gürültü seviyesi, bazı tehdit sinyallerinin algılanmamasına neden olurken, düşük gürültü seviyesi, tehdit oluşturmeyen sinyallerin parametrelerinin çıkarılmasına neden olur. Alıcı hassasiyetini artırmak için gürültü bastırma ile birlikte dört gecikme hattı kullanan bir DIFM yapısı tasarlamışlar ve tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir.

FFT, bir zaman domenini sinyali eşdeğer frekans domenine dönüştürmek için kullanılan Ayrık Fourier Dönüşüm tabanlı bir algoritmadır. Frekans çözünürlüğü, her ayırık bölme (bin) arasındaki frekans farkıdır ve bu nedenle FFT ile frekans kestiriminde sonuçların ne kadar kesin olabileceği konusunda bir sınır belirler. Frekans çözünürlüğü, örnekleme frekansının FFT boyutuna oranıdır. Tehdit radarının IF frekansı, FFT çözünürlüğünün tam katı değilse, frekans doğru bir şekilde tahmin edilemez. FFT örneklerinin sayısı (boyutu) artırılarak frekans çözünürlüğü iyileştirilebilir, ancak daha fazla donanım kaynağı tüketmesi ve işlem gerektirmesi nedeniyle genellikle tercih edilmez. Bu nedenle, FFT sonucunun frekans çözünürlüğünü iyileştirmek için literatürde çeşitli interpolasyon yöntemleri önerilmiştir. Örneğin; Gasior ve ark. [19] Parabolik ve Gauss interpolasyon yöntemlerini kullanarak FFT sonucunu iyileştirmişlerdir. Ayrıca, spektral sızıntıyı azaltmak için FFT'yi hesaplamadan önce sinyali zaman alanında Gaussian, Blackman, Blackman-Harris ve Nuttall gibi farklı pencerelerle çarpırlar. Simülasyon sonuçlarına göre Gauss interpolasyon yönteminin Parabolik interpolasyon yöntemine göre daha düşük hata oranına sahip olduğu ve Gauss penceresi uygulandığında her iki yöntemin de hata oranının düştüğü gözlemlenmiştir.

Ligges [20] doktora tezinde yeni bir interpolasyon yöntemi önermiştir. Ayrıca, önerdiği yöntem ve

yöntemin iyileştirilmiş halinin performansını kıyaslamıştır. Bischl and Bigges [21] çalışmalarında Ligges'in yöntemini, yöntemin iyileştirilmiş halini, Quinn'e ait 1. İnterpolasyon yöntemini ve Jacobsen yönteminin performansını karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, Ligges algoritmalarının en yüksek hata oranına sahip olduğunu, Jacobsen ve Quinn yöntemlerinin ise yaklaşık aynı hata oranına sahip olduklarını gözlemlemişlerdir.

Iglesias [22], gelen sinyale sıfır doldurma (zero padding) uyguladı ve FFT'yi hesapladı, ardından Parabolik interpolasyon tekniğini uyguladı. Yapılan işlemler sonucunda elde edilen frekans FFT sonucu ile karşılaştırıldığında hata oranının düştüğü görülmüştür.

Literatürde mevcut interpolasyon yöntemlerinin performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Örneğin, Minda ve ark. Jain interpolasyon yönteminde bazı değişiklikler yaparak "iyileştirilmiş Jain interpolasyonu" yöntemini önerdi [23]. Simülasyon sonuçlarına göre iyileştirilmiş Jain interpolasyon yöntemi Jain interpolasyon yöntemine göre genellikle daha iyi bir performansa ortaya koymuştur. İyileştirilmiş Jain yönteminin Quinn, Voglewede, Jain, Ding ve Jacobsen yöntemleri ile karşılaştırıldığı bir başka çalışmada [24] ise "iyileştirilmiş Jain" ile Quinn yöntemlerinin seçilen zaman aralığına göre en düşük hata oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Quinn yöntemini öneren araştırmacı bir başka çalışmada [25], Quinn yönteminin 1. frekans kestiricisine bazı eklemeler yaparak 2. frekans kestiricisini ya da diğer adıyla "İyileştirilmiş Quinn" yöntemini elde etmiştir. Koç [26], Quinn ve iyileştirilmiş Quinn interpolasyon yöntemlerini incelemiş ve iyileştirilmiş Quinn yönteminin daha yüksek işlem yüküne sahip olmasına rağmen daha düşük hata oranıyla frekans kestirimi sağladığı sonucuna varmıştır.

Candan [27], Jacobsen yöntemini kullanarak "bias düzeltmeli Jacobsen" adlı yeni bir interpolasyon yöntemi önermiş ve performansını Parabolik, Quinn, Macleod, Jacobsen interpolasyon yöntemleri ile karşılaştırmıştır. Simülasyon sonuçlarından, FFT örnek sayısının 8 olduğu ve gürültünün olmadığı durumda, geliştirilen "bias düzeltmeli Jacobsen" yönteminin en düşük biasa sahip olduğu, parabolik interpolasyon yönteminin ise en yüksek biasa sahip olduğu görülmüştür. Quinn, Macleod ve Jacobsen yöntemlerinin ise aynı bias değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. FFT örnek sayısının büyük olduğu durumlarda Jacobsen ve "bias düzeltmeli Jacobsen" interpolasyon yöntemlerinin performansının aynı olacağı ancak "bias düzeltmeli Jacobsen" in yüksek SNR değerlerinde daha kullanışlı olabileceği sonucuna varılmıştır. Candan bir diğer çalışmada [28], "bias düzeltmeli Jacobsen" yöntemi üzerinde detaylı bir analiz gerçekleştirmiş ve bias etkisini azaltacak ilave bir adım eklemiştir. Eklenen ilave adım ile yüksek SNR seviyelerinde performansın arttığı görülmüştür.

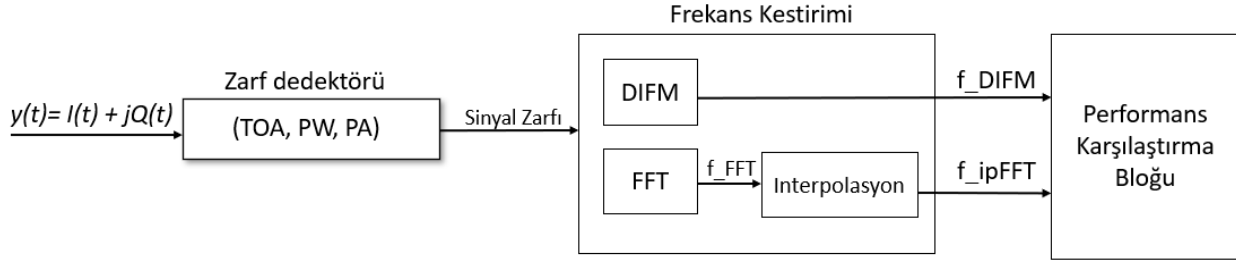
Literatürdeki güncel çalışmalardan da görüleceği üzere tehdit radarının frekans kestiriminde FFT ile farklı interpolasyon yöntemlerinin kullanılmasına ek olarak doğrudan DIFM yöntemi de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, DIFM ile FFT'yi kullanan interpolasyon yöntemlerinin farklı gürültü seviyeleri altında ortaya koydukları performanslarının hem zaman hem de doğruluk açısından kapsamlı bir analizine rastlanmamıştır. Bu çalışmada, radar almacına gelen elektronik tehdidin frekans kestirimi FFT, FFT ve Jacobsen, FFT ve iyileştirilmiş Quinn, FFT ve Ligges yöntemleri ile DIFM yöntemi kullanılarak kapsamlı bir şekilde analizi sunulmaktadır. Kapsamlı literatür taraması sonucunda FFT'den sonra uygulanan Jacobsen ve iyileştirilmiş Quinn yöntemlerinin diğerlerine göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Ligges yöntemini de inceleyen çok fazla çalışma olmadığı için çalışmamızda bu 3 yöntem tercih edilmiştir.

Karşılaştırılan yöntemlerin performansları, farklı SNR seviyelerindeki Gauss gürültüleri ile 100 adet Monte Carlo denemesi yapılarak RMSE kriterine baz alınarak belirlenmektedir. Ayrıca, söz konusu yöntemler hesaplama zamanı açısından da analiz edilmektedir.

Çalışmanın geri kalan kısmı aşağıdaki gibidir. İkinci bölüm olan materyal metot kısmında DIFM, FFT, Jacobsen, iyileştirilmiş Quinn, Ligges interpolasyon yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Bölüm 3'de simülasyon sonuçları ve bu sonuçların detaylı analizleri paylaşılmıştır. Sonuç bölümünde ise yapılan çalışma ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca, gelecekte yapılacak çalışmalardan bahsedilmiştir.

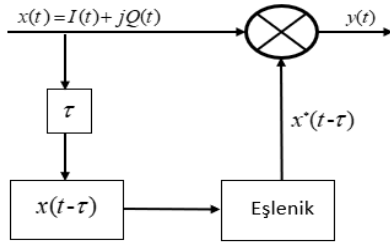
2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

Radar almacına gelen sinyal, radar ön yüzünde işlenip IF sinyaline dönüştürüldükten sonra, yüksek örnekleme hızına sahip bir analog sayısal dönüştürücü ile sayısallaştırılır ve I/Q formatında sayısal data elde edilir. Öncelikle sayısallaştırılmış I/Q sinyalinin, zarf dedektörü aracılığıyla zarfı çıkarılır ve zarfı çıkarılan sinyalin bir gürültü sinyali olup olmadığının tespiti yapılır. Sinyalin zarfı gürültü seviyesi için belirlenen eşik değerini geçiyorsa ortamda bir tehdit radarı olduğu anlaşılır ve tehdit parametrelerinin çıkartımı yapılır [13]. Zarf dedektörü aracılığıyla zaman parametreleri (darbe geliş zamanı, darbe genliği, darbe genişliği) hesaplanır. Aynı zamanda radarın frekansı ve geliş açısı parametrelerinin çıkarımında kullanılacak olan sinyal zarfı bilgisi de zarf dedektörü bloğunda elde edilir. Sinyal zarfı bilgisi kullanılarak frekans kestirim yöntemi uygulanır ve frekans parametresi hesaplanır. Frekans kestiriminin blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu çalışmada frekans kestirimi için DIFM ve FFT yöntemleri kullanılır. FFT'nin sonucunun iyileştirilmesi için Jacobsen Quinn'in 2. Frekans kestirimci interpolasyon yöntemi ve Ligges yöntemi kullanılır.



Şekil 2. Frekans kestirimi blok diyagramı (Frequency estimation block diagram)

2.1. Sayısal Anlık Frekans Ölçümü (Digital Instantaneous Frequency Measurement)



Şekil 3. DIFM blok diyagramı (DIFM block diagram)

Şekil 3’den görüleceği üzere, DIFM yönteminde, sayısallaştırılmış I/Q sinyali belirli bir süre geciktirilip (tao) eşleniği alınır ve orjinal I/Q sinyali çarpılır. Çarpım sonucunda, ters tanjant bloğu ya da Matlab “angle” fonksiyonu kullanılarak faz bilgisi hesaplanır ve fazın türevinden radyal frekans elde edilir (1). Radyal frekanstan anlık frekansın elde edilmesi (2)’de gösterilmiştir.

$$w(t) = 2\pi f(t) = \frac{d\phi(t)}{d(t)} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{d(t)} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{\tau} \quad (2)$$

DIFM yönteminde, optimum gecikme süresini hesaplamak frekansın doğru olarak tahmin edilebilmesi için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, f_{0max} kestirimi yapılacak maksimum frekansını temsil etmek üzere, Herselman ve arkadaşlarının çalışmasındaki [14] optimum gecikme süresi formülü (3) ile hesaplanır.

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{0(max)}} \arccos(-1) = \frac{1}{2\pi f_{0(max)}} (1+2n)\pi, \quad n=0$$

$$= \frac{1}{2 f_{0(max)}} \quad (3)$$

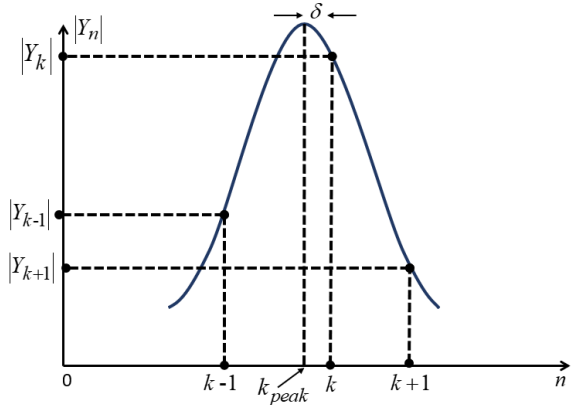
2.2. Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)

FFT elektronik destek sistemlerinde en yaygın kullanılan frekans kestirim yöntemlerindendir. Sayısallaştırılmış ve örneklenmiş bir sinüs dizisi $y[n]$ (4)’deki gibi gösterilebilir. Y genliği, f_0 is sinyalin frekansını, f_s is

örnekleme frekansını, N FFT örnek sayısını ve n örnek indeksini temsil etmektedir. FFT hesabında frekans çözünürlüğü, örnekleme frekansının FFT örnek sayısına bölünmesi ile elde edilir (5). FFT frekans spektrumu Şekil 4’de gösterilmiştir [24].

$$y[n] = Y \exp \left[j 2\pi \frac{f_0}{f_s} n \right], \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (5)$$



Şekil 4. FFT frekans spektrumu (FFT frequency spectrum)

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad Y_k = \text{Re } Y_k + j \text{Im } Y_k \quad (6)$$

$$\text{Re } Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] \cos\left(\frac{2\pi}{N}nk\right) \quad (7)$$

$$\text{Im } Y_k = - \sum_{n=0}^{N-1} y[n] \sin\left(\frac{2\pi}{N}nk\right)$$

$$Y_k = \text{Re } Y_k + \text{Im } Y \quad (8)$$

$$|Y_k| = \sqrt{(\text{Re } Y_k)^2 + (\text{Im } Y_k)^2} \quad (9)$$

FFT ile frekans hesaplanabilmesi için sırasıyla 6-9 arasındaki formüller ile frekans binlerine ait genlikler hesaplanır. Daha sonra bu genlikler sıralandığında en yüksek genliğe sahip olan binin indeks numarası ve frekans çözünürlüğü çarpılarak frekans sonucu elde edilir (10).

$$f_c = k\Delta f \quad (10)$$

Elektronik destek sistemlerinde, tehdit radarının IF frekansı FFT çözünürlüğünün tam katı olmadığı durumlarda, frekans doğru bir şekilde bulunamaz. Frekans çözünürlüğü, FFT örnek sayısını artırarak iyileştirilebilir ama daha fazla donanım kaynağı tüketileceği ve işlem gerektireceği için genellikle tercih edilmez. Bu nedenle, interpolasyon yöntemleri kullanılarak FFT sonucunda elde edilen frekans değeri iyileştirilebilmektedir. İnterpolasyon yöntemleri kullanılarak düzeltme katsayısı (δ) hesaplanır ve (11)'de gösterildiği gibi bu katsayısı en yüksek genliğe sahip frekans bininin indeks numarası ile toplanır ve frekans çözünürlüğü ile çarpılarak iyileştirilmiş frekans değeri elde edilir.

$$f_c = (k + \delta)\Delta f \quad (11)$$

İnterpolasyon yöntemlerinin ortak amacı FFT sonucunda hesaplanan frekansı değerini iyileştirmektir. Genellikle, bu iyileştirme düzeltme katsayısının hesaplanmasında kullanılan farklı yaklaşımlarla gerçekleştirilir. Örneğin; Jacobsen ve Macleod interpolasyon yöntemlerinde Y_k değeri ve bunun 2 komşu (bir önceki ve sonraki) değeri düzeltme katsayısı hesaplanmasında kullanılırken, Quinn ve iyileştirilmiş Quinn yöntemlerinde ise Y_k değeri ve sadece 1 komşu değeri kullanılır. Ayrıca, Jacobsen, Macleod, Quinn ve iyileştirilmiş Quinn yöntemleri düzeltme katsayısı hesaplanırken Y_k değerinin sadece gerçek kısmının büyüklüğünü kullanırken, Jain, Ding ve Voglewede gibi yöntemler ise Y_k 'nin sanal kısımlarının büyüklüğünü de kullanmaktadır.

Gerçekleştirilen literatür taramasından, Jacobsen ve İyileştirilmiş Quinn yöntemlerinin performansının diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğu ve Ligges yönteminin detaylı bir analizinin yapılmadığı görülmüştür. Bundan dolayı, FFT sonucunda hesaplanan frekans değerini iyileştirmek için bu çalışmada da söz konusu 3 interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen frekans değerleri, DIFM yöntemiyle hesaplanan frekans değeriyle karşılaştırılmış ve hata oranları hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan iyileştirilmiş Jacobsen yönteminin [30] formülü Tablo 1'de, Quinn yönteminin formülü[25] Tablo 2'de ve Ligges yönteminin formülü[26] Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 1. Jacobsen interpolasyon yönteminin formülü (Formula of Jacobsen interpolation method)

$$\delta = \text{real} \left\{ \frac{Y_{[k-1]} - Y_{[k+1]}}{2Y_{[k]} - Y_{[k-1]} - Y_{[k+1]}} \right\}, \quad f_{\text{jacobsen}} = \frac{f_s}{N} (k + \delta)$$

Tablo 2. İyileştirilmiş Quinn interpolasyon yönteminin formülü (Formula of the improved Quinn interpolation method)

$$\begin{aligned} 1. \quad a_1 &= \text{real} \left\{ \frac{Y_{[k-1]}}{Y_{[k]}} \right\} & a_2 &= \text{real} \left\{ \frac{Y_{[k+1]}}{Y_{[k]}} \right\} \\ 2. \quad \delta_1 &= \frac{a_1}{1 - a_1} & \text{and } \delta_2 &= \frac{-a_2}{1 - a_2} \\ 3. \quad \delta &= \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - K(\delta_1^2) + K(\delta_2^2) \\ 4. \quad K(x) &= \frac{1}{4} \log(3x^2 + 6x + 1) - \frac{\sqrt{6}}{24} \log \left(\frac{x+1 - \frac{\sqrt{2}}{3}}{x+1 + \frac{\sqrt{2}}{3}} \right) \\ 5. \quad f_{\text{imp_quinn}} &= \frac{f_s}{N} (k + \delta) \end{aligned}$$

Tablo 3. Ligges interpolasyon yönteminin formülü (Formula of the Ligges interpolation method)

$$\delta = \frac{Y_{[k+1]} - Y_{[k-1]}}{2(2Y_{[k]} - Y_{[k-1]} - Y_{[k+1]})}, \quad f_{\text{Ligges}} = \frac{f_s}{N} (k + \delta)$$

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI ve ANALİZLER (SIMULATION RESULT and ANALYSIS)

Bu bölümde, iyileştirilmiş Quinn, Jacobsen ve Ligges interpolasyon yöntemleri uygulanmış FFT ile DIFM yöntemlerinin performansı, Gauss gürültüsü altında farklı SNR seviyelerinde analiz edilmiştir. Gerçek zamanlı bir elektronik destek sistemi olan Radar ikaz alıcısı (Radar Warning Receiver-RWR) sistemlerinde frekansın doğru olarak kestirilmesi kadar hızlı kestirilmesi de önemli olduğu için söz konusu yöntemler hesaplama zamanı açısından da karşılaştırılmıştır.

3.1. Frekans Kestirimi Doğruluğu Değerlendirme Kriteri (Frequency Estimation Accuracy Evaluation Criteria)

RMSE, kestirilen değer gerçek değere uzaklığını Euclidean uzaklığını kullanarak gösteren ve literatürde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [31-32]. RMSE (14)'de gösterildiği gibi, hesaplanır ve 'a' gerçek değeri, 'â' tahmin edilen değeri, 'N' örnek sayısını gösterir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (a(i) - \hat{a}(i))^2}{N}} \quad (14)$$

Bu çalışmada her bir yöntem için 100 adet Monte Carlo denemesi uygulanmış ve frekans kestirimindeki hatalar RMSE cinsinden paylaşılmıştır. Simülasyonlar Matlab 2019a ortamında yapılmıştır

3.2. Frekans Kestirim Yöntemleri RMSE Sonuçları ve Analizi (Frequency Estimation Methods RMSE Results and Analysis)

Tehdit radarının frekans parametresi çıkarılmadan önce zarf dedektörü ile gelen darbenin zarfı çıkarılarak darbe zarfından PW değeri elde edilir. PW uzunluğunun frekans kestirim yöntemlerine etkisini analiz edebilmek için, bu çalışmada kısa ve uzun PW değerine sahip 2 adet darbe sinyali incelenmiştir. Bir radar alıcısında tehdit radarına ait PW, TOA, RF ve PA parametrelerinin çıkartılabilmesi için en az 14-18dB SNR seviyesi gereklidir [13]. Bundan çalışmamızda 10dB SNR seviyesinin altındaki değerler incelenmemiştir. Analizlerde kullanılan radar parametre listesi Tablo 4'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4. Radar parametre listesi (Radar parameter list)

Darbe genişliği (PW)	[0.2, 1.2] us
Darbe tekrarlama aralığı	[2 12] us
Frekans	250MHz
Örnekleme Frekansı	2.5GHz
FFT uzunluğu	256
SNR	[10 15 20 25] dB

Sırasıyla kısa darbeler (0.2us) için kestirim hataları (RMSE cinsinden) Tablo 5'de listelenirken uzun darbeler (1.2us) için Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kısa darbeler için frekans kestirim hataları (Frequency estimation errors for short pulses)

Gerçekleme (RMSE-MHz)					
SNR (dB)	FFT	Quinn 2.	Jacobsen	Ligges	DIFM
10	3.906	0.0733	0.0709	1.876	0.0828
15	3.906	0.0672	0.0764	1.871	0.0479
20	3.906	0.0676	0.0737	1.873	0.0232
25	3.906	0.0667	0.0744	1.871	0.0005

Tablo 5'den görüleceği üzere analiz için seçilen 250MHz IF frekansı FFT bin'lerinin tam katı olmadığı için en yakın FFT binine düşmüştür ve RMSE değeri 3.906MHz olarak hesaplanmıştır. FFT sonucunda frekans binlerinin güçleri sıralanıp en yüksek güce sahip binin frekans değeri, tahmini frekans sonucunu verdiği için FFT değeri

SNR seviyesinin değişiminden gözle görülür şekilde etkilenmemiştir. FFT sonucunda oluşan 3.906MHz RMSE hata oranını azaltmak için iyileştirilmiş Quinn, Ligges ve Jacobsen interpolasyon yöntemleri uygulanmıştır.

Tablo 5'den görüldüğü üzere, 10dB SNR seviyesindeki gürültü hariç iyileştirilmiş Quinn yöntemi Jacobsen yöntemine göre kısa darbelerde daha düşük hata oranıyla frekans kestirimi yapmaktadır. Ligges yöntemi Quinn ve Jacobsen yöntemleri kadar başarılı olmasa da, FFT sonucu ile kıyaslandığında hata oranını azalttığı görülmektedir. Ayrıca, DIFM yönteminin 10dB SNR seviyesi hariç diğer SNR seviyelerinde, FFT çıkışına uygulanan interpolasyon yöntemlerine göre, daha başarılı performans gösterdiği görülmektedir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir: 10 dB gibi düşük SNR seviyelerindeki kısa süreli darbelerde FFT ile birlikte Jacobsen yöntemi, SNR seviyesi arttıkça ise DIFM yöntemi tercih edilebilir.

Tablo 6. Uzun darbeler için frekans kestirim hataları (Frequency estimation errors for long pulses)

Gerçekleme (RMSE-MHz)					
SNR (dB)	FFT	Quinn 2.	Jacobsen	Ligges	DIFM
10	3.906	0.0668	0.0834	2.116	0.0820
15	3.906	0.0656	0.0812	2.127	0.0589
20	3.906	0.0672	0.0683	2.131	0.0232
25	3.906	0.0639	0.0801	2.130	0.0165

Uzun darbeler için frekans kestirim hatalarının sunulduğu Tablo 6 incelediğinde, iyileştirilmiş Quinn'in tüm SNR seviyelerinde Jacobsen ve Ligges yöntemlerinden daha düşük hata oranına sahip olduğu görülmektedir. Kısa darbeler de olduğu gibi uzun darbelerde de DIFM yöntemi 10dB SNR seviyesindeki gürültü hariç diğer gürültü seviyelerinde en düşük hata oranına sahip yöntemdir ve Ligges yöntemi en yüksek hata oranına sahip interpolasyon yöntemidir.

Tablo 5 ve Tablo 6 analiz edildiğinde, SNR seviyesi düştükçe DIFM yönteminin performansı azalırken FFT yönteminin performansının SNR seviyesinden pek etkilenmediği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan SNR seviyesi arttıkça DIFM yönteminin hata oranı FFT'ye göre önemli ölçüde azalmaktadır. Bu sonuçlar çalışma [29] ile de uyumludur. FFT sonucuna Jacobsen ve iyileştirilmiş Quinn interpolasyon yöntemleri uygulanarak FFT'nin frekans kestirimi önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Ligges yöntemi sonucu önemli ölçüde değiştirmese de, FFT sonucundaki hata oranını düşürmüştür. Gerçek zamanlı elektronik destek sistemlerinde frekansın doğru olarak kestirilmesi kadar hızlı kestirilmesi de önemli olduğu için çalışma [29]'dan

farklı olarak bu çalışmada söz konusu yöntemler hesaplama zamanı açısından da karşılaştırılmaktadır.

3.3. Frekans Kestirim Yöntemleri Frekans Hesaplama Zamanları Analizi (Frequency Estimation methods Calculation Time Analysis)

Frekansın ne kadar hızlı tahmin edildiğini gözlemlemek adına, DIFM, FFT, FFT ve Jacobsen, FFT ve iyileştirilmiş Quinn, FFT ve Ligges yöntemlerin frekans kestirim süreleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7’de gösterilmiştir. Tablo 7’ye göre en hızlı hesaplama yöntemi FFT’dir (3.431ms). FFT ve Jacobsen yöntemi 4.034ms ile en hızlı ikinci yöntem iken, FFT ve Ligges yönteminin hesaplama süresi de Jacobsen FFT ve Jacobsen yöntemine oldukça yakındır. FFT ve iyileştirilmiş Quinn yöntemi Jacobsen yönteminden 0.403msn daha yavaş hesaplama yapmıştır. DIFM ise 55.24ms ile en yavaş frekans kestirimi yapan yöntemdir.

Tablo 7. Yöntemlerin frekans hesaplama zamanları (Frequency calculation times of methods)

Yöntem	Hesaplama Zamanı (msn)
FFT	3.431
FFT ve iyileştirilmiş Quinn	4.437
FFT ve Jacobsen	4.034
FFT ve Ligges	4.043
DIFM	55.24

RWR ve Elektronik İstihbarat (Electronic Intelligence-ELINT) sistemleri elektronik destek sağlayan sistemlerdir. RWR’lar radar yayınlarını tespit eder, PDW çıkarımı ve tehdit radarının kimliklendirilmesinden sonra bir tehdit radarına ait olabilecek sinyal hakkında pilota anında uyarı verir. Bu nedenle, bu sistemler gerçek zamanlı çalışmalıdır ve hızlı reaksiyon verebilmelidir. FFT ve Jacobsen, FFT ve Ligges ve FFT ve İyileştirilmiş Quinn yöntemleri DIFM yöntemine göre daha hızlı frekans kestirimi yapabildiği için RWR’da tercih edilebilir [13].

ELINT sistemler ise, barış zamanında tehdit unsuru oluşturma olasılığı olan elektronik harp sistemlerinden yayılan sinyallerin parametrelerini RWR sistemlerine göre daha ayrıntılı analiz yaptıkları için yüksek doğruluk oranıyla çalışırlar. Bu sistemler gerçek zamanlı sistemler olmadığı için ve yüksek doğruluk oranını hedeflediği için frekans kestiriminde diğer yöntemlere göre daha yavaş hesaplama yapan ama daha düşük hata oranına sahip olan DIFM yöntemini kullanabilirler [8].

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Tehdit radarının kimliklendirilebilmesi ve gerekli olduğu durumlarda elektronik atak uygulanabilmesi için tehdidin darbe tanımlayıcı kelimesinin çıkarılması gerekir. Darbe tanımlayıcı kelimesinin en önemli parametrelerinden biri de tehdit radarının frekansıdır. Frekans kestirimi için

literatürde en yaygın kullanılan 2 yöntem FFT ve DIFM frekans kestirim yöntemleridir. FFT yönteminde, eğer tehdit radarının IF frekansı FFT frekans çözünürlüğünün tam katı değilse, frekans doğru şekilde hesaplanamaz. FFT sonucunda elde edilen frekansı iyileştirmek için literatürde çeşitli interpolasyon teknikleri mevcuttur. Bunlar arasında, Jacobsen ve İyileştirilmiş Quinn interpolasyon yöntemleri başarılı performans gösterdikleri, Ligges yöntemi ise literatürde detaylı analiz edilmediği için bu çalışmada kapsamında FFT ile hesaplanan frekans değerinin iyileştirilmesinde detaylı olarak analiz edilmiştir. DIFM yönteminde, I/Q sinyali belirli bir süre geciktirilip eşleniği alındıktan sonra, elde edilen eşlenik orijinal I/Q sinyali çarpılarak faz hesaplanır. Fazın türevinden radyal frekans ve radyal frekansın gecikme süresine oranıyla da anlık frekans bilgisi elde edilir. Gecikme süresinin frekansın doğru kestirimine etkisi olduğu için, önce uygun gecikme süresi hesaplanmıştır ve daha sonra DIFM yöntemi ile frekans kestirimi yapılmıştır. DIFM ile hesaplanan frekans ve Jacobsen, Quinn’in 2. frekans kestirimi yöntemi, Ligges yöntemi ile iyileştirilmiş FFT sonucu, RMSE ve yöntemlerin hesaplama zamanına göre detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, DIFM yöntemi SNR seviyesi arttıkça interpolasyon ile iyileştirilmiş FFT sonucuna göre daha düşük hata oranıyla frekans kestirimi yapabilmektedir, ancak bu yöntem interpolasyon yöntemlerine göre daha yavaştır. Gerçek zamanlı ve hesaplama hızının önemli olduğu RWR sistemlerinde FFT ve Jacobsen yöntemi, gerçek zamanlı olmayan ve daha yüksek hassasiyetle ölçüm yapması gereken ELINT sistemlerde ise DIFM yöntemi tercih edilebilir.

Sonraki çalışmamızda, frekans kestirim yöntemlerini FPGA üzerinde gerçekleştirilmesi ve kaynak kullanımının karşılaştırılması ve önereceğimiz interpolasyon yöntemi ile DIFM yönteminin performansının karşılaştırılması hedeflenmektedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Gamze CABADAĞ: Deneyleri gerçekleştirmiştir ve makalenin yazımına katkıda bulunmuştur.

Ömer KARAL: Deney sonuçlarını analiz etmiştir, makalenin yazımına katkı sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] Arık, D. T., Karal, Ö., & Şahin, A. B., "A Comparative Study of Artificial Neural Networks and Naïve Bayes Techniques for the Classification of Radar Targets", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(4), 1779-1788, (2020).
- [2] Cabadağ, G., & Karal, Ö., "Analysis of Prony's and Pisarenko Frequency Estimation Methods at Different Bandwidths, Different Noise And Variances", *30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* pp. 1-4, (2022).
- [3] Muslu, E.A., Karal, Ö., "Mathematical Modeling of Threats in Electronic Warfare Systems", *29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* p. 1-4, (2021).
- [4] Yildinm, S. A., Orduyılmaz, A., Serin, M., & Yildmm, A. "Multitab digital instantaneous frequency measurement receiver", *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, p.1-4, (2017).
- [5] Arık, D.T; Şahin,A.B.," Target classification with FMCW radar using features extracted from Fourier transform of radar cross section", *27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* p. 1-4, (2017).
- [6] İleri K. Tezel, N. S. "The Impact of Channel Errors in Passive Coherent Location Radar using FM Base Stations", *Politeknik Dergisi*, 25(2), 503-511, (2020).
- [7] Tsui, J.B. "Special design topics in digital wideband receivers", *Artech House*, p.21, (2010).
- [8] Wiley, R. G. , "ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals", *Artech House Radar Library*, (2006).
- [9] Gençol, K., "A two-stage deinterleaving technique for clustering of radar pulses", *25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* , pp. 1-4, (2017).
- [10] Center, Naval Air Warfare. "Electronic warfare and radar Systems engineering hangbook.", *Electronic Warfare Division, Pont Mugu*, CA, (1997).
- [11] Tuncer, E., Bolat, E. D, "Destek Vektör Makinaları ile EEG Sinyallerinden Epileptik Nöbet Sınıflandırması", *Politeknik Dergisi*, 1-1.(2021).
- [12] Ahmed, M. Y., Keskin, İ., "A simulation on soil structure interaction with ABAQUS; effect on the behavior of a concrete building of soil layers and earthquake properties", *Politeknik Dergisi*, 1-1, (2023).
- [13] Ortatatlı, İ.E., "Elektronik destek sistemlerinde gerçek zamanlı tehdit radar parametreleri çıkarımı", *Master's Thesis TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi*, (2017).
- [14] Herselman, P. L., & Cilliers, J. E. A., "Digital instantaneous frequency measurement technique using high-speed analogue-to-digital converters and field programmable gate arrays: the csir at 60", *South African Journal of Science*, 102(7): 345-348, (2006).
- [15] Darwin, R. C., Paranjape, H., Mohanan, S. K., Elango, V., "Analysis of autocorrelation based frequency measurement algorithm for IFM receivers", *IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECT)*, 1-6, (2014).
- [16] Niranjan, R. K., & Naik, B. R., "FPGA based implementation of pulse parameters measurement", *IEEE Science and Information Conference*, 862-867, (2014).
- [17] Kvachev, M. A., Puzyrev, P. I., & Semenov, K. V., "Research of Instantaneous Frequency Measurement Receiver", *IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) Conference*, 1-5, (2020).
- [18] Sree, A.R., Rao, T.V., "Sensitivity Enhancement in Digital Instantaneous Frequency Measurement", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3.9, (2014).
- [19] Gasior, M., & Gonzalez, J. L. "Improving FFT frequency measurement resolution by parabolic and Gaussian spectrum interpolation", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 732, No. 1, pp. 276-285, (2004).
- [20] Ligges U., "Transkription monophoner Gesangszeitreihen", *Ph.D. Thesis*, Faculty of Statistics, TU of Dortmund, Germany, (2006).
- [21] Bischl, B., Ligges, U., & Weihs, C., "Frequency estimation by DFT interpolation: A comparison of methods", *Technical Report*, (2009).
- [22] Iglesias, V., Grajal, J., Yeste-Ojeda, O., Garrido, M., Sánchez, M. A., López-Vallejo, M., "Real-time radar pulse parameter extractor", *IEEE Radar Conference* 0371-0375, (2014).
- [23] Minda, A. A., Lupu, D., Gillich, G. R. "Improvement of Jain's algorithm for frequency estimation". *Studia Universitatis Babes-Bolyai Engineering*, 65(1), (2020).
- [24] Minda, A. A., Barbinitia, C. I., & Gillich, G. R. A. "A review of Interpolation Methods Used for Frequency Estimation" *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 17(1), 21-26, (2020).
- [25] Quinn, B. G., "Estimating frequency by interpolation using Fourier coefficients", *IEEE transactions on Signal Processing*, 42(5): 1264-1268, (1994).
- [26] Koç, M., "Bazı Ayırık Fourier Dönüşümüne Dayalı Frekans Kestiricilerin Karşılaştırmalı Performans Analizi", *Yüksek lisans tezi*, Uludağ Üniversitesi, Bursa, (2021).
- [27] Candan, Ç. "A method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples", *IEEE Signal processing letters*, 18(6), 351-354, (2011).
- [28] Candan, Ç. "Analysis and further improvement of fine resolution frequency estimation method from three DFT samples", *IEEE Signal Processing Letters*, 20(9), 913-916, (2013).
- [29] Ortatatlı, İ.E, et al. Real-time frequency parameter extraction for electronic support systems, *"IEEE 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)"*, 105-108, (2016).
- [30] Jacobsen, E., Kootsookos, P. "Fast, accurate frequency estimators", *DSP Tips & Tricks IEEE Signal Processing Magazine*, 24:3-123-125, (2007).
- [31] Eroğlu, M., Narin, Ö. G, "İnsansız hava aracı ile üretilen Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ile Google Earth ve HGM Küre verilerinin karşılaştırılması", *Politeknik Dergisi*, 24(2), 545-551, (2021).
- [32] Koç, K., Demirtaş, M., Çetinbaş, I. "Parameter Extraction of Photovoltaic Models by Honey Badger algorithm and Wild Horse Optimizer", *Politeknik Dergisi*, 1-1, (2022).