

Su Altı Akustiğinde LMS Filtre Uygulaması ve FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi

Emre KARAKAYA^{1,2*}, Mehmet Ali ÇAVUŞLU², Oktay AYTAZ¹

¹Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye

²Koç Bilgi ve Savunma Teknolojileri A.Ş., Elektronik Tasarım Bölümü, Ankara, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: krky_emre@hotmail.com

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 04.10.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 07.12.2024

Öz

Bu çalışmada, geleneksel dijital filtre algoritmalarına alternatif olarak önerilmiş olan adaptif filtre algoritmalarının da bir üyesi olan En Küçük Ortalama Kare (LMS) algoritmasının, su altı akustikindeki performansının incelenmesi için bir uygulama yöntemi gösterilmektedir. Bu yöntemde gerçekleştirilen ortamı olarak sinyal işleme uygulamalarında yoğun olarak kullanılan Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA) donanımı tercih edilmiştir. Uygulamada ise LMS algoritması öncelikle matematiksel olarak incelenmiş, sonrasında ise su altı ortamında hazırlanan test düzeneği ile kaydedilmiş akustik haberleşme sinyalleri kullanılarak FPGA donanımında gerçekleştirilen işlemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda yakınsama katsayısının değerine ve filtre derecesine göre sinyalin Sinyal Gürültü Oranı (SNR) değerinin değiştiği gözlemlenmiş, seçilen yakınsama katsayısına göre sinyalin SNR değerinin 8,85 dB'den 29,85 dB'e çıktığı gözlemlenmiştir. Kullanılan algoritmanın filtreleme etkinliği incelendiğinde, SNR değerinde meydana gelen bu iyileşmeye bağlı olarak, LMS filtresinin bu alanda kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Yapılan bu sentezleme sonucunda ise algoritmanın FPGA üzerinde %2,68 Arama Tablosu (LUT), %4,7 Flip-Flop (FF), %0,42 Sayısal Sinyal İşleme (DSP), %17,62 Giriş-Çıkış (IO) ve %3,1 Küresel Ara Bellek (BUFG) kaynak kullanımında bulunduğu görülmüştür. Bu çalışma, LMS algoritmasının su altı akustikindeki filtreleme etkinliğini FPGA donanımı üzerinde gerçekleştirilen deneylerle ortaya koyarak SNR değerini iyileştirdiğini ve algoritmanın kaynak kullanımının düşük olduğunu göstererek, verimli bir filtreleme çözümü sunduğunu ve bu alandaki uygulamalara katkı sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: FPGA, LMS, SNR, su altı akustik

LMS Filter Application and Implementation on FPGA in Underwater Acoustic

Abstract

In this study, an application method is shown to examine the performance of the Least Mean Square (LMS) algorithm, which is also a member of the adaptive filter algorithms proposed as an alternative to traditional digital filter algorithms, in underwater acoustics. In this method, Field Programmable Gate Array (FPGA) hardware, which is used extensively in signal processing applications, was preferred as the implementation environment. In the application, the LMS algorithm was first examined mathematically, and then the implementation was performed in the FPGA hardware using acoustic communication signals recorded with the test setup prepared in the underwater environment. In the obtained results, it was observed that the Signal to Noise Ratio (SNR) changed according to the value of the convergence coefficient and the filter degree, and it was observed that the SNR value of the signal increased from 8.85 dB to 29.85 dB according to the selected convergence coefficient. When the filtering effectiveness of the used algorithm is examined, it is shown that the LMS filter can be used in this area depending on the improvement in the SNR value. As a result of this synthesis, it is seen that the algorithm uses 2.68% Lookup Table (LUT), 4.7% Flip-Flop (FF), 0.42% Digital Signal Processing (DSP), 17.62% Input-Output (IO) and 3.1% Global Buffer Memory (BUFG) resources on the FPGA. This study demonstrates the filtering effectiveness of the LMS algorithm in underwater acoustics through experiments performed on FPGA hardware, improving the SNR value and demonstrating that the algorithm uses low resources, thus providing an efficient filtering solution and contributing to applications in this field.

Keywords: FPGA, LMS, SNR, underwater acoustic

Cite as;

Karakaya, E., Çavuşlu, M. A., Aytaz, O. (2025). Su Altı Akustikinde LMS Filtre Uygulaması ve FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 6(1), 168-174. Doi: 10.53501/rteufemud.1578403

1. Giriş

Son yıllarda meydana gelen teknolojik ilerlemelere bağlı olarak, haberleşme yöntemlerinin gelişmesi ve farklılaşması sonucunda elde edilen çeşitli yöntemlerin su altı ortamındaki haberleşme sistemlerinde kullanılmasında artış görülmektedir. Ancak su altında ortam gürültüsünün ve ortamdaki haberleşme kanalının zamansal ve mekânsal olarak farklılık göstermesi nedeniyle karasal haberleşme sistemlerinin aksine su altında veri aktarımı çözülmesi gereken zor bir problem haline gelmektedir (Çavuşlu, 2020).

Su altı ortamında sinyallerin analizi ve ayrıştırılmasında en çok kullanılan yöntemlerin başında ise filtreleme yöntemleri gelmektedir. Su altı ortamının kaotik yapısı düşünüldüğünde alıcı biriminde sinyallerin anlamlandırılmasında filtreleme uygulamalarının kullanımı kaçınılmaz olmaktadır. Su altı ortamında oluşan gürültü seviyesini belirleyen kaynaklar termal gürültü, yüzey gürültüsü, gemi trafiği gürültüsü ve türbülans gürültüsüdür. Termal gürültü, su moleküllerinin rastgele hareketinden kaynaklı gürültüdür (Coates, 1990). Türbülans gürültüsü, düşük frekanslarda etkinlik gösteren gürültüdür (Coates, 1990). Yüzey gürültüsü, rüzgâr hızından dolayı suyun farklı seviyelerinde meydana gelen gürültüdür (Traverso vd., 2012). Gemi trafiği gürültüsü ise su taşıtlarının makine hareketlerinden ve akıştan dolayı yaydığı gürültüdür (Çavuşlu, 2020).

Su altı ortam gürültüsünün ayrıştırılmasında, Sonlu Dürtü Yanıtı (FIR) ve Sonsuz Dürtü Yanıtı (IIR) filtreler alternatif olarak kullanılabilecek adaptif filtreler, sinyal işleme uygulamalarının birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Haykin, 1996). Adaptif filtreler, uyarlamalı yapısından dolayı klasik filtreler kiyasla daha esnek bir kullanım ve çevresel değişimlere daha hızlı bir tepki sağlar. Adaptif filtreleme algoritmalarının en çok tercih edilenlerinden olan En Küçük Ortalama Kare (LMS) algoritması ise uygulama kolaylığı ve uygun hesaplama maliyeti gibi avantajlara sahiptir.

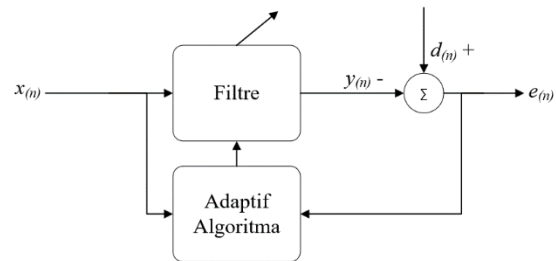
Sinyal işleme uygulamalarında en çok kullanılan donanımlardan olan Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA) diğer donanımsal yöntemlere göre daha az donanım maliyetine sahiptir ve hızlı bir şekilde programlanabilmektedir (Safarian vd., 2015). LMS algoritmasının FPGA üzerinde uygulandığı çalışmalara bakıldığında Ganorkar vd. (2022)'ne göre FIR LMS algoritmasının FPGA ortamında gerçekleştirildiği gösterilmiş, Liu vd. (2023)'ne göre modifiye edilmiş bir LMS algoritmasının FPGA üzerinde gösterdiği performans ve orijinal LMS algoritması ile performans karşılaştırılması incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalara göre ise FPGA donanımı LMS filtre uygulamasına uygun olup, çalışma içerisinde uygulama yöntemi olarak tercih edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada, su altı ortamının gürültülü yapısından dolayı iletişim sinyallerinde oluşan gürültü etkisinin LMS filtre ile giderilmesi ve FPGA ile tasarlanan devrenin sentezleme işlemi gerçekleştirilerek su altı akustığında yapılan çalışmalarda adaptif bir filtrenin uygulanabilirliğinin gösterilmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. LMS Algoritması

Stokastik gradyan algoritmalarının bir üyesi olan LMS algoritması, ortalama hatanın karesini en küçük yapmaya odaklanır (Poularikas, 2014). Şekil 1'de adaptif filtre algoritmalarının genel blok diyagramı gösterilmiştir (Mustafa vd., 2009).



Şekil 1. Adaptif filtre genel blok diyagramı

Figure 1. Adaptive filter general block diagram

Şekil 1'de, $x(n)$, algoritmaya giren gürültülü sinyali ifade etmektedir. $y(n)$, filtreleme işleminden sonra oluşturulan çıkış sinyalini, $e(n)$ ise $y(n)$ çıkış sinyali ile $d(n)$ referans sinyali

arasındaki farkı yani hatayı ifade etmektedir (Mustafa vd., 2009). Algoritmanın filtre bölümünde uygulamaya göre FIR veya IIR filtre kullanılabilir (Mustafa vd., 2009). Bu çalışma içerisinde hesaplama kolaylığı açısından FIR filtre tercih edilmiştir. Bu yapı matematiksel olarak Eş. 1’de gösterilmiştir (Poularikas, 2014).

$$y(n) = w^T(n)x(n) \quad (1)$$

Eş. 1’de gösterilen denklemde $w(n)$ filtre katsayılarını ifade etmektedir (Mustafa vd., 2009).

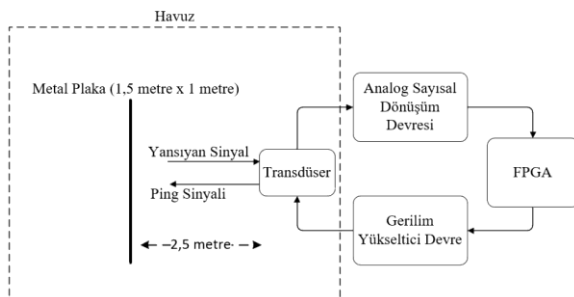
Adaptif algoritma bölümü ise LMS filtrenin filtre katsayılarını güncellediği bölümdür. Bu yapı matematiksel olarak Eş. 2’de gösterilmiştir (Poularikas, 2014).

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu x(n)e(n) \quad (2)$$

Eş. 2’de gösterilen denklemde $w(n+1)$, filtre katsayılarının güncellenmiş halini, μ ise yakınsama katsayısını ifade etmektedir (Mustafa vd., 2009).

2.2. Test Düzenegi

Sistemin çalışabilirliğini test etmek için su altında akustik kayıt alınmıştır. Kurulan deney düzenegine ait blok diyagram Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney düzenegi blok diyagramı

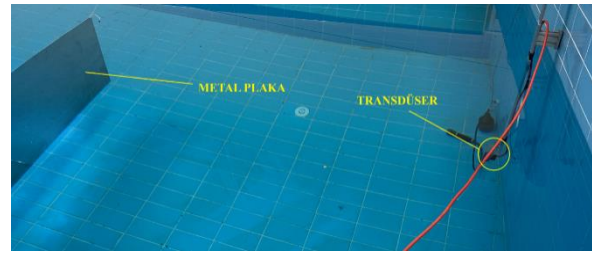
Figure 2. Experimental design of block diagram

Test düzeneginde kullanılan transdüser Koç Bilgi ve Savunma Teknolojileri A.Ş bünyesinde üretilmektedir. Transdüserin performansı için Eş. 3 önemlidir (Kumar vd., 2013). Burada Kaynak Seviyesi (SL) ve Transdüser Gerilim Yanıtı (TVR) parametreleri transdüserin üretiminde belirlenen parametrelerdir. Testte kullanılan

transdüserin 300khz ping sinyalinde TVR değeri 135 dB’dir.

$$SL = TVR + 20\log(V_{RMS}) \quad (3)$$

Havuz ortamında kurulan bu test düzeneginde gerilim yükseltici elektronik devre üzerinden ping sinyali üretilmekte ve bu ping sinyali transdüser üzerinden metal plakaya iletilmektedir. Ping sinyalinden dolayı metal plakadan yansıyan sinyal yine transdüser üzerinden alınıp analog sayısal dönüşüm devresi tarafından okunmakta ve FPGA üzerinde işlenmektedir. Deney düzenegi ise Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Test düzenegi

Figure 3. Test setup

2.3. Ping Sinyalinin Oluşturulması

Ping sinyali, sabit frekans ve sabit bir süre için oluşturulmuş Sürekli Dalga (CW) bir sinüs sinyalidir (Waite, 2002). Ping sinyali $f = 300\text{khz}$ frekansında, 1ms sürekli olarak ve $f_s = 1\text{Mhz}$ örnekleme frekansı ile oluşturulmuştur. Eş. 4’te oluşturulan ping sinyalinin matematiksel ifadesi gösterilmiştir.

$$Ping = \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi ft}{f_s}\right), & \text{mod}(t, 20\text{ms}) < 1\text{ms} \\ 0, & \text{mod}(t, 20\text{ms}) \geq 1\text{ms} \end{cases} \quad (4)$$

Sistem çalışma süresince 1ms ping sinyali iletmekte, sonraki 19ms boyunca metal plakadan yansıyan sinyalleri kaydetmekte ve 20ms aralıklarla bu çalışma durumunu tekrar etmektedir. Oluşturulan bu yaklaşım, su altı ortamında tespit yapabilmek için gerekli olan senaryonun bir göstereimidir.

2.4. SNR Değerinin Hesaplanması

Kayıt edilen akustik sinyalde filtreleme işleminden sonra performans açısından değerlendirme yapabilmek için Sinyal Gürültü

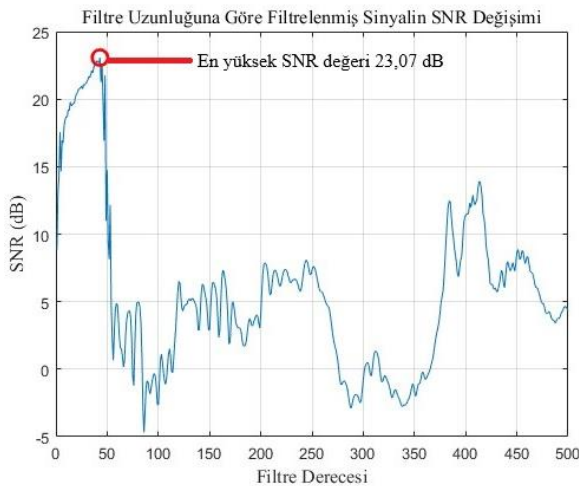
Oranı (SNR) değeri önemlidir. SNR, sinyal ile sinyal üzerindeki gürültünün birbirine oranıdır (Bari ve Dewasthale, 2016). Eş. 5'te SNR değeri matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$SNR(dB) = 10 \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (5)$$

Test düzeneği üzerinden kaydedilen sinyallerde, 1ms sürekli olan ping sinyali tespit edilmiş olup, 20ms içerisinde tespit edilen bu sinyalin yansımaları görülebilmektedir. Bu durumda kaydedilen sinyallerde, 1ms olan sürekli ping sinyalinden örnekleme yapılarak sinyalin gücü bulunmuş, gürültünün gücü ise yansıyan sinyal tespit edilmeden önceki zaman aralığından örnekleme alınarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda ölçülen gürültü gücünün boş havuzun gürültü gücüne denk olduğu doğrulanmıştır.

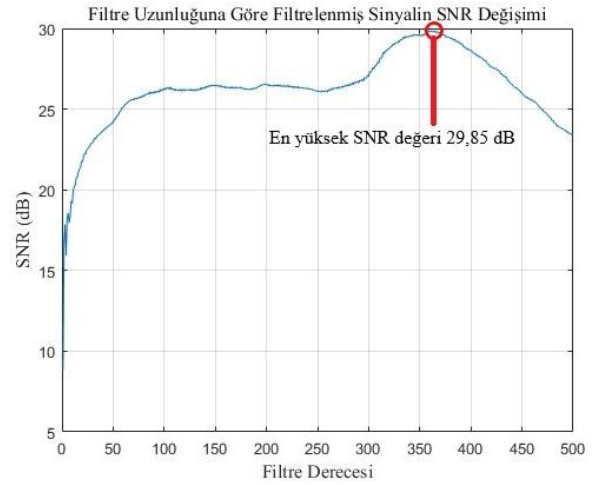
3. Bulgular ve Tartışma

Öncelikle kaydedilen gürültülü sinyalin SNR değeri hesaplanmış ve 8,85 dB olarak bulunmuştur. LMS filtreleme işleminde yakınsama katsayısı için sırasıyla $\mu = 0,1$, $\mu = 0,01$, $\mu = 0,001$ ve $\mu = 0,0001$ seçilerek SNR değişimi incelenmiştir. Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de görüldüğü üzere farklı μ değerleri SNR değerini etkilemektedir.



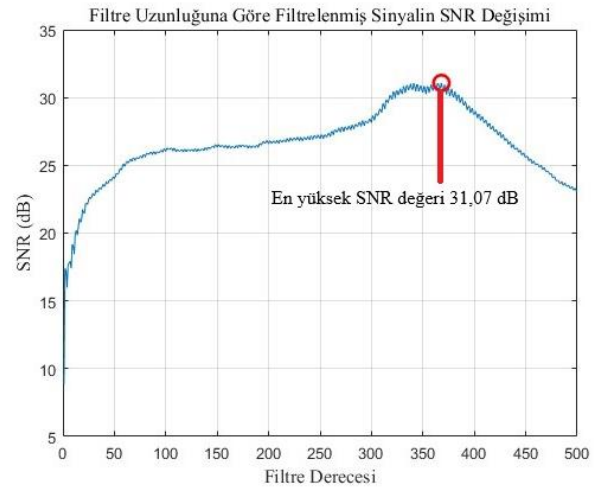
Şekil 4. $\mu = 0,1$ 'deyken SNR değeri

Figure 4. SNR value of $\mu = 0.1$



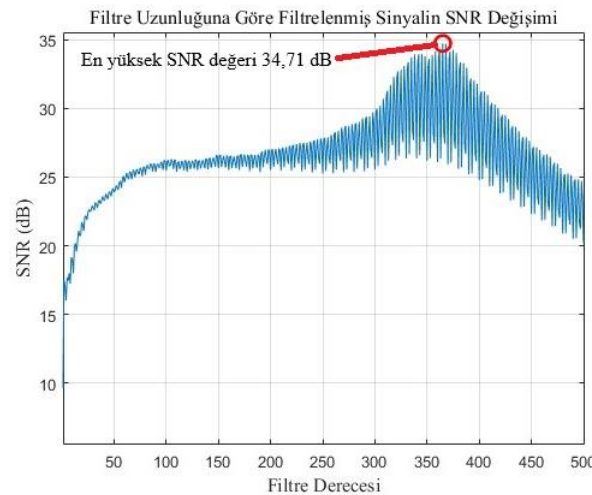
Şekil 5. $\mu = 0,01$ 'deyken SNR değeri

Figure 5. SNR value of $\mu = 0.01$



Şekil 6. $\mu = 0,001$ 'deyken SNR değeri

Figure 6. SNR value of $\mu = 0.001$

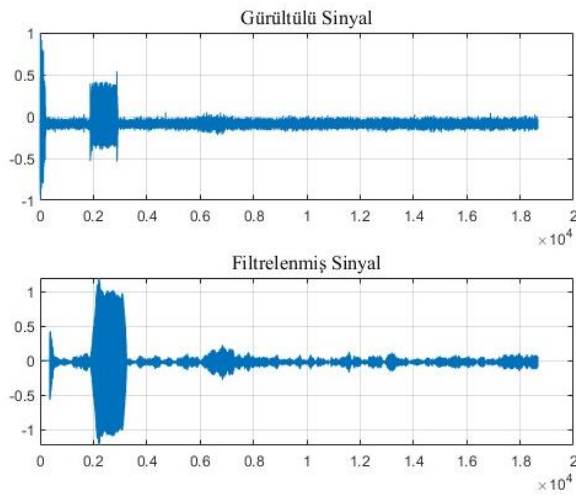


Şekil 7. $\mu = 0,0001$ 'deyken SNR değeri

Figure 7. SNR value of $\mu = 0.0001$

Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de görüleceği üzere μ değeri azaldıkça SNR değerinde meydana gelen değişimler artmakta ve sistemin aşırı salınım tepkileri vermesine yol açmaktadır. Bu nedenle çalışmada değişimlerin daha az olduğu parametre ($\mu = 0,01$) seçilmiştir. SNR değerinin yüksekliği filtreleme etkinliği açısından önemli olduğundan filtre derecesi 364 seçilerek 29,85 dB SNR değeri elde edilmiştir.

$\mu = 0,01$ seçildiğinde gürültülü sinyal ve LMS algoritmasının filtrelediği sinyal Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Gürültülü ve filtrelenmiş sinyalleri gösteren diyagram

Figure 8. Diagram indicating noise and filtered signals

LMS adaptif filtre algoritması su altı akustiğinde kullanım için teorik olarak tanımlandıktan ve sinyal analizi yapıldıktan sonra uygulama olarak gerçekleştirilebileceği bir donanıma ihtiyaç

duyulmaktadır. Bunun için Digilent firmasının FPGA geliştirme kartı olan NEXYS 4 DDR ürünü tercih edilmiştir. Bu geliştirme kartı üzerinde AMD firmasının Xilinx XC7A100T-1CSG324C FPGA çipi bulunmaktadır. Bu donanım üzerinde yapılan gerçekleştirme işleminin blok diyagramı Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. FPGA gerçekleştirme bloğu

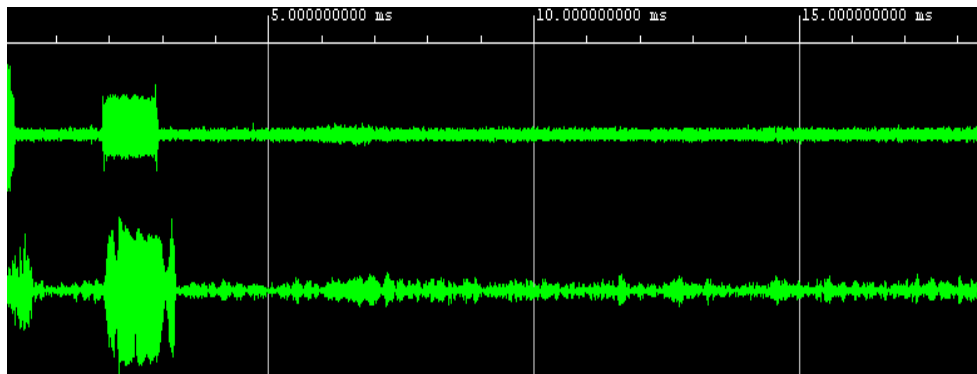
Figure 9. FPGA implementation block

LMS algoritmasında hesaplanan filtre katsayıları ve kaydedilen gürültülü sinyal kullanılarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 10’da gerçekleştirme sonucunda uygulanan gürültülü sinyal üstte, filtrelenen sinyal altta olacak şekilde gösterilmiştir.

Sentezleme sonucuna göre FPGA kaynak kullanımları Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sentezleme sonucu kaynak kullanımları
Table 1. Resource usage as a result of synthesis

Kaynak	Kullanılabilir	Kullanılan	Kullanım Oranı (%)
LUT	63400	1699	2,68
FF	126800	5962	4,70
DSP	240	1	0,42
IO	210	37	17,62
BUFG	32	1	3,13



Şekil 10. FPGA gerçekleştirme sonucu

Figure 10. FPGA implementation result

4. Sonuçlar

Bu çalışmada su altı akustiğinde kullanılan haberleşme sinyallerinde gürültü etkisini en aza indirmek için LMS filtre öncelikle analiz edilmiş sonrasında FPGA gerçekleştirilmesi ve simülasyonu yapılmıştır. İncelemesi yapılan sinyallerin nasıl oluşturulduğu ve yapıyı test etmek için kullanılan test düzeneği açıklanmıştır.

Çalışma sonuçları incelendiğinde SNR değerinin 8,85 dB'den 29,85 dB'e çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum, filtrelenen sinyal karakteristiğinin algoritma girişine uygulanan sinyale göre daha az gürültülü sinyal içerdiğini göstermektedir.

Sentezleme sonucunda algoritmanın FPGA üzerinde %2,68 Arama Tablosu (LUT), %4,7 Flip-Flop (FF), %0,42 Sayısal Sinyal İşleme (DSP), %17,62 Giriş-Çıkış (IO) ve %3,1 Küresel Arabellek (BUFG) kaynak kullanımında bulunduğu görülmüştür.

Sonuç olarak su altı haberleşmesinde LMS filtrenin uygulaması başarıyla gerçekleştirilmiş ve FPGA üzerinde çalıştığı doğrulanmıştır.

Teşekkür

Araştırma için sağladığı test ortamından dolayı Koç Bilgi ve Savunma Teknolojileri A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Mali Destek

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Yazar Katkısı

Karakaya, E: Araştırma, Veri işleme, Literatür taraması, Görselleştirme, Yazım; Çavuşlu, M.A: İnceleme, Araştırma, Malzeme Tedarik; Aytar, O: İnceleme, Proje Yönetimi.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Etik Beyan

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Bari, M., Dewasthale, M.M. (2016). Performance comparison of LMS algorithms for acoustic noise cancellation. *2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*, 9-11 June, Pune, India.
- Coates, R.F. (1990). *Underwater Acoustic Systems* (1. publ), Wiley, ISBN: 978-0-333-42542-8, New York, United States of America, 188 pages.
- Çavuşlu, M.A. (2020). *Sualtı Akustiği İçin Veri Temelli Kanal Kestirimi ve Modellenmesi*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
- Ganorkar, S., Sharma, S., Jain, A. (2022). Implementation of FIR adaptive filter with FPGA. *2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, 23-24 April, Indore, India.
- Kumar, M. A., Abraham, R. M., Ramesh, R., Moosad, K. P. B., Ebenezer, D. D. (2013). Design and development of flexural disc projector for low frequency sonar applications. *2013 Ocean Electronics (SYMPOL)*, 23-25 October, Kochi, India.
- Haykin, S. (1996). *Adaptive Filter Theory* (3. publ), Prentice Hall, ISBN: 0-13-322760-X, Upper Saddle River, United States of America, 989 pages.
- Liu, Y., Sun, H., Liu, L., Ma, Y. (2023). Implementation of LMS algorithm based adaptive filter using Verilog HDL. *2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 09-11 August, Harbin, China.
- Mustafa, R., Mohd Ali, M.A., Umat, C., Al-Asady, D.A. (2009). Design and implementation of least mean square adaptive filter on Altera Cyclone II Field Programmable Gate Array for active noise control. *2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications*, 04-06 October, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Poularikas, A.D. (2014). *Adaptive Filtering: Fundamentals of Least Mean Squares with*

- MATLAB® (1. publ), CRC Press, ISBN: 978-1-4822-5335-1, Boca Raton, United States of America, 337 pages.
- Safarian, C., Ogunfunmi, T., Kozacky, W. J., Mohanty, B.K. (2015). FPGA implementation of LMS-based FIR adaptive filter for real time digital signal processing applications. *2015 IEEE International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, 21-24 July, Singapore, Singapore.
- Traverso, F., Vernazza, G., Trucco, A. (2012). Simulation of non-White and non-Gaussian underwater ambient noise. *2012 Oceans – Yeosu*, 21-24 May, Yeosu, Korea (South).
- Waite, A. D. (2002). *Sonar For Practising Engineers* (3. publ), Wiley, ISBN: 978-0-471-49750-9, Chichester, United Kingdom, 256 pages.