

Design and Implementation of FPGA-Based Mexican Hat Wavelet for Real-Time Wavelet Transforming

Halil İbrahim ŞEKER¹, Murat TUNA^{2,*}, İsmail KOYUNCU³

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, F.B.E., Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D., 03200, Afyon, Türkiye

²Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik Teknolojisi, 39100, Kırklareli, Türkiye

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 03200, Afyon, Türkiye

*Corresponding Author e-mail:murat.tuna@klu.edu.tr

Abstract: In this study, the Mexican hat function, one of the most popular main wavelet functions for real-time Wavelet transforms, is encoded in the VHDL language with the 32-bit IEEE-754-1985 floating point number standard and implemented on the FPGA synthesized in the Xilinx ISE Design Tools 14.7 program. The study was firstly modeled with the Mexican hat wavelet Matlab-based and tested with the help of the data set generated. After the testing phase Matlab-based Mexican hat wavelet reference to FPGA-based Mexican hat wavelet unit coded in VHDL with 32-bit floating-point standard and synthesized to Xilinx ISE program Virtex-6 chip VC6VLX75T vehicle and tested. FPGA-based Mexican hat wavelet unit was obtained as a maximum operating frequency of 185,086 MHz. The Matlab-based Mexican hat wavelet design sample data set at 0.890 s and FPGA-based Mexican hat wavelet unit can calculated in 1.408 μ s. According to the results obtained, the FPGA-based Mexican hat wavelet provides high speed gain compared to the Matlab-based design.

Keywords: FPGA, Wavelet Transform, VHDL, Mexican hat wavelet.

Gerçek Zamanlı Wavelet Dönüşümleri için FPGA-Tabanlı Meksika Şapkası Dalgacığının Tasarımı ve Gerçeklenmesi

Abstract: Bu çalışmada, gerçek zamanlı Wavelet dönüşümleri için en çok kullanılan ana dalgacık fonksiyonlarından biri olan Meksika şapkası fonksiyonu 32-bit IEEE-754-1985 kayan noktalı sayı standardı ile VHDL dilinde kodlanmış ve Xilinx ISE Design Tools 14.7 programında sentezlenerek FPGA üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma da öncelikle Meksika şapkası dalgacığı Matlab-tabanlı olarak modellenmiş ve oluşturulan veri seti yardımı ile test edilmiştir. Test aşamasından sonra Matlab-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı referans alınarak FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesi 32-bit kayan noktalı sayı standardı ile VHDL'de kodlanmış ve Xilinx ISE programında VIRTEX-6 çipi VC6VLX75T aracı için sentezlenmiş ve test edilmiştir. FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesi maksimum çalışma frekansı 185.086 MHz olarak elde edilmiştir. Matlab-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı tasarımı örnek veri setini 0.890 s'de ve FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesi ise 1.408 μ s'de hesaplayabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı Matlab-tabanlı tasarıma göre yüksek hız kazancı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: FPGA, Wavelet Dönüşümü, VHDL, Meksika şapkası dalgacığı.

1. GİRİŞ

Temelleri Joseph Baptiste Fourier tarafından atılan Wavelet (dalgaçık) dönüşümü günümüzde sinyal işleme [1], gürültü giderme [2], biyomedikal [3], görüntü işleme [4], haberleşme [5] ve jeolojik [6] inceleme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Wavelet dönüşümünde sinyal, ana dalgacığın bir miktar zamanda ve ölçekte kaydırılmasıyla elde edilmektedir. Wavelet dönüşümünde ana dalgacığın görevi kısa zamanda Fourier dönüşümündeki pencere fonksiyonunun görevi ile benzerdir [7, 8]. Fakat Fourier dönüşümünde yapılan analiz sabit pencereleme tekniği olduğu için

çözünürlüğü pencereye bağlı olarak sabit kalmaktadır. Wavelet analizi ise değişken boyutlu pencereleme tekniği olduğundan dolayı literatürde birçok alanda wavelet dalgaçık analizi tercih edilmektedir. Morlet, daubechies, meksika şapkası (Mexican hat) ve haar fonksiyonları Wavelet dönüşümünde en çok kullanılan ana dalgacık fonksiyonlarından [9]. Yapılan bu çalışmada ikinci bölümde FPGA (Field Programmable Gate Array-Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri) çipleri ve Wavelet dönüşümü hakkında bilgiler verilmiştir. FPGA çipleri paralel işlem yapabilme, tekrar tekrar programlanabilme, yüksek frekans ve kapasite gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda sinyal işleme [10], görüntü işleme [11], yapay sinir ağları [12], kaotik

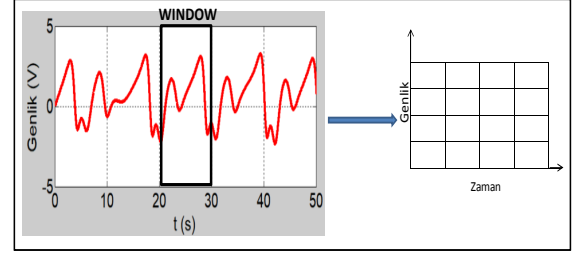
osilatör [13], gerçek rasgele sayı üretici [14] tasarımları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. IQ-Math sabit noktalı sayı standardı ve IEEE 754-1985 kayan noktalı sayı standardı (Floating Point Number Standart) FPGA çiplerinde çok kullanılan sayı standartlarıdır. Bu sayı standartları ile gerçekleştirilen FPGA-Tabanlı tasarımlar, Verilog, HDL, Handle-C ve VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language) gibi donanım tanımlama dilleri olarak kullanılmaktadır. FPGA tabanlı tasarımlarda genellikle tasarımlar belirli programlar kullanılarak modellenmekte ve bu modeller referans olarak kabul edilmektedir. Üçüncü bölümde Wavelet dönüşümünde en çok kullanılan ana dalgacık fonksiyonlarından biri olan Meksika şapkası dalgacığı Matlab-tabanlı olarak modellenmiş ve oluşturulan veri seti ile test edilmiştir. Dördüncü bölümde Matlab-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı referans alınarak FPGA üzerinde 32-bit IEEE 754-1985 kayan noktalı sayı standardı ile VHDL dilinde kodlanmış ve Xilinx ISE Design Tools programında test edilmiştir. Son bölümde ise Matlab-tabanlı ve FPGA tabanlı Meksika şapkası dalgacığı tasarımlarından elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve performans analizleri sunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

A. WAVELET ANALİZİ

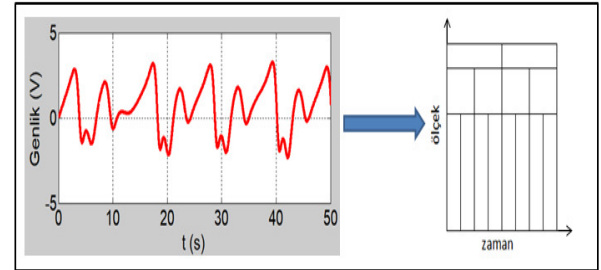
Fourier, frekans analizi konusunda önemli çalışmalar yapmıştır. Günümüzde Fourier dönüşümü frekans analizi yöntemi uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu frekans analizi yöntemi etkili bir yöntem olmakla birlikte yetersiz kaldığı durumlarda frekans analizinden ölçek analizine geçilmektedir. Fourier analizinde sinyallerin zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüşüm sırasında zaman bilgisi kaybedilmektedir. Diğer bir deyişle bir sinyalin fourier analizi incelendiğinde olayın ne zaman gerçekleştiğine dair bir şey söylenememesine sebep olmaktadır. Eğer sinyal lineer yani zaman boyunca karakteristik özelliği değişmiyor ise bu dezavantaj önemli değildir. Ama sinyaller genellikle önemli olabilecek (ani değişim, eğim, kırılma ve olayların başlangıç ve bitiş gibi) değerler içerir. Bu özellikler sinyalin en önemli kısımlarını oluşturma ihtimali var ve Fourier analizi bunları belirlemeye elverişli değildir [10]. Fourier dönüşümünün zaman eksikliğini gidermek için kısa zaman fourier dönüşümü (KZFD) geliştirilmiştir. KZFD'de elde edilen bilgiler belirli bir sınırlı duyarlılığa sahiptir. Nedeni ise KZFD ile yapılan analiz sabit pencereleme tekniği olduğu için çözünürlüğü pencereye bağlı olarak sınırlı kalmaktadır. Bir çok işaretler daha çok duyarlı yaklaşıma ihtiyaç duyarlar ve bu da ancak pencerenin büyüklüğünün değişmesi ile gerçekleşmektedir. KZFD'de zaman penceresi büyüklüğü bütün frekans analizi boyunca sabit kalmaktadır. Bu pencerenin büyük olması durumunda zaman çözünürlüğünü azaltmakta ve küçük olması durumunda ise frekans çözünürlüğünü azaltmaktadır

[16]. KZFD penceresinin sinyal üzerindeki uygulaması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kısa Zaman Fourier Dönüşümü.

Bu nedenle analiz yönteminin ani değişim ve kırılmalara hassas olması gerekmektedir [15]. Dalgacık analizinde veriler bir ana dalgacık ile birleştirilmektedir. Bu işlemin ardından belirlenen sinyal ölçek katsayısı ile ölçek zaman boyutunda gösterilmektedir. Şekil 2'de dalgacık analizi gösterimi sunulmuştur. Wavelet analiz yöntemi KZFD ile kıyaslandığı zaman, pencere büyüklüğünün değiştirilebilir olmasından dolayı daha ileri yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu da Fourier analizine göre üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca Wavelet analizi sinyalleri sadece frekans bölgesinde değil zaman-frekans bölgelerinde de inceleme imkânı sağlamaktadır [16]. Morlet dalgacığı, Haar dalgacığı, Daubechies dalgacığı ve Mexican hat (Meksika şapkası) dalgacığı literatürde en çok kullanılan ana dalgacık çeşitleridir. Bu dalgacık türleri, veri içerisindeki sinyali bir ana dalgacık ile birleştirerek ve sinyal ölçek katsayıları ile ölçek zaman boyutunda ifade etmektedir [18].



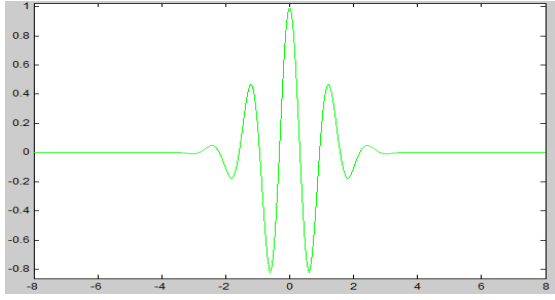
Şekil 2. Dalgacık analizi

Morlet Dalgacığı:

Morlet dalgacığı, dalgacık analizinde kullanılan en klasik örneklerden biridir. Matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-ift} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

Bu denklemdeki f , dalgacığın merkezi frekansını göstermektedir. Bu dalgacığın ölçek fonksiyonu olamamakla birlikte karmaşık sayılar içermesinden dolayı genlik ve faz bileşenlerini aynı anda tespit edilebilmektedir. Şekil 3'te Morlet dalgacığı görülmektedir [18].



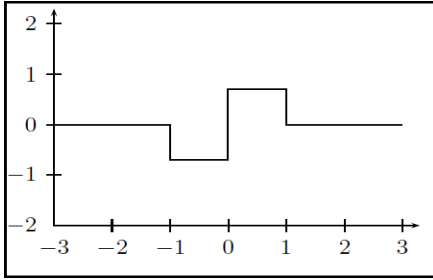
Şekil 3. Morlet dalgacı

Haar Dalgacı:

Haar dalgacığının hızlı olması, hafızaya sahip ve tersine çevrilir olması gibi diğer dalgacıklara göre üstünlükleri vardır. Bu dalgacığın türevinin sürekli olmaması haar dalgacık filtresinin bir çok alanda kullanımını sınırlandırmaktadır. Haar dalgacık ifadesini matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\psi(x)^{(H)} = \begin{cases} -1/2, & -1 < x \leq 0 \\ 1/2, & 0 < x \leq 1 \\ 0, & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

Haar dalgacık fonksiyonunun şekil 4’görülmektedir [7, 16, 18].



Şekil 4. Haar dalgacı [15]

Daubechies dalgacı:

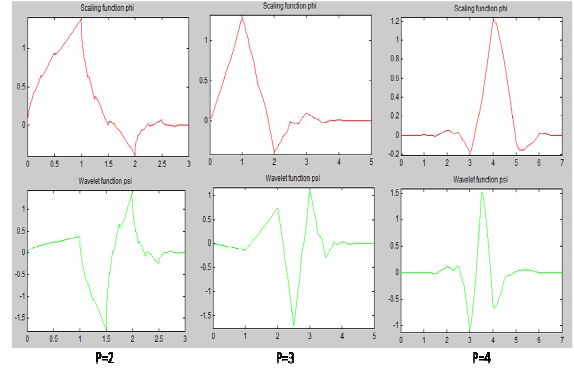
Daubechies dalgacı, haar dalgacığına göre daha karmaşık bir yapıda ve bu dalgacık hesaplama açısından daha uzun aynı zamanda karmaşık işlemler gerektirmektedir. Daubechies dalgacı şekil 5’te görülmektedir [18].

Ölçekleme fonksiyonu;

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k)$$

Dalgacık fonksiyonu;

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \psi(2t - k)$$



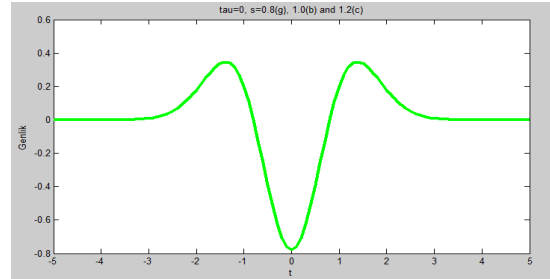
Şekil 5. Dubechies ölçekleme ve dalgacık fonksiyonları

Mexican Hat Dalgacı:

Mexican hat dalgacı Gauss fonksiyonunun normalize edilmiş halinin ikinci türevi alınarak hesaplanmaktadır. Meksikalıların giydiği şapkaya benzetildiğinden dolayı Meksika şapkası olarak adlandırılmaktadır. Matematiksel olarak eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$\varphi(t, \tau, s) = \frac{[\left(\frac{t - \tau}{s}\right)^2 - 1] \exp\left\{-\left(\frac{t - \tau}{s}\right)^2\right\} * (-0,5)}{\sqrt{2\pi} * s^3}$$

Buradaki s, ölçeklendirme parametresi iken τ ise (-1,0,1) kaydırma parametreleridir [19, 20]. FPGA-tabanlı tasarımlarda genellikle tasarımlar belirli programlar kullanılarak modellenmekte ve bu modeller referans olarak kabul edilmektedir. Bu amaç ile Meksika şapkası dalgacı Matlab üzerinde modellenmiştir. Matlab-tabanlı Meksika şapkası dalgacı örnek olarak oluşturulan ve sınır değerleri $-5 < t < 5$ arasında olan 100 tane t değeri içeren veri seti ile test edilerek grafiği çizdirilmiştir. Matlab sonucu grafiği Şekil 6’da görülmektedir. Daha sonra Matlab-tabanlı Meksika şapkası dalgacı referans alınarak FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacı ünitesi 32-bit IEEE 754-1985 kayan noktalı sayı standardı kullanılarak VHDL dilinde kodlanmıştır.

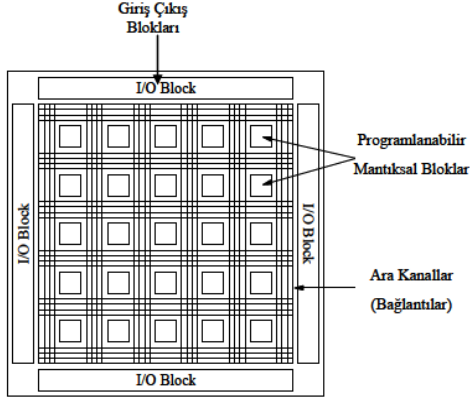


Şekil 6. Meksika şapkası

B. FPGA ÇİPLERİ

FPGA, çipleri tasarımcının ihtiyaç duyduğu mantıksal fonksiyona göre donanım yapısı yeniden ve tekrar tekrar sahada programlayabileceği sayısal tümleşik devrelerdir. Başka bir ifadeyle FPGA çiplerindeki yarı

iletken teknolojisinin tamamlanmasından sonra çipin üzerine sayısal bir sistem tasarımı yapılabileceği anlamına gelmektedir. FPGA çiplerinin bu özelliklerinde dolayı tasarımcı istediği yerde çipin yapısını değiştirerek istenilen uygun tasarımı yapabilmektedir [17, 21]. FPGA çipleri gerçek zamanlı, yüksek frekanslı ve paralel işlem yapabilme özelliğine sahiptirler. Günümüzde bir kaç MHz'lerden başlayıp bir kaç GHz'lere kadar çalışma frekansına sahip FPGA çipleri bulunmaktadır. FPGA çiplerinin başka bir avantajıda IP core (Intellectual Properties-core) yapıları oluşturularak sayısal devre tasarımının daha hızlı oluşturulmasını sağlamaktadır [22]. FPGA çipleri giriş-çıkış blokları (I-O blocks), konfigüre edilebilir mantıksal bloklar (Configurable Logic Block (CLB)) ve ara bağlantılar (interconnection network) olmak üzere başlıca üç ana yapıdadır. Şekil 7'de FPGA çip yapısı görülmektedir [22].



Şekil 7. FPGA Genel Yapısı [22]

Giriş- Çıkış Blokları: Giriş/Çıkış (I/O) blokları FPGA'nın iç sinyal bağlantıları ile FPGA'nın pinleri arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. I/O pinleri giriş, çıkış veya hem giriş hem de çıkış (in-out) olarak programlanabilir. Ayrıca güç pinleri, clock pinleri, konfigürasyon pinleri ve kullanıcı pinleri olmak üzere çeşitli giriş çıkış pinleri vardır [22, 23].

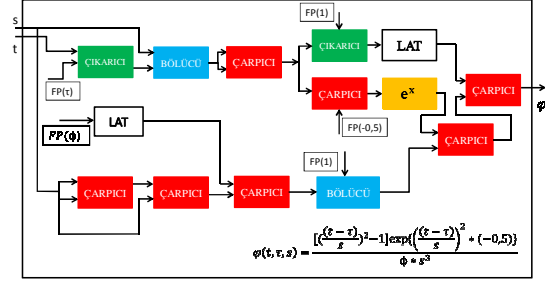
Konfigüre Edilebilir Mantıksal Bloklar: Bir mantık hücresi FPGA'nın ana temelini oluşturmaktadır. Bir mantık hücresi LUT (Look-up table), Flip-Flop ve Mux'dan oluşur. LUT'lar bir mantık işlemini yerine getiren küçük belleklerdir [17, 23].

Ara Bağlantılar: Bu bağlantılar hem mantık hücreleri arasındaki iç sinyal bağlantılarını, hem de giriş/çıkış blokları ile mantık hücreleri arasındaki bağlantıları kurmayı sağlamaktadır [23].

3. FPGA-TABANLI MEKSİKA ŞAPKASI GERÇEKLENMESİ VE TEST SONUÇLARI

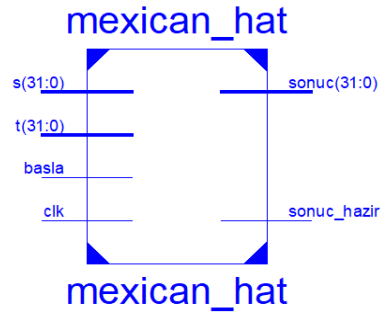
Bu çalışmada, meksika şapkası tasarımı için 32-bit IEEE 754-1985 kayan noktalı sayı standardına uygun olarak FPGA çipinde donanımsal olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan meksika şapkası donanım tanımlama dillerinden biri olan VHDL ile kodlanmıştır. Tasarım platform olarak Xilinx ISE

Design Suite 14.7 kullanılmış ve VIRTEX-6 çipi VC6VLX75T aracı FF784 paketi için sentezlenmiş ve test edilmiştir. Şekil 8'de meksika şapkası tasarımının blok şeması görülmektedir.



Şekil 8. Meksika Şapkası blok şeması

Tasarım sırasında kullanılan toplayıcı, çıkarıcı, bölücü ve çarpıcı gibi temel birimler, Xilinx ISE Design Tools tarafından geliştirilen IP Core Generator kullanılarak oluşturulmuştur. FPGA-tabanlı Meksika şapkası en üst seviye blok şeması Şekil 9'de görülmektedir.

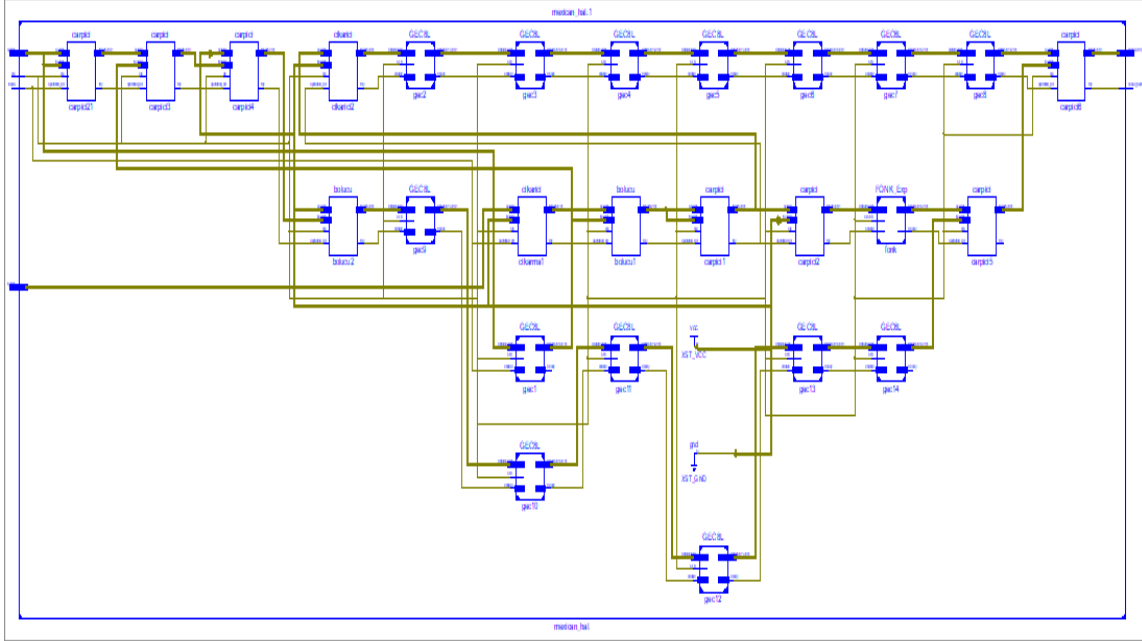


Şekil 9. FPGA-tabanlı Meksika Şapkasının en üst seviye blok şeması

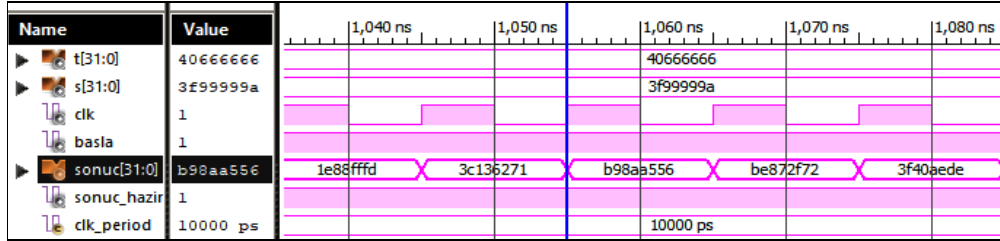
Tasarımı yapılan ünite üzerinde iki adet 32-bit kayan noktalı sayı standardına uygun "t" giriş sinyalini ve "s" ise ölçeklendirme parametresini ifade etmektedir. Ünitenin üzerinde bulunan 1-bit basla sinyali sistemin çalışması için gerekli olan kontrol sinyalini ve 1-bit clk sinyalini ise sistemin senkronizasyon sinyalini ifade etmektedir. Meksika Şapkası dalgacığı matematiksel ifadesinde bulunan τ (tau) değeri kaydırma parametresini belirtmektedir. τ değeri bu çalışmada tasarım içerisinde sabit olarak tanımlanmış ve değeri $\tau=1$ alınmıştır. Sistemin çıkışında ünitenin sonuç ürettiğini gösteren 1-bit *sonuc_hazir* sinyali ve Wavelet dönüşümü değerini saklayan 32-bit *sonuc* sinyali bulunmaktadır. Sisteme gerekli giriş sinyalleri uygulandıktan 94 saat darbesi (clock cycle) sonra ünite ilk sonucunu *sonuc* sinyali üzerinden üretmeye başlamakta ve bu anda *sonuc_hazir* sinyali '1' olmaktadır. Bu andan önce *sonuc_hazir* sinyalinin değeri '0' olmaktadır. Şekil 10'da ikinci alt seviye FPGA-tabanlı Meksika şapkası tasarımı ve Şekil 11'de FPGA-tabanlı meksika şapkası ünitesinin Xilinx ISE simulator sonuçları görülmektedir. Tasarımı yapılan FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesinin

sentezleme işleminin ardından Place-Route işlemi gerçekleştirilmiş ve sistemin maksimum çalışma frekansı ve çip istatistikleri incelenmiş ve sonuçlar aşağıdaki Tablo 1'de sunulmuştur. Meksika şapkası

tasarımı için bazı örnek test verilerinin Matlab sonuçları ile FPGA çipindeki sentez sonuçları Tablo 2' de verilmiştir.



Şekil 10. FPGA-tabanlı Meksika Şapkasının ikinci seviye blok diyagramı



Şekil 11. FPGA-tabanlı mexsika şapkası ünitesinin Xilinx ISE simulator sonuçları

Tablo 1. FPGA-tabanlı mexsika şapkası ünitesinin Çip Kullanım İstatistikleri

Logic Utilalazition	Used	Available	Utilization	Operatig frequency (MHz)
Number of Slice Regis.	9044	93120	9%	185.086
Number of Slice LUTs	10472	46560	22%	
Used of LUT-FF pair	6207	13309	46%	
Number of IOBs	99	360	27%	
Number of Block RAM/FIFO	1	156	0%	
Number of BUFG/BUFGCTRLs	1	32	3%	
Number of DSP48E1s	1	288	0%	

Tablo 2. Örnek test verilerinin Meksika şapkası tasarımı Matlab sonuçları ile FPGA çipindeki sentez sonuçlarının karşılaştırılması.

	Matlab sonucu	FPGA sonucu
t=4, s=0.8 değerleri için	0,008995666	0,008995638
t=0.5, s=1 değerleri için	-0,264049	-0,264034
t=3.6, s=1.2 değerleri için	0,081569877	0,081569344

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada meksika şapkası dalgacığının FPGA çipinde 32 bit IEEE 754-1985 kayan noktalı sayı formatındaki verilere göre çalışabilecek bir sayısal tasarım VHDL dili kullanılarak kodlanmış ve MATLAB ile karşılaştırılarak performans analizi çalışmaları karşılaştırılmıştır. Analizler neticesinde FPGA çipinde tasarlanan meksika şapkası dalgacığının ürettiği sonuçlar virgülden sonra 5-6 haneye kadar hassas hesap yapabildiği görülmektedir. FPGA üzerinde tasarlanan sistemin çalışma frekansı 185.06 MHz olarak belirlenmiştir. Tablo 2’de gösterildiği gibi donanım tabanlı tasarımın ürettiği sonuçlar gerçek sonuçlarla karşılaştırıldığında çok düşük bir hata ile elde edildiği görülmektedir. Matlab-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı tasarımı örnek veri setini 890 ms’de ve FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesi ise aynı veri setini 1.408 μ s’de hesaplayabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesi Matlab-tabanlı tasarıma göre oldukça yüksek hız kazancı sağlamıştır. İleride yapılacak çalışmalarda bu çalışmada önerilen FPGA-tabanlı Meksika şapkası dalgacığı ünitesi kullanılarak farklı uygulamalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] G. Serbes., N. Aydin., (2009). A new wavelet transform method for processing Doppler signals. In *Biomedical Engineering Meeting, 2009. BIYOMUT 2009. 14th National* (pp. 1-4). IEEE.
- [2] Ö. Coşkun., S. Çömlekçi., (2007). Wavelet teorisinin medikal alana uygulanması üzerine bir ön çalışma. *Akademik Bilişim’07-IX. Akademik Bilişim Konferansı*, 31, 317-320.
- [3] M. B. Hamaneh., N. Chitravas., K. Kaiboriboon., S. D. Lhato., K. A. Loparo., (2014). Automated removal of EKG artifact from EEG data using independent component analysis and continuous wavelet transformation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(6), 1634-1641.
- [4] A. Şengür., İ. Türkoğlu., M. C. İnce., (2009). Endoskopik Görüntülerin Değerlendirilmesinde Görüntü İşleme Temelli Akıllı Bir Karar Destek Sistemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1), 33-42.
- [5] A.R. Lindsey., (1997). Wavelet packet modulation for orthogonally multiplexed communication. *IEEE Transactions on signal processing*, 45(5), 1336-1339.
- [6] A. L. P. Hakan., (2007). A View Of Eastern Anatolian Ofault By Using Wavelet Analysis. *Nature Sciences*, 2(3), 232-240.
- [7] Ö. Demir., (2008). EEG Dalgalarının Wavelet (Dalgacık) Dönüşümü İle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD.
- [8] F. Vatansever., F. Uysal., A. Uzun., (2002). Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile Gürültü Süzme, 338-342.
- [9] Öner, İ.V., Yeşilyurt, M.K., Yılmaz E.F., (2017). "Wavelet Analiz Tekniği ve Uygulama Alanları." *Ordu Üniversitesi. Bilim Teknik Dergisi.*, Cilt:7, Sayı:1, 42-56.

- [10] J. Batlle., J. Martí., P. Rida., & J. Amat., (2002). A new FPGA/DSP-based parallel architecture for real-time image processing. *Real-Time Imaging*, 8(5), 345-356.
- [11] İ. Koyuncu., Ö. Çetin., F. Katırcıoğlu., M. Tuna., (2015). FPGA Tabanlı Sobel Operatör İle Kenar Belirleme Uygulaması Edge dedection application with FPGA based Sobel operator. *IEEE In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2015 23th* (pp. 1829-1832).
- [12] M. Alçın., İ. Pehlivan., İ. Koyuncu., (2016). Hardware design and implementation of a novel ANN-based chaotic generator in FPGA. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(13), 5500-5505.
- [13] M. Tuna., C. B. Fidan., İ. Koyuncu., İ. Pehlivan., (2016). FPGA Tabanlı IQ-Math Formatına Uygun Yüksek Hızlı Kaotik Osilatör Tasarımı, 4. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science.
- [14] İ. Koyuncu., A. T. Özcerit., (2016). The design and realization of a new high speed FPGA-based chaotic true random number generator, *Computers and Electrical Engineering*, *ELSEVIER* 58, 203-214.
- [15] R. Alpay, Abbak., (2007). Jeodezide Zaman Dizilerinin Dalgacık (Wavelet) Analizi”, Doktora Semineri Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [16] Ö. Altay., (2010). Dalgacık Analizi ile Yüksek Gerilim Aygıtlarından Alman İşaretlerin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [17] M. Alçın., İ. Koyuncu., I. Pehlivan., Linz-Sprott (1999). Kaotik Sisteminin Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesinde Farklı Eğitim Fonksiyonlarının Modelleme Performansına Etkisi.
- [18] K. Duran., (2013). Rüzgâr Karakteristiklerinin Dalgacık Dönüşümü İle Ortaya Konması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] A. Karadağ., (2009). Dalgacık Ağlarıyla Elektrokardiyografik Aritmilerin Sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [20] M. B. Kabataş., (2014). Suspended Sediment Load Prediction By Using Wavelet-Fuzzy Logic Combination Model, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University Graduate School Of Science Engineering And Technology.
- [21] İ. Koyuncu., İ. Şahin., (2011). FPGA Çipleri İçin Cordic Tabanlı Ex Hesaplama Ünitesi Tasarımı, *e-journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, (4), 1565-1572.
- [22] İ. Şahin., İ. Koyuncu., (2008). Grafik Sistemleri İçin Fpga Cihazlarında Çalışmak Üzere Tasarlanmış Matris Çarpım Motoru. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 61-68.
- [23] A.N. Akpolat., (2015). FPGA Tabanlı Nesne Algılama, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.