



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.10.2022
Kabul Tarihi : 14.12.2022

Received Date : 25.10.2022
Accepted Date : 14.12.2022

KESİR DERECELİ KAOS TABANLI HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN FPAA TASARIMI

FPAA DESIGN OF FRACTIONAL CHAOS BASED COMMUNICATION SYSTEMS

Gökçenur KAYA^{1*} (ORCID: 0000-0001-5768-4659)
Kenan ALTUN² (ORCID: 0000-0001-7419-1901)

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Müh. ABD, Sivas, Türkiye
²Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Sivas, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gökçenur KAYA, kayagokce111@gmail.com

ÖZET

Kaotik sinyaller kendi içerisinde bir düzeni olan ancak düzensiz davranış sergileyen tahmin edilmesi zor sinyallerdir. Kaotik sinyallerin en önemli kullanım alanlarından biri güvenli haberleşme sistemleridir. Haberleşme sisteminin güvenilirliği kaotik işaretin karmaşıklığına bağlıdır. Kaotik sinyallerin karmaşıklığını artıran birçok yöntem ile haberleşme sistemleri gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin BER/SNR performansına artırmaktan çok sistemin güvenilirliğini artırmıştır. Kesir dereceli kaotik sinyallerin kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde hem haberleşme güvenilirliğinin hem BER/SNR performansının artmasına olumlu etkisi olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle çalışmada kesir dereceli kaotik tabanlı haberleşme sistemlerinin BER/SNR performansının bilgisayar benzetimi ile dinamik sistemin nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzetim analog tabanlı FPAA yapılar kullanılarak deneysel olarak tekrarlanmıştır. Elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar tam dereceli benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaotik haberleşme, kesir dereceli analiz, FPAA, bit hata oranı

ABSTRACT

Chaotic signals are difficult to predict signals that have an order in themselves but exhibit disordered behavior. One of the most important usage areas of chaotic signals is secure communication systems. The reliability of the communication system depends on the complexity of the chaotic signal. Communication systems are implemented with many methods that increase the complexity of chaotic signals. It has increased the reliability of the system rather than increasing the BER/SNR performance of these methods. It is thought that fractional chaotic signals may have a positive effect on increasing both communication reliability and BER/SNR performance in chaos-based communication systems. For this reason, numerical analysis of the dynamic system was carried out by computer simulation of the BER/SNR performance of fractional chaotic based communication systems. In addition, the simulation was repeated experimentally using analog based FPAA structures. The obtained simulation and experimental results were compared with similar studies of integer-order.

Keywords: Chaotic communication, fractional analysis, FPAA, bit error rate

GİRİŞ

Kaos, kendi içerisinde bir düzeni olduğu halde düzensiz davranış sergileyen sistemleri inceleyen bilim dalıdır. Fransız matematikçi Henri Poincare kaos teorisi ile ilgili ilk olarak yirminci yüzyılların başlarında basit dinamik denklemler ile karmaşık davranış gösteren sistemlerin tanımlanabileceğini ortaya koymuştur (Holmes, 1990). Kaotik sistemlere ait denklemler zaman domeninde analiz edildiğinde periyodik olmayan davranış sergilemelerine rağmen faz uzayı gösteriminde bir düzen içerisinde hareket eder. Kaotik sinyaller başlangıç değerlerine hassas bağlılığı, periyodik olmaması, geniş bant yapısına sahip olmasının yanı sıra uzun periyotlarda tahmin edilemeyen sinyallerdir (Ott vd., 1990). Kaotik sinyallerin bu özellikleri bilimsel olarak bazı problemlerin çözümüne önemli katkılar sunmuştur (Lorenz, 1963). Kaos teorisinin bilimsel alandaki ilk uygulaması 1960'lı yıllarda Edward Lorenz tarafından yapılmıştır (Lorenz, 1963). Kaos sinyallerinin uzun periyotlarda tahmin edilememesi özellikle haberleşme sistemlerinde bilgi güvenilirliğini de artırmak için önemli bir parametre olmuştur. Kaotik tabanlı haberleşme sistemlerinde kaos sinyaller taşıyıcı sinyal olarak kullanılan en temel yapıdır. Kaos sinyallerin yayılı spektruma sahip olmasından dolayı, haberleşme sistemlerinde bilgi sinyallerinin arka planda gizlenmesini ve alıcı devreye güvenli ulaşmasını sağlar. Bu nedenle kaos sinyallerinin karmaşıklığı aynı zamanda haberleşme sistemlerinin de karmaşıklığını artırmakla beraber güvenilirliğini de artırmaktadır. Bu nedenle haberleşme sisteminin güvenilirlik karakteristiği aynı zamanda kaotik sinyallerin tahmin edilebilir olma karakteristiğini yansıtır. Kaos tabanlı osilatörlerin ürettiği sinyaller yayılı spektruma sahip, tahmin edilemeyen ve gürültü benzeri sinyaller olarak bilinmektedir. Kaos tabanlı osilatörlerin dinamik denklemlerinin deterministik yapılarına rağmen sistem davranışının tahmin edilememesi, başlangıç değer ve parametre hassasiyeti güvenilir haberleşme sistemleri için önemli bir karakteristik olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca kaotik sinyallerin yayılı spektrumda olması sürekli senkronizasyon gerektirmeyen non-coherent haberleşme sistemlerine ilgiyi artırmaktadır. Kaos tabanlı haberleşme sistemleri içerisinde sürekli senkronizasyon gerektirmeyen ve anlık senkronizasyon ile iletilen sinyaller tekrar elde edilebilir (Kennedy ve Kolumban 2000; Cuomo vd., 1993). Haberleşme sistemlerinde taşıyıcı işaretin sürekli senkronizasyonu, anlık senkronizasyonun kullanıldığı durumlarda gerekli değildir. Bu hem kaotik işaretlerin hemde periyodik işaretlerin taşıyıcı olarak kullanıldığı sistemler için geçerlidir (Chua vd., 1987). Bu durumda, alıcı devreler taşıyıcı sinyalleri elde ederek bilgi sinyalini yeniden elde etmesine olanak sağlar. Kaotik tabanlı non-coherent haberleşme sistemlerinden Chaos shift keying (CSK) (Dedieu vd., 1993), Chaotic on off keying (COOK) (Abdullah ve Valenzuela, 2011), Differential Chaos Shift Keying (DCSK) (Kolumbán, 1997; Kolumban vd., 1996), Quadrature chaos shift keying (QCSK) (Chua ve Yang, 1988) bu tekniklerden bazılarıdır. Doğrusal olmayan dinamik bir sistemde, sistemin kaosa girmesi ve kaotik davranış sergilemeye devam etmesi için durum denklem sayısının en az üç olması gerekir. Ayrıca bu durum denklemlerinin içinde ise en az bir adet doğrusal olmayan terim bulunmalıdır (Peitgen vd., 2006). Bazı araştırmacılar kaotik davranış gösteren dinamik sistemlerin toplam derecelerinin 3'ten az olması durumunda da kaos sergilediğini göstermektedir (Petráš ve Bednárová, 2011). Bu durum kaotik sistemlerde tahmin edilebilirliği daha da zorlaştırmaktadır. Doğrusal olmayan bir denklemin kaotik davranış sergilediği kesir derecesi de dinamik yapıya fazladan bir karmaşıklık getirmektedir. Böylelikle mevcut parametrelerin de katkısıyla kaotik sistemlerin karmaşık yapısı artırılmıştır (Petráš ve Bednárová, 2011).

Kesir dereceli türev ve integratörlerden ilk olarak 1695 yılında Leibniz tarafından bahsedilmiş olsa da 19. yüzyılın sonunda Liouville ve Riemann tarafından ortaya konulmuştur (Nishimoto, 1984; Oldham ve Spanier, 1974). Kesir dereceli hesaplamalar birçok problemin tam olarak ifade edilebilmesine ve çözülmesine katkı sağlamıştır (Oustaloup vd., 2000). Aslında birçok tam dereceli model kesir dereceli modelin yakınsatılmış haliyle modellenmiştir. Bu durum özellikle başlangıç ve parametre değerlerine hassasiyeti olan doğrusal olmayan sistemleri tam olarak temsil edememektedir. Kesir dereceli sistemlerin kullanımı ile özellikle doğrusal olmayan sistemlerde, elektrik sistemlerinde ve kontrol sistemlerinin tasarımlarında önemli katkı sağlamıştır (Udita, 2014; Herzallah, 2014; Jin vd., 2011; Petráš, 2011). Kesir dereceli kontrol sistemlerinin tam dereceli kontrol sistemlerine göre özellikle doğrusal olmayan sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur (Ma vd., 2014). Kesir dereceli operatörlerin kullanılmasıyla doğadaki problemlerin modellenmesi ve tamsayı dereceli denklemlerle elde edilen modeller karşılaştırıldığında daha kesin sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir (Petráš ve Bednárová, 2011). Kesir dereceli türev ve integratörler Grünwald–Letnikov's gibi birçok yöntemle tanımlanmıştır (Podlubny, 1999). Ancak kesir dereceli sistemlerin ayırık devre elemanları ile gerçekleştirilmesinde önemli zorluklar yaşanmıştır. Bu problemlerin aşılmasında programlanabilir platformlar kullanılarak çözüm aranmıştır.

Kaos tabanlı elektronik devre tasarımında ayırık devre elemanlarının kullanılması oldukça zor, bazı durumlarda ise imkansızdır. Bu nedenle tümleşik devre tasarımları kullanılmaktadır. Tümleşik yapılardan en popüler, hızlı ve kolay olanı FPGA (Field Programmable Gate Arrays) yapılarıdır. Ancak sayısal tabanlı FPGA gibi yapıların yuvarlama

hataları ile kaotik işaretler kullanılarak gerçekleştirilen haberleşme sistemlerinin avantajlarını sınırlamaktadır. Bunlardan dolayı tümeşik analog tabanlı bir yapının kullanılması kaos tabanlı haberleşme sistemleri için zorunluluk olmuştur. FPAA (Field Programmable Analog Arrays) yapılar analog tabanlı olmaları ve kaotik işaretlerin tahmin edilebilirlik gibi birçok avantajlarının haberleşme sistemlerinde kullanılabilmesine imkan sağlaması açısından önemlidir. Dolayısıyla yapılan çalışma özellikle deneysel olarak gerçekleştirilmiş olma açısından önemlidir.

Çalışmanın Materyal ve Yöntem kısmında Grünwald–Letnikov’s yaklaşım yönteminden bahsedilmiş ve kesir derecelerinin elde edilmesi açıklanmıştır. Ayrıca kaotik tabanlı haberleşme sistemleri ve senkronizasyonundan bahsedilmiş ve deneysel olarak gerçekleştirilecek FPAA platformu açıklanmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümünde ise Sprott_h kaotik dinamikleri Grünwald–Letnikov’s yaklaşım yöntemi ile modellenerek kesir dereceli modellenen kaotik sinyalin benzetimi ve analog tabanlı deneysel uygulama sonuçları elde edilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ve nümerik değerlendirmeler yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Sayısal tabanlı haberleşme sistemlerinde verici devrede bilgi sinyali taşımada kullanılan doğrusal olmayan yapıdaki taşıyıcı kaos sinyallerinin orthogonal yapılarının BER/SNR (Bit Error Rate / Signal Noise Rate) performansında önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Bu nedenle dinamik denklemin gerçek sistem davranışının elde edilebilmesi sistemin daha kısa sürede senkronizasyona girmesini sağlayacaktır. Haberleşme sistemi alıcı-verici arasında ne kadar kısa sürede senkronize olursa en fazla kayıpların yaşandığı senkronizasyon sürecinde BER/SNR performansını artıracaktır. Bu nedenle kaotik sistemin gerçek sistem davranışının kesir dereceli tasarım ile sağlanabilecektir. Ayrıca sistemin deneysel platformunun da sistem performansına doğrudan etkisi vardır. Kesir dereceli sistemlerin ayrık devre elemanlarıyla gerçekleştiriminde aktif ve pasif devre elemanlarının seçim ve kullanımında birçok zorluklarla karşılaşmıştır. Bu nedenle esnek kullanım ve yüksek hızları nedeniyle sayısal tabanlı FPGA yapıları kullanılmaktadır (Tolba vd., 2018). Ancak sayısal tabanlı sistemlerin uzun periyotlardaki yuvarlama hatalarından kaynaklı düşük hassasiyeti, modellenen sistemlerin tam olarak gerçek sistem davranışını sergileyememesine neden olur. Analog tabanlı ayrık devre elemanları kullanılarak bu yapıların gerçekleştirimindeki zorluklar analog tabanlı FPAA yapılarının kullanılmasını gerektirmektedir. Böylelikle elde edilen yeni yapılar kullanılarak gerçekleştirilen haberleşme sistemlerinde bit hata oranı performansının artırılması amaçlanmıştır. Kesir dereceli türevlerin birçok tanımı vardır. Çalışmada Grünwald-Letnikov yaklaşım metodu kısaca açıklanmıştır.

Grünwald-Letnikov Metodu ile Kesir Dereceli Analiz

Kesirli analizde yaygın olarak kullanılan bir başka popüler tanım, Anton Karl Grünwald ve ardından Aleksey Vasilievich Letnikov tarafından önerilmektedir (Petráš, 2011). Riemann-Liouville tanımlarından farklı olarak, Grünwald-Letnikov tanımları probleme temel türev kavramından yaklaşır. Kesirli türev için birçok tanım vardır. Grünwald-Letnikov tanımlamasına göre, α derecesi için eşitlik Denklem (1) ile ifade edilir.

$${}_a D_x^\alpha f(x) = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{\Delta_h^\alpha f(x)}{h^\alpha} \quad (1)$$

D, diferintegral operatörü ve h adım sayısı olarak tanımlanmaktadır. Denklem (2) ile $\Delta_h^\alpha f(x)$ verilmektedir;

$$\Delta_h^\alpha f(x) = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(x - jh) \quad (2)$$

olarak tanımlanırsa, sonuçların toplamının r’ye kadar yapılmasını denklem (3) ile;

$$\sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{\alpha}{j} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{\Gamma(r+1-\alpha)}{\Gamma(r+1)} \quad (3)$$

$\Gamma(x)$ gama fonksiyonudur ve h zaman içinde küçük bir değişikliktir ve $h = \frac{(x-a)}{r}$ ile ifade edilir. Son olarak Grünwald-Letnikov tanımı denklem (4) ile ifade edilmektedir.

$${}_a D_x^\alpha f(x) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\left(\frac{(x-a)}{r} \right)^{-\alpha}}{\Gamma(-\alpha)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\Gamma(j-\alpha)}{\Gamma(j+1)} f \left(x - j \left(\frac{(x-a)}{r} \right) \right) \right\} \quad (4)$$

Denklem (4) ile verilen eşitlikte a başlangıç değerini, α rasgele bir sayıyı ve Γ Euler Gama fonksiyonunu tanımlamaktadır. Genel olarak, D hem integral alıcı hem de türev alıcıları ifade etmek için kullanılabilir. a türev alıcılar için pozitif ve integral alıcılar için negatiftir.

Kaos Tabanlı Haberleşme Sistemleri ve Senkronizasyon

Kaotik sinyaller, rastgele benzeri yapıları ve geniş güç spektrumları ile karakterize edilir. Böylece, kaotik sinyallere bilgi saklayarak, veri güvenliğini önemli ölçüde artırmak mümkündür. Kaotik sinyaller, geniş bantlı olmaları nedeniyle geleneksel yayılı spektrumlu sinyallerin avantajlarını devralırlar. Kaotik sinyaller, düşük güç spektral yoğunluğu ve büyük bant genişliklerine sahip yayılı spektrum sinyallerdir. Bu özelliklerinden dolayı bilginin gizlenmesine yardımcı olur ve bilgi sinyalinin fark edilmesini engeller. Ayrıca, başlangıç koşullarına ve parametre değişimlerine hassas bağımlılığın bir sonucu olarak çok sayıda yayılan dalga biçimi kolaylıkla üretilebilir. Böylelikle kaotik tabanlı haberleşme sistemleri, geniş band spektrumuna sahip düşük maliyetli ve güvenli bir haberleşme yöntemi sağlar. Önerilen yöntemlerin çoğunda temel olarak, sayısal tabanlı bilgi sinyallerini periyodik olmayan kaos işaretleri ile anahtarlamaktır. Örneğin, kaos kaydırmalı anahtarlama (CSK) haberleşme sisteminde, bir çatalanma parametresinin farklı değerlerini kullanan dinamik bir sistemden veya birkaç farklı dinamik sistemden üretilen farklı kaos sinyalleri bilgi sinyalleri ile anahtarlanarak eşlenmesi sağlanır. Alıcı devrede taşıyıcı sinyal olan kaos sinyali senkronize edilmişse iletilmek istenen bilgi sinyali yeniden elde edilebilir (Kolumban vd., 1998; Dedieu vd., 1993; Parlitz vd., 1992). Bu haberleşme sistemlerine coherent haberleşme sistemi, senkronize sağlanmadan bilgi sinyallerinin elde edilmesini sağlayan haberleşme sistemlerine ise non-coherent haberleşme sistemi denilmektedir (Kennedy ve Kolumban (2000). Sayısal tabanlı bilgi sinyalinin iletilmesini sağlayan bir diğer modülasyon tekniği, diferansiyel anahtarlama yaklaşımına dayanan, diferansiyel kaos kaydırmalı anahtarlama (DCSK) olarak bilinir (Kolumban vd., 1996). Bu haberleşme sisteminde, alıcı devrede taşıyıcı kaotik sinyal senkronize edilmeden bilgi sinyali elde edilir. DCSK haberleşme sisteminde iletilen her sembol, iki kaotik sinyal örnek seti ile temsil edilir. Birincisi referans örneklenen sinyali, ikincisi ise bilgi sinyalinin örneklemini ifade eder. Alıcı devrede, iki kaotik örneklemin ilişkilendirilmesiyle basit bir şekilde korelatör çıktısını bir eşik değeri ile karşılaştırarak bilgi sinyali ayırt edilebilir. Ayrıca kaotik sinyallerin üretilmesi kolaydır, böylece yayılı spektrumlu sistem yapısına nispeten düşük maliyetli bir yöntem sunar.

PC(Pecora-Carroll) senkronizasyon yöntemi, kaos tabanlı haberleşme sistemleri için en temel sürekli senkronizasyon yöntemlerindedir. PC yönteminde alıcı-verici devrede kaos sinyaller senkronize edilir. Bunun için dinamik yapılardan bir durum değişkeni alıcı devreye iletilir. Haberleşme sisteminde durum değişkeninin üretildiği kısım sürücü (master), yeniden durum değişkeninin elde edildiği kısım ise cevap (slave) olarak adlandırılır. PC yönteminde sürücü ve cevap kısımlarındaki dinamik denklemler sürekli olarak senkronize olurlar (Cuomo vd., 1993; Pecora ve Carroll, 1990). Pecora ve Carroll tarafından önerilen yöntemde verici ve alıcı devrelerdeki dinamik yapıların sürekli senkronizasyonda kalabilmeleri için verici ve alıcı devrelerdeki dinamik yapıların Lyapunov üstellerinin negatif olması gerekmektedir.

Verici ve alıcı devrelerde dinamik yapıların senkronize olmalarını sağlayan bu yöntemde;

$$\dot{u} = f(u), \quad u = (u_1, \dots, u_n) \quad (5)$$

Denklem (5) ile tanımlanan kaotik yapı,

$$\begin{aligned} \dot{v} &= g(v, w) \\ \dot{w} &= h(v, w) \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6) gibi iki gruba ayrılır. m ve n dinamik sistemlerin hücre indeksini ifade eder. Buna göre;

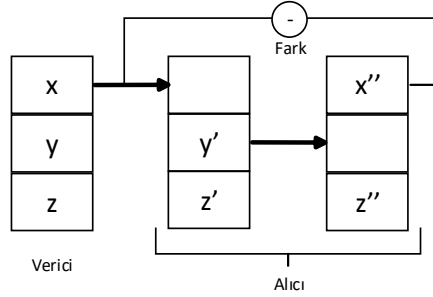
$$v = (v_1, \dots, v_m), \quad g = (g_1, \dots, g_n), \quad w = (w_1, \dots, w_{n-m}), \quad h = (h_1, \dots, h_{n-m}) \quad (7)$$

denklemleri elde edilir ve nihai elde edilen denklem 8 ile ifade edilir. Böylelikle verici devrede iletilen w durum değişkeni, alıcı devrede w' olarak gösterilir.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= g(v, w) \\ \dot{w} &= h(v, w) \\ \dot{w}' &= h(v, w') \end{aligned} \quad (8)$$

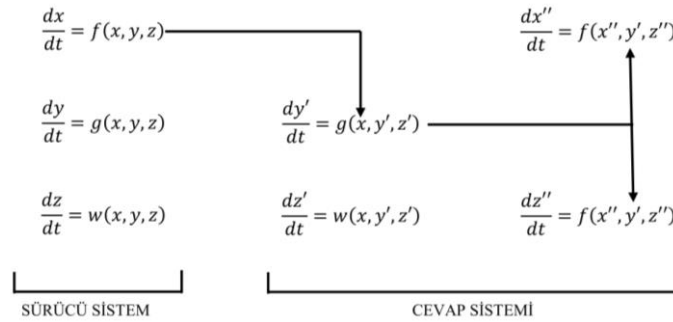
PC tekniğinde sürücü ve cevap kısımları senkronize olana kadar belli bir süre geçmektedir. Senkronize olduklarında iletilen durum değişkeninin hata payı sıfır olur ve sistemin Lyapunov üstellerinin negatif değer alır (Linsay, 1981).

Şekil 1 PC senkronizasyon tekniğinin blok diyagramını göstermektedir. Diyagramda verici devrede sürücü sistem ve alıcı devrede cevap sistemine ait gösterim bulunmaktadır.



Şekil 1. PC Senkronizasyon Sisteminin Blok Diyagramı

Ayrıca PC tekniğine ait denklemlerle ifade edilen bir diğer gösterim ise Şekil 2 ile gösterilmektedir.



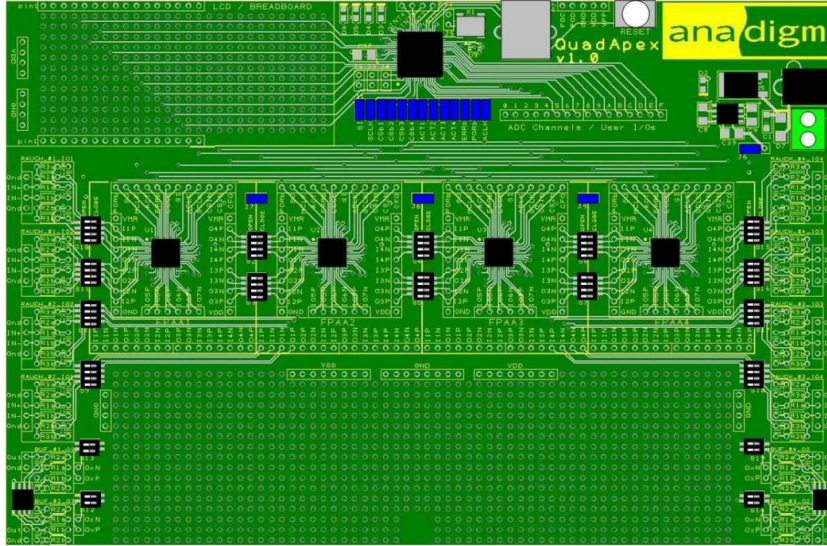
Şekil 2. PC Senkronizasyon Sisteminin Denklemler ile Gösterimi

PC tekniğinde sürücü ve cevap sisteminde durum değişkeni senkronize olana kadar bir zaman geçmektedir. Senkronizasyondaki bu gecikme haberleşme sisteminde kayıplara neden olur. Haberleşme sisteminin senkronizasyon süresinin kısaltılması bu bilgi kayıplarını da azaltır.

Analiz incelendiğinde sürücü ve cevap sisteminde senkronizasyon sağlanabilmesi için bir zaman geçmesi gerekmektedir. Bu zaman içerisinde ise hata fonksiyonu oluşmaktadır.

FPAA Tabanlı Analog Tasarım

Günümüzde birçok problemin çözümü elektronik devre kontrollü sistemler ile gerçekleştirilmektedir. Bu devrelerin çoğunun sayısal tabanlı olması ve bu devrelerin bazı büyüklükleri tam olarak karşılayamaması sistemlerden beklentileri tam olarak karşılayamamaktadır. Dünyadaki birçok büyüklüğün analog olması bu büyüklüklerin kontrollünde de analog tabanlı tümeşik devrelerin kullanılması bir zorunluluk olmuştur. Ancak analog devrelerin tasarımında ayırık devre elemanlarının kullanımındaki zorluklar devre tasarımlarında kolay, ekonomik platformlar bir gereklilik haline gelmiştir. Yeniden yapılandırılabilen ve yeniden programlanabilen bir devre platformu olan FPAA, analog fonksiyonları kullanarak zengin sistem çeşitliliğinin gerçekleştirilmesinde öne çıkmaktadır. FPAA, analog fonksiyonlar da dahil olmak üzere çok çeşitli sistemlerin uygulanması için programlanabilir bir platformdur. Bu platform, bileşen değerlerini ve ara bağlantılarını programlı olarak değiştirmek için kullanılabilen bir özelliğe sahip olduğundan, dinamik olarak yeniden yapılandırılabilir. Bu, yeniden yapılandırılabilir FPAA cihazı ile bir tasarım değişikliğinin veya tamamen yeni bir tasarımın uygulanabileceği anlamına gelmektedir. Bu işlem için sistemi kapatmaya veya sistemi sıfırlamaya gerek yoktur. Bu özelliklere ek olarak FPAA analog dinamik sistem tasarımları için daha verimli ve ekonomik çözümler sunar. FPAA'ler kullanılarak, farklı kaotik sistemler dahil olmak üzere çeşitli dinamik sistemler daha az maliyetle, çok daha küçük boyutta ve artırılmış güvenilirlik ve bileşen kararlılığı ile uygulanabilir. Deneysel çalışmalarda Şekil 3'de gösterilen Anadigm AN231K04-QUAD4 Quad geliştirme kartı kullanılmıştır.



Şekil 3. Anadigm AN231K04-QUAD 3.3V Geliştirme Kartı

Diğer taraftan FPGA gibi sayısal tabanlı platformların ondalıklı kesirlerdeki yuvarlama hatasından dolayı, bir süre sonra kendini tekrarlaması analog tabanlı tasarımlarda kullanılabilirliğini azaltmıştır. Bu nedenle analog tabanlı programlanabilir yapılar ön plana çıkmaktadır. Çalışmalar neticesinde analog tabanlı programlanabilir FPAA yapılar ortaya konmuştur. FPAA'ler aslında FPGA'lerin analog eşdeğeri olarak düşünebilir. Yapısında bulundurduğu Yapılandırılabilir Analog Bloklar (Configurable Analog Blocks, (CAB)) sayesinde kuvvetlendirme, filtreleme, toplama/fark alma, integral alma ya da karşılaştırma gibi çeşitli analog işlemler gerçekleştirilir. 4 tane CAB bloğuna sahip olan FPAA yapısı Şekil 3'de görülmektedir. Bir ara yüz programı ile tasarlanan FPAA modelleri daha sonra karta yüklenerek deneysel sonuçlar elde edilir. FPAA yapılar, haberleşme (Salih, 2021; Günay ve Altun, 2017), sinyal işleme (Schlottmann ve Hasler, 2013; Hall vd., 2005), kontrol (Li vd., 2017), yapay sinir ağları (Moreno vd., 2021; Günay ve Altun, 2018; Hasler ve Shah, 2017), kaotik osilatörler (Altun, 2021) ve diğer mühendislik uygulamaları (Kozioł, 2020; Yong vd., 2012; Baccigalupi ve Liccario, 2007) gibi birçok alanda kullanılmıştır.

FPAA üzerinde uygulanmak istenen kaotik sistemin uygulamadan önce matematiksel analizleri ve bilgisayar simülasyonu yapılır. Simülasyon sonuçlarına göre sistemde yer alan durum değişkenlerinin gerilim seviyeleri belirlenir. FPAA kartları ± 1.5 V'luk bir sınır değerlerine sahiptir. Bu sebepten dolayı belirlenen gerilim değerlerinin ± 1.5 V'tan büyük olması halinde sisteme ölçeklendirme işlemi uygulanır. Burada amaç sistemde yer alan durum değişkenlerinin sahip olduğu gerilim seviyelerini farklı katsayılara bölerek ± 1.5 V seviyesi aralığında tutmaktır. Ölçeklendirme işlemi sonrasında elde edilen sisteme Laplace dönüşümü uygulanarak SumFilter bloğu yapısına uygun hale getirilir. Daha sonra sistemin Laplace dönüşümü alınmış hali FPAA uygulaması için hazır hale gelmiştir. Bu noktada AnadigmDesigner2 ara yüzü kullanılarak modelleme işlemine geçilir. Modellenen sistemde bulunan değişkenlere uygun CAM kütüphanesinden hazır bloklar seçilir ve modelleme gerçekleştirilir. Kullanılan her bir CAM modülünün farklı ayarlamaları bulunmaktadır. Frekans, kazanç değeri, girişlerin sayısı ve durumu (eviren/evirmeyen) gibi parametreler tanımlanır. Deneysel düzenek de hazırlanınca elde edilen model FPAA kartına seri bir port aracılığıyla yüklenir. Kart üzerinde giriş/çıkış bağlantıları yapıldıktan sonra deneysel sonuçlar analog veya dijital bir osiloskop aracılığıyla gözlemlenir. Bu sonuçların simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olması halinde FPAA uygulamasında başarılı olunmuştur. Aksi takdirde oluşturulan FPAA modelinin kazanç değerlerinde veya kullanılan frekans değerlerinde düzenlemeler yapmak gerekmektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

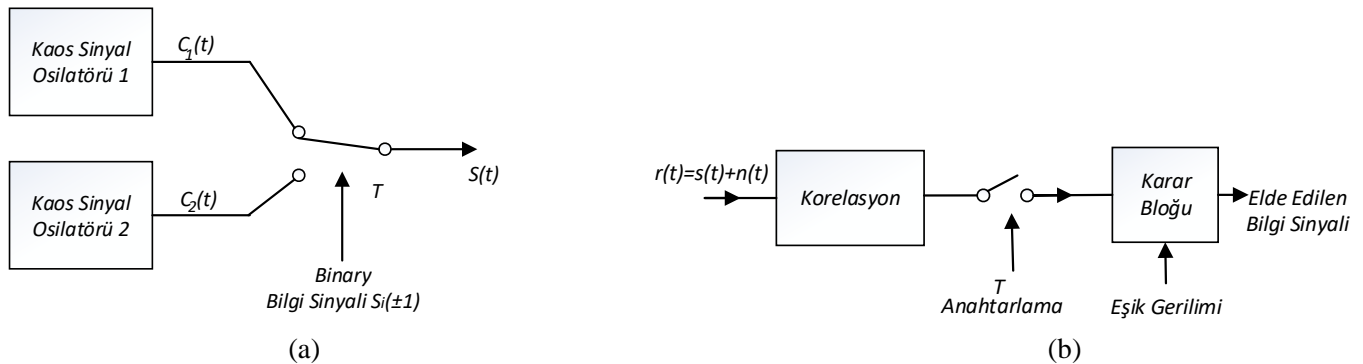
Yapılan çalışma ile kesir dereceli kaotik sinyallerin analog tabanlı FPAA yapıları kullanılarak kaotik haberleşme sistemlerinin tasarımı amaçlanmıştır. Kesir dereceli integratör kullanılarak elde edilen kaotik sinyallerin tahmin edilebilirliği azaltılarak özellikle haberleşme sistemlerinde daha güvenilir bir taşıyıcı sinyalin elde edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca analog tabanlı FPAA yapısı kullanılarak sayısal tabanlı FPGA yapılarında kaotik sinyallerdeki uzun periyotlardaki yuvarlama hatalarından kaynaklanan periyodikliğe girme probleminin aşılması amaçlanmıştır. Çalışma ile kesir dereceli dinamik sistemler Grünwald-Letnikov's yaklaşım yöntemi ile tasarlanarak benzetim sonuçları elde edilmiştir.

Kaotik sistemler geleneksel hesaplama yöntemleri ile en az üçüncü dereceden dinamik sistemlerle ifade edilebilmekteydi. Kesir dereceli sistem yaklaşımlarında kaotik bir sistemin modellenmesi için kesir dereceli bir türev alıcı kullanılmaktadır. Bu çalışmada MATLAB Simulink çalışması ve analog tabanlı FPAA deneysel çalışması için kesir derecesi, frekans domeninde ifade edilmiştir. Bunun için Grünwald–Letnikov’s yaklaşım metodu kullanılmıştır. Öncelikle Simulink daha sonrada FPAA uygulaması yapılacak Sprott_h kaotik sistemi için frekans domeninde kesir dereceli transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Sprott H sistemi için durum denklemleri aşağıda verilmiştir (Sprott, 1994).

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -y + z^2 \\ \frac{dy}{dt} &= x + 0,5y \\ \frac{dz}{dt} &= x - z\end{aligned}\quad (9)$$

(9) nolu denklemlerde x, y, z durum değişkenlerini (*state controls*), ifade etmektedir. Sistemin başlangıç şartları $x(0)=0.05$, $y(0)=0.05$, $z(0)=0.05$ şeklindedir.

Çalışmada DCC (Direct Chaotic Communication) haberleşme sistemlerinden CSK haberleşme sistemi kullanılmıştır. Bunun nedeni basit yapısı nedeniyle FPAA CAB ‘lerin içerisine sığabilmesidir. CSK haberleşme sistemi bilgi sinyaline göre Sprott_h kaotik sinyalin iki durum değişkeninin anahtarlama ile modülasyonu elde edilir. Bu sinyale ortam gürültüsü eklenir. Aşağıdaki verici blok şemasında bu anahtarlama modellenmiştir.



Şekil 4. a) CSK Verici Blok Şeması, b) CSK Alıcı Blok Şeması (Dedieu vd., 1993)

Denklem (10) ile verici blok şeması ifade edilmek istenirse CSK modülasyon sisteminde iletilen bilgi sinyali için anahtarlama $c_1(t)$ ve $c_2(t)$ kaotik durum denklemleri gösterilmiştir.

$$s(t) = \begin{cases} c_1(t), & \text{'1' bilgisi iletildiğinde} \\ c_2(t), & \text{'-1' bilgisi iletildiğinde} \end{cases}\quad (10)$$

Denklem (11) ile vericide elde edilen modüleli sinyale eklenen gürültü sinyali gösterilmektedir.

$$s_{CSK}(t) = s(t) + n(t)\quad (11)$$

Alıcı girişinde gürültü eklenen modüleli sinyal denklem (12) ile gösterilmektedir. Şekil 4. (b) ile gösterilen alıcı blok şemadaki $s_{CSK}(t)$ sinyali alıcı girişinde korelasyonu tabii tutularak integrali alınmaktadır.

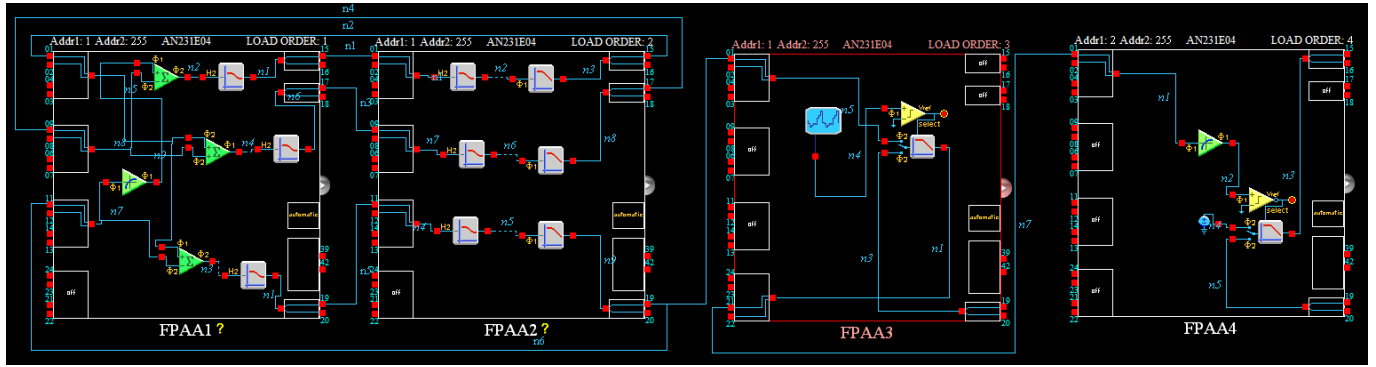
$$\begin{aligned}z_i &= \int_T r^2(t) dt = \int_T [s(t) + n(t)]^2 dt \\ &= \int_T s^2(t) dt + 2 \int_T s(t) \cdot n(t) dt + \int_T n^2(t) dt\end{aligned}\quad (12)$$

İntegratör çıkışındaki sinyal eşik karar bloğuna uygulanarak elde edilen sinyal sıfırdan büyükse +1 olmakta değilse sıfır olmaktadır. Böylece verici devreden iletilen sinyal kaotik taşıyıcı kullanılarak alıcı devreye iletilmiş ve bilgi

sinyali elde edilmiştir. Çalışmanın deneysel gösterimi Şekil 5 ile gösterilmiştir. Şekil 6’da ise FPAA ile haberleşme sisteminin tasarımı verilmektedir.



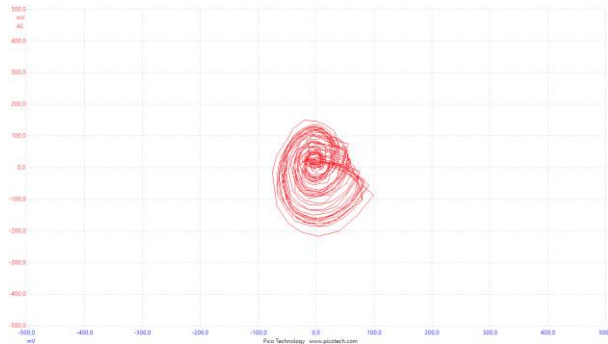
Şekil 5. AN231K04-QUAD4 Tipi FPAA Geliştirme Kartı ve Picoscope Osiloskop Deneysel Kurulum



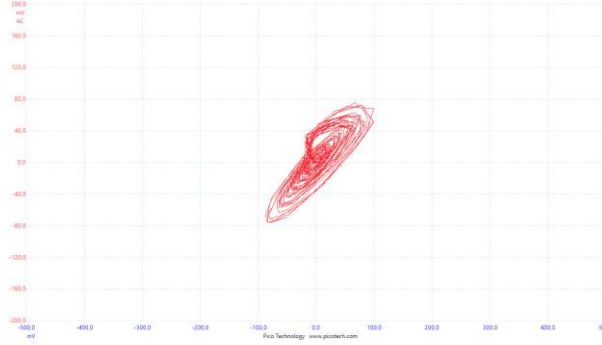
Şekil 6. AnadigmDesigner2 Gerçekleştirim Şeması

Şekil 6’da gösterildiği gibi tasarlanan haberleşme sisteminde kullanılan blokların işlevleri ise Tablo 1 ile açıklanmıştır. Buna göre; “FILTERBILINEARBLOCK-POLE AND ZERO” bloğu kesir derecesi hesaplanan dinamik denklemdeki kutup ve sıfır noktalarının frekans aralığının belirlenmesini, “FILTERBILINEARBLOCK-LOW PASS” bloğu kesir derecesi hesaplanan dinamik denklemdeki alçak kesim frekanslarının belirlenmesini, “SUMDIFF BLOCK” girişindeki değerlerin toplanmasını, “TRANSFER BLOCK” girişindeki sinyal değerine göre matematiksel ifadelerin hesaplanmasını, “GAINSWITCH BLOCK” referans değerine göre anahtarlama yaparak giriş seçiminin yapılmasını, “PERIODIC WAVE BLOCK” istenilen değerlerde sinyal üretimini, “DC VOLTAGE SOURCE BLOCK” denklemlerdeki sabit değerlerin üretilmesinde kullanılır.

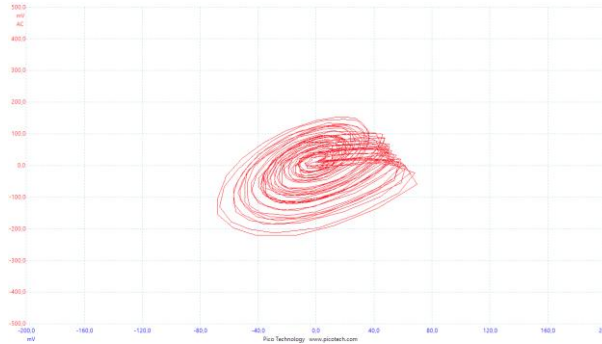
Çalışmada taşıyıcı işaret olarak kullanılan Sprott_h kaotik sisteme ait Şekil 7 ile x-y faz uzay gösterimi, Şekil 8 ile x-z faz uzay gösterimi ve Şekil 9 ile y-z faz uzay gösterimi verilmiştir.



Şekil 7. Sprott H Kaotik Osilatörün FPAA Platformunda x-y Faz-Uzay Gösterimi

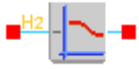
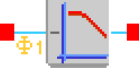



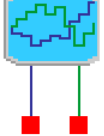
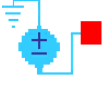


Şekil 8. Sprott H Kaotik Osilatörün FPAA Platformunda x-z Faz-Uzay Gösterimi



Şekil 9. Sprott H Kaotik Osilatörün FPAA Platformunda y-z Faz-Uzay Gösterimi.

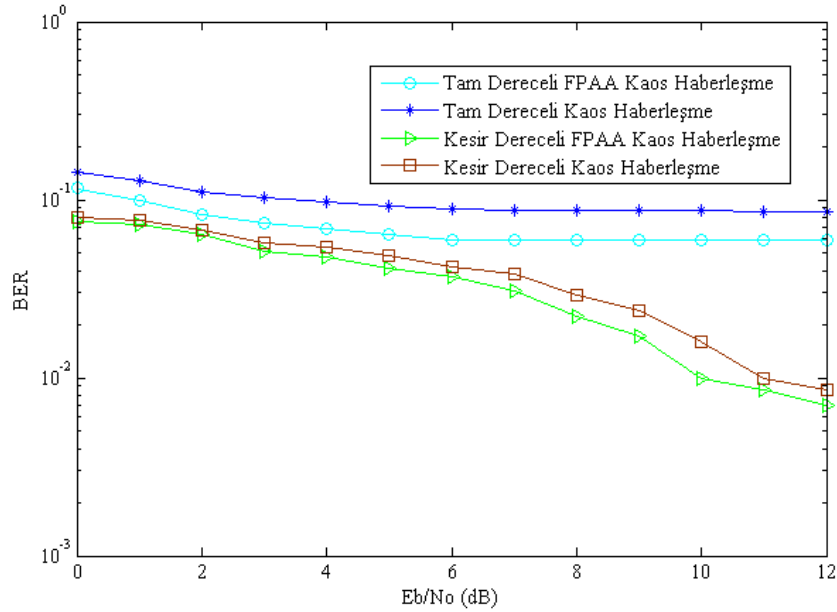
Tablo 1. FPAA Gerçekleştirim Blok Şeması

FILTERBILINEAR BLOCK-POLE AND ZERO		FILTERBİLİNEAR BLOCK, FPAA1 ve FPAA2'de Laplace dönüşümlerini kullanarak bulunan kutup ve sıfır noktalarının frekanslarının tanımlanmasını sağlar.
FILTERBILINEAR BLOCK-LOW PASS		FILTERBİLİNEAR BLOCK, FPAA1 ve FPAA2'de Laplace dönüşümlerini kullanarak bulunan alçak geçiren filtre frekanslarının tanımlanmasını sağlar.
SUMDIFF BLOCK		SUMDIFF BLOCK, girişteki değerlerin toplanmasını sağlar.
TRANSFER BLOCK		TRANSFER BLOCK, bir değere bağlı matematiksel denklemlerin kullanıcı tarafından tanımlanmasını sağlar.
GAINSWITCH BLOCK		GAINSWITCH BLOCK, Giriş sinyalini referans değerine göre anahtarlama olarak çalıştırır.
PERIODIC WAVE BLOCK		PERIODIC WAVE bloğu, FPAA3'te Additive White Gauss Gürültüsünü eklemek için kullanılır.
DC VOLTAGE SOURCE BLOCK		DC VOLTAGE SOURCE, matematiksel ifadelerdeki sabit değeri eklemek için kullanılır.

DCC haberleşme sisteminde BER/SNR oranı denklem (13) ile hesaplanmaktadır. Denklem (13)'de E_b kaotik modülörün çıkışındaki bit enerjisini ve erfc hata fonksiyonunu ifade ederken, $N_0/2$ gürültü dağılımını ifade etmektedir (Sushchik vd., 2000).

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4N_0} \left(1 + \frac{\beta N_0}{2E_b} \right)^{-1}} \right) \quad (13)$$

Her bir gürültü seviyesi için Matlab Simulink'te Error Rate Calculation bloğu kullanılırken, deneysel çalışmada ise iletilen ve elde edilen sinyallerin verileri dijital osiloskop girişinde usb bellek ile kaydedilerek karşılaştırma işlemi yapılmış elde edilen sonuçlar Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 10. Kesir Dereceli Kaos Üreticinin Benzetim ve FPAA BER-SNR Performansı

Çalışmada gerçekleştirilen uygulama neticesinde elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca Anadigm tasarımı da uygulama adımlarına eklenmiş ve sonuç eğrileri eklenmiştir. Bu yöntem ile özellikle kontrol sistemlerinde modellenecek yapıların tam olarak davranışları gözlemlenerek karar mekanizmalarının kontrolü daha kesin ve doğru bir şekilde yapılabilecektir. Benzer şekilde non-coherent kaotik haberleşme sistemlerinde senkronizasyon gerektirmeden alıcı ve verici devrelerde aynı kaotik sinyalin üretilmesi sağlanmıştır. Böylelikle kesir dereceli kaotik sistem kullanılarak gerçekleştirilen non-coherent yapı kaotik haberleşme sistemleri, tam dereceli kaotik alıcı sistemlerine göre daha kısa sürede senkronize olacağından BER/SNR performansını artırmaktadır. Ayrıca non-coherent kaotik sistemlerde ise kaotik sinyalin gerçek dinamik davranışını sergilemesine yardımcı olacağı için güvenilir bir haberleşme ortamı sağlayacaktır. Elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde çalışmada tasarlanan haberleşme sisteminin daha iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur.

SONUÇLAR

Bu çalışma neticesinde mevcut sayısal tabanlı kaotik haberleşme yöntemlerine göre daha iyi BER/SNR performansı gösteren bir kaotik haberleşme tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tam dereceli kaotik sinyallerin öncelikle kesir dereceli olarak modellenmesi ve bunun sonrasında analog tabanlı bir platformda deneysel uygulamasını gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Gerek benzetim gerekse de deneysel çalışmalar kesir dereceli ve analog tabanlarda gerçekleştirilen sistemin BER/SNR performansının daha iyi olduğu sonuçlarına ulaşmıştır. Ayrıca kesir dereceli tasarımın kaotik sistemin gerçek davranışının elde edilmesinde kullanıldığından sistemin karmaşıklığını artırmakta ve dışarıdan istenmeyen şekilde yeniden elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum taşıyıcı olarak kullanıldığı haberleşme sisteminin güvenilirliğini de artıracak bir parametre olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, H. N., & Valenzuela, A. A. (2011). Performance evaluation of FM-COOK chaotic communication system. *Journal of Signal and Information Processing*, 2(3), 175-177.
- Altun, K. (2021). FPAA implementations of fractional-order chaotic systems. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 30(15), 2150271.
- Baccigalupi, A., & Liccardo, A. (2007). Field programmable analog arrays for conditioning ultrasonic sensors. *IEEE Sensors Journal*, 7(8), 1176-1182.
- Chua, L. O., & Yang, L. (1988). Cellular neural networks: Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 35(10), 1257-1272.
- Chua, L. O., Desoer, C. A., & Kuh, E. S. (1987). Linear and nonlinear circuits. McGraw-Hill College.
- Cuomo, K. M., Oppenheim, A. V., & Strogatz, S. H. (1993). Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 40(10), 626-633.
- Dedieu, H., Kennedy, M. P., & Hasler, M. (1993). Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua's circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, 40(10), 634-642.
- Günay, E., & Altun, K. (2017). A performance comparison study of programmable platforms: FPAA and FPGA implementation of COOK communication system. In 2017 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD).
- Günay, E., & Altun, K. (2018). Switched state controlled-CNN: an alternative approach in generating complex systems with multivariable nonlinearities using CNN. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 28(06), 1830019.
- Hall, T. S., Twigg, C. M., Gray, J. D., Hasler, P., & Anderson, D. V. (2005). Large-scale field-programmable analog arrays for analog signal processing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 52(11), 2298-2307.
- Hasler, J., & Shah, S. (2017). VMM+ WTA embedded classifiers learning algorithm implementable on SoC FPAA devices. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 8(1), 65-76.
- Herzallah, M. A. (2014). Notes on some fractional calculus operators and their properties. *J. Fract. Calc. Appl*, 5(19), 1-10.
- Holmes, P. (1990). Poincaré, celestial mechanics, dynamical-systems theory and "chaos". *Physics Reports*, 193(3), 137-163.
- Jin, Y., Chen, Y. Q., & Xue, D. (2011). Time-constant robust analysis of a fractional order [proportional derivative] controller. *IET Control Theory & Applications*, 5(1), 164-172.
- Kennedy, M. P., & Kolumban, G. (2000). Digital communications using chaos. *Signal Processing*, 80(7), 1307-1320.
- Kolumbán, G. (1997). Performance improvement of chaotic communication systems. In Proc. ECCTD'97 (pp. 284-289).
- Kolumbán, G., Kennedy, M. P., & Chua, L. O. (1998). The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 45(11), 1129-1140.
- Kolumbán, G., Vizvári, B., Schwarz, W., & Abel, A. (1996). Differential chaos shift keying: A robust coding for chaos communication. In Proc. NDES (Vol. 96, pp. 87-92).
- Kozioł, S. (2020). Multi-Objective Path Planning for Autonomous Robots Using Reconfigurable Analog VLSI. *IEEE Access*, 8, 80134-80147.
- Li, C. B., Thio, W. J. C., Sprott, J. C., Zhang, R. X., & Lu, T. A. (2017). Linear synchronization and circuit implementation of chaotic system with complete amplitude control. *Chinese Physics B*, 26(12), 120501.

- Linsay, P. S. (1981). Period doubling and chaotic behavior in a driven anharmonic oscillator. *Physical Review Letters*, 47(19), 1349.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20(2), 130-141.
- Ma, S., Zheng, J., & Li, Y. (2014). Chaos control and synchronization of a new fractional order chaotic system. *Journal of Information & Computational Science*, 11(10), 3469-3479.
- Moreno, D. G., Del Barrio, A. A., Botella, G., & Hasler, J. (2021). A cluster of FPAA's to recognize images using neural networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(11), 3391-3395.
- Nishimoto, K. (1984). *Fractional Calculus*, Decartess Press, Koriama.
- Oldham, K., & Spanier, J. (1974). *The fractional calculus theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order*. Elsevier.
- Ott, E., Grebogi, C., & Yorke, J. A. (1990). Controlling chaos. *Physical Review Letters*, 64(11), 1196.
- Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B., & Nanot, F. M. (2000). Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47(1), 25-39.
- Parlitz, U., Chua, L. O., Kocarev, L., Halle, K. S., & Shang, A. (1992). Transmission of digital signals by chaotic synchronization. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2(04), 973-977.
- Pecora, L. M., & Carroll, T. L. (1990). Synchronization in chaotic systems. *Physical Review Letters*, 64(8), 821.
- Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D., & Feigenbaum, M. J. (1992). *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Vol. 7). New York: Springer.
- Petráš, I. (2011). *Fractional-order nonlinear systems: modeling, analysis and simulation*. Springer Science & Business Media.
- Petráš, I., & Bednářová, D. (2011). Control of fractional-order nonlinear systems: A review. *Acta Mechanica et Automatica*, 5(2), 96-100.
- Podlubny, I. (1999). Fractional differential equations. *Mathematics in Science and Engineering*, 198, 41-119.
- Salih, T. A. (2021). Design and Implementation of a Low Power Consumption of ASK, FSK PSK, and QSK Modulators Based on FPAA Technology, *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 11(4), 1288.
- Schlottmann, C. R., & Hasler, J. (2013). High-level modeling of analog computational elements for signal processing applications. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 22(9), 1945-1953.
- Sprott J. C., (1994). Some simple chaotic flows. *Physical Review E*, 50(2):R647.
- Sushchik, M., Tsimring, L. S., & Volkovskii, A. R. (2000). Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47(12), 1684-1691.
- Tolba, M. F., Said, L. A., Madian, A. H., & Radwan, A. G. (2018). FPGA implementation of the fractional order integrator/differentiator: Two approaches and applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 66(4), 1484-1495.
- Udita, N. K. (2014). A new approach to generalized fractional derivatives. *Bulletin of Mathematical Analysis and Applications*, 6(4), 1-15.
- Yong, Y. K., Bhikkaji, B., & Moheimani, S. R. R. (2012). Design, modeling, and FPAA-based control of a high-speed atomic force microscope nanopositioner. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(3), 1060-1071.