T. C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KESİR DERECELİ KAOTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİN PERFORMANS ANALİZLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökçenur KAYA

(20209233008)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kenan ALTUN

SİVAS

OCAK 2023

Gökçenur KAYA'nın hazırladığı ve **"KESİR DERECELİ KAOTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİN PERFORMANS ANALİZLERİNİN İNCELENMESİ"** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	**Dr. Öğr. Üyesi Kenan ALTUN** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……
Jüri Üyesi	**Doç.Dr. Fatih Yavuz ILGIN** Erzincan Binalı YILDIRIM Üniversitesi	……..……..
Jüri Üyesi	**Doç.Dr. Behçet Özgür ALAYDİN** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	……..……..

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.

Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Gökçenur KAYA, 2023

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

12 / 01 / 2023

Gökçenur KAYA

KATKI VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa başladığım ilk günden itibaren desteğini esirgemeyen, bilgisi ile bana her zaman yol gösteren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Kenan ALTUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her koşulda bana destek olan annem Yüksel KAYA'ya, babam İsmail KAYA'ya ve değerli aileme teşekkür ederim.

ÖZET

KESİR DERECELİ KAOTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİN PERFORMANS ANALİZLERİNİN İNCELENMESİ

Gökçenur KAYA

Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kenan ALTUN
2023, xviii+49 sayfa

Bu tez çalışmasında, Kaotik sinyallerin haberleşme sistemlerinde bilgi güvenilirliğinin artırılmasına yönelik literatürde yapılan çalışmaların incelenmesini ve CSK haberleşme sisteminin FPAA yapılarıyla modellenmesini içermektedir. Kaos sinyalleri periyodik olmayan ve tahmin edilmesi zor parametre ve başlangıç koşul hassasiyeti yüksek sinyallerdir. Kaotik sinyallerin elde edilebilmesi için toplamda üçüncü derece durum denklemlerine ihtiyaç vardır. Ancak sistemin kaosa girmesi bazı denklemler için üçüncü derecenin altında olması yeterli olabilir. Bu denklemlerin kesir dereceli olarak modellenmesi sistemin gerçekliğini artırır. Bu durum özellikle güvenilir haberleşme sistemlerinde kullanılan kaotik sinyallerin tahmin edilmesini zorlaştırırken senkronizasyon sürelerini kısaltır ve toplam BER/SNR oranını azaltmaktadır. Bu nedenle kaotik sistemleri kesir dereceli elde edilerek haberleşme sistemlerinde kullanımı oldukça önemlidir. Ayrıca kesir derecesi bir parametre olarak sistemin esnekliğini ve karmaşıklığını artırmaktadır. Bu tez çalışmasında, kesir dereceli kaotik sinyal kullanılarak haberleşme sistemi kullanılmıştır. Ayrıca önerilen tasarım FPAA platformunda gerçekleştirilerek doğruluğu ortaya konmuştur. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar kesir dereceli kaotik sinyal kullanılan haberleşme sistemlerinde BER/SNR oranını daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kesir Dereceli Kaos, Kaotik Haberleşme, Güvenilir Haberleşme, FPAA.

ABSTRACT

INVESTİGATİON OF PERFORMANCE ANALYSİS OF FRACTİONAL ORDER CHAOTİC COMMUNİCATİON SYSTEMS

Gökçenur KAYA

Master of Science Thesis

Department of Electrıcal & Electronıc Engıneerıng

Supervisor: Assistant Prof. Kenan ALTUN

2023, xviii+49 pages

In this thesis, the studies in the literature on increasing the reliability of information in chaotic signals communication systems and the modeling of the CSK communication system with FPAA structures are included. Chaos signals are non-periodic and difficult to predict, and have high initial condition sensitivity. In order to obtain chaotic signals, a total of third order equations of state are needed. However, it may be sufficient for some equations to be below the third order for the system to go into chaos. Modeling these equations as fractional increases the reality of the system. This makes it difficult to predict chaotic signals used in reliable communication systems, shortens synchronization times and reduces the total BER/SNR ratio. For this reason, it is very important to use chaotic systems in communication systems by obtaining fractional degrees. In addition, the fraction degree as a parameter increases the flexibility and complexity of the system. In this thesis, a communication system was used using a fractional chaotic signal. In addition, the proposed design was carried out on the FPAA platform and its accuracy was demonstrated. Simulation results and experimental results show that the BER/SNR ratio is lower in communication systems using fractional chaotic signals.

Key words: Fractional-Order Chaos, Chaotic Communication, Secure Communication, FPAA.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **vii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **x**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

2. KAOS TEORİSİ VE KAOTİK OSİLATÖRLER **4**

2.1. Kaotik Osilatörler 4

2.1.1 Lorenz Kaotik Sistem 4

2.1.2 Rössler Kaotik Sistem 6

2.2 Kaotik Osilatörlerin Donanımsal Gerçekleştirimi 7

2.2.1 Sayısal Tabanlı Donanım Kullanarak Kaos Üreteçlerinin Elde Edilmesi 7

2.2.2 Analog Tabanlı Donanım Kullanılarak Kaos Üreteçlerin Elde Edilmesi 10

3. KESİR DERECELİ KAOTİK OSİLATÖRLER **13**

3.1 Riemann-Liouville 13

3.2 Grünwald-Letnikov 14

3.3 Charef Yaklaşım Metodu 15

3.4 Kesir Dereceli Rössler Kaotik Üreteci 19

3.4.1 Grünwald-Letnikov Metodu ile Kesir Dereceli Analiz 20

4. KAOTİK TABANLI HABERLEŞME SİSTEMLERİ **22**

4.1 Kaos Tabanlı İşaretlerin Özellikleri 23

4.2 Kaotik Tabanlı Haberleşme Sistemleri 23

4.3 Kaotik Anahtarlamalı Haberleşme Sistemleri 26

4.3.1 Kaos Kaymalı Anahtarlama (CSK) 27

5. KESİR DERECELİ KAOS TABANLI HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN FPAA TASARIMI VE HATA PERFORMANS ANALİZLERİ **29**

5.1 Kaos Tabanlı Haberleşme Sistemleri ve Senkronizasyon 29

5.2 FPAA Tabanlı Analog Tasarım 32

6. SONUÇ TARTIŞMA ve ÖNERİLER **40**

KAYNAKÇA **42**

ÖZGEÇMİŞ **49**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Lorenz dinamik sistemde x-z faz uzayı. 5
Şekil 2.2 Lorenz dinamik denklemde x(t), y(t) ve z(t)'nin davranışları. 5
Şekil 2.3 Rössler sistemi x-y faz uzay gösterimi. 6
Şekil 2.4 Rössler dinamik denklemlerin x(t), y(t) ve z(t)'nin zaman eksenindeki davranışları. 7
Şekil 2.5 Sayısal donanımların karşılaştırılması 8
Şekil 2.6 FPGA uygulama kartI, Altera DE2 115 geliştirme kartı. 9
Şekil 2.7 FPGA içyapısı. 9
Şekil 2.8 Anadigm AN231K04-QUAD 3.3V geliştirme kartı. 10
Şekil 2.9 AD2 yazılımı cam penceresi. 12
Şekil 3.1 Stability region of the fractional-order system. 17
Şekil 3.2 Kesir dereceli Rössler kaotik sistemin kesir dereceli Simulink modeli. 19
Şekil 3.3 Sprott_h faz uzay gösterimi. 21
Şekil 4.1 PC senkronizasyon sisteminin blok diyagramı. 25
Şekil 4.2 PC senkronizasyon sisteminin denklemler ile gösterimi. 26
Şekil 4.3 a) CSK verici blok şeması, b) CSK alıcı blok şeması [78]. 28
Şekil 5.1 PC senkronizasyon sisteminin blok diyagramı. 32
Şekil 5.2 PC senkronizasyon sisteminin denklemler ile gösterimi. 32
Şekil 5.3 a) CSK Verici blok şeması, b) CSK Alıcı blok şeması (Dedieu vd., 1993). 34
Şekil 5.4 AN231K04-QUAD4 tipi FPAA geliştirme kartı ve Picoscope osiloskop deneysel kurulum. 35
Şekil 5.5 AnadigmDesigner2 gerçekleştirim şeması. 35
Şekil 5.6 Sprott H kaotik osilatörün FPAA platformunda x-y faz-uzay gösterimi. 36
Şekil 5.7 Sprott H kaotik osilatörün FPAA platformunda x-z faz-uzay gösterimi. 37
Şekil 5.8 Sprott H kaotik osilatörün FPAA platformunda y-z faz-uzay gösterimi. 37
Şekil 5.9 Kesir dereceli kaos üretecin benzetim ve FPAA BER-SNR performansı. 38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 5.1 FPAA Gerçekleştirim Blok Şeması. 35

KISALTMALAR DİZİNİ

x	Birinci Durum Değişkenini
y	İkinci Durum Değişkenini
z	Üçüncü Durum Değişkenini
$\dot{x}$	Birinci Durum Değişkeninin Zamana Göre Değişimini
$\dot{y}$	İkinci Durum Değişkenininin Zamana Göre Değişimini
$\dot{z}$	Üçüncü Durum Değişkeninin Zamana Göre Değişimini
x_0	Birinci Başlangıç Durum Değişkenini
y_0	İkinci Başlangıç Durum Değişkenini
z_0	Üçüncü Başlangıç Durum Değişkenini
t	Zaman
t_o	Başlangıç Zamanı
x_n	Sistemin n. Tekrarlama Durumu
RK4	Dördüncü Dereceden Runge-Kutta Algoritması
b	Bit Değerleri
β	Sistem Parametresi
λ	Öz Değerler
DSP	Digital Signal Processor
ASIC	Application Specific Integrated Circuits
FPGA	Field Programable Gate Array
FPAA	Field Programable Analog Array
GUI	Graphic User Interface
A/D	Analog/Dijital
D/A	Dijital/Analog
VLSI	Very Large Scale Integration
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
HDL	Hardware Description Language
CAB	Configurable Analog Block
CAM	Configurable Analog Module
LUT	Look-Up Table
LPI	Low Probability of Intercept
DCC	Direct Chaotic Communication
CNN	Cellular Neural Network
HSA	Hücresel Sinir Ağı
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal Noise Rate
erfc	The Complementary Error Function
AWGN	Additive White Gauss Noise
CSK	Chaotic Shift Keying
COOK	Chaotic On-Off Keying
DCSK	Differantial Chaotic Shift Keying

QCSK	Quadarature Chaotic Shift Keying
PWL	Piecewise Linear Function
$\mathbf{S_{(t)}}$	İletilen İşaret
$\mathbf{i_{c(t)}}$	Tekrar Elde Edilen Bilgi İşareti
$\mathbf{i_{(t)}}$	Bilgi işareti
e	Hata

1. 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 [1]. 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 [2]. Kaotik sinyallerin bu özellikleri bilimsel olarak bazı problemlerin çözümüne önemli katkılar sunmuştur [3]. Kaos teorisinin bilimsel alandaki ilk uygulaması 1960'lı yıllarda Edward Lorenz tarafından yapılmıştır [3]. 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 [4]. 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 [5,6]. 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 [7]. Bu durumda, alıcı devreler taşıyıcı sinyalleri elde ederek bilgi sinyalini

yeniden elde etmesine olanak sağlar. Kaotik tabanlı non-coherent haberleşme sitemlerinden Chaos shift keying (CSK) [8], Chaotic on off keying (COOK) [9], Differantial Chaos Shift Keying (DCSK) [10,11], Quadrature chaos shift keying (QCSK) [12] 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 [4]. Bazı araştırmacılar kaotik davranış gösteren dinamik sistemlerin toplam derecelerinin 3'ten az olması durumunda da kaos sergilediğini göstermektedir [13]. 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 [14].

Kesir dereceli türev ve integratörlerden ilk olarak 1695 yılında Leibniz tarafından bahsedilmiş olsa da 19. yüzyılın sonunda Liouville ve Riemann tarafından ortaya konulmuştur [15,16]. Kesir dereceli hesaplamalar birçok problemin tam olarak ifade edilebilmesine ve çözülmesine katkı sağlamıştır [17]. 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 [18-20,13]. Kesir derecesi ile tasarlanan sistemlerin tam dereceli sistemlere göre özellikle doğrusal olmayan sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur [21]. Kesir dereceli operatörlerin kullanılmasıyla doğadaki problemlerin modellenmesi ve tamsayı dereceli denklemlerle elde edilen modeller karşılaştırıldığında gerçek sistem davranışı elde edildiği görülmüştür [14]. Kesir dereceli türev ve integratörler Grünwald–Letnikov's gibi birçok yöntemle tanımlanmıştır [22]. Ancak kesir dereceli sistemlerin ayrık devre elemanları ile gerçekleştirilmesinde önemli zorluklar yaşanmıştır. Bu problemlerin aşılmasında programlanabilir platformlar kullanılarak çözüm aranmıştır.

Kaos tabanlı elektronik devre tasarımında ayrık 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) yapılardır. Ancak sayısal tabanlı FPGA gibi yapıların yuvarlama hataları ile kaotik işaretler kullanılarak gerçekleştirilen haberleşme sistemlerinin avantajlarını sınırlamaktadır. Bunlardan dolayı tümleşik 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.

Tez çalışmasında 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. Sprott_h kaotik dinamikleri Grünwald–Letnikov's yaklaşım yöntemi ile modellenerek kesir dereceli modellenen kaotik sinyalin benzetimi ve analog tabanlı deneysel uygulama sonuçları elde edilmiş nümerik değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KAOS TEORİSİ VE KAOTİK OSİLATÖRLER

Kaotik sistemlerin en çok uygulama fırsatı bulduğu alan haberleşme sistemleridir. Haberleşme sistemlerinin güvenilirliğinin artırılmasında tercih edilmektedir. Güvenilir haberleşme sistemlerinde temel amaç, iletilecek bilgi sinyalinin güvenli bir şekilde tahmin edilmesi zor bir taşıyıcı sinyal ile bilgi sinyalini gizlemek ve bilgi sinyalini alıcıda tekrar elde edebilmektir. Bu nedenle kaotik sinyalin karmaşıklığının artırılması haberleşme sisteminin de güvenilirliğini artırmaktadır.

Kaotik sistemler, sinyal işleme ve haberleşme gibi geniş uygulanabilirliği ile öne çıkmaktadır. Kaotik sinyaller özellikle haberleşme sitemleri için zengin parametre çeşitliliği sağlar. Kaotik sinyallerin gürültü benzeri tahmin edilemeyen yapısı yüksek band genişliği ile deterministik olması, güvenli haberleşme ve kriptografi alanında uygulanabilirliğini artırır. Ayrıca, kaotik sinyallerin alıcı verici devrelerde senkronize olabilmeleri de mümkündür [23]. Kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına olan yüksek hassasiyeti özellikle kriptografide şifreleme anahtarı olarak kullanılmaktadır.

2.1. Kaotik Osilatörler

Osilatörün kısa bir şekilde tanımını yapacak olursak elektriksel salınım üreten devre elemanıdır diyebiliriz. Kaotik tabanlı haberleşme sistemleri için yapılacak olan osilatör seçimi oldukça önemlidir. Seçilen kaotik osilatörün karmaşık davranışlar sergilemesi, bant genişliğinin fazla olması ve yüksek frekanslı çıkış sinyalleri üretmesini bekleriz.

Bu bölümde literatürde en çok bilinen ve üzerinde yoğun çalışmalar yapılan devreler olan Lorenz ve Rössler devrelerinin matematiksel analizlerine değinip MATLAB/Simulink ortamında gözlemlenen kaotik davranışları incelenmiştir.

2.1.1 Lorenz Kaotik Sistem

1963 yılında Edward Lorenz, hava tahmini raporları hazırlarken yanlışlıkla girdiği küçük bir başlangıç değeri sonrası sonuçların çok değiştiğini fark ederek başlattığı çalışmalarda doğrusal olmayan dinamik denklem sistemi elde etmiştir. Bu denklemler aşağıdaki gibidir.

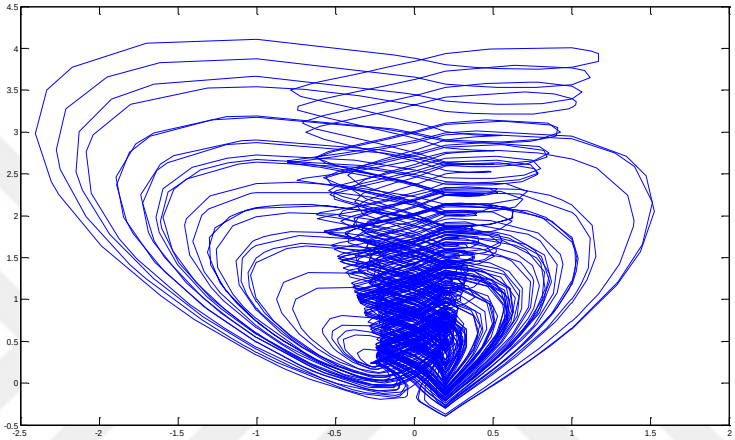
$$\dot{y} = (b - z)x - y \tag{2.1}$$

$$\dot{x} = a(y - x)$$

$$\dot{z} = xy - cz$$

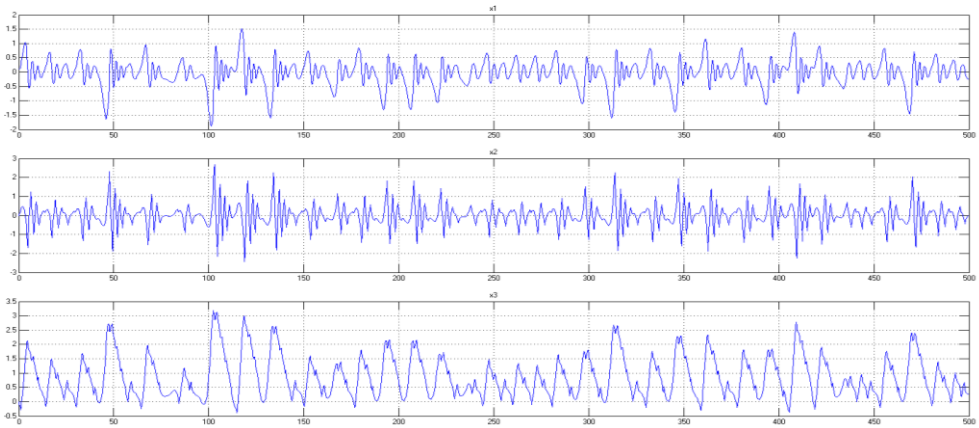
Lorenz dinamik denklemini bilgisayar benzetim çalışması yapılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Lorenz diferansiyel denkleme ait çözümleri incelediğinde sistemin kaotik davranış sergilediğini gözlemlemiştir. Lorenz denklemlerin (0.34, 2, 0) başlangıç değerleri için Şekil 2.1'deki x-z faz uzay gösterimi elde edilmiştir.



Şekil 2.1 Lorenz dinamik sistemde x-z faz uzayı.

Lorenz dinamik yapıya ait x, y, z durum değişkenlerine ait zaman eksenindeki davranışları Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2 Lorenz dinamik denklemde x(t), y(t) ve z(t)'nin davranışları.

2.1.2 Rössler Kaotik Sistem

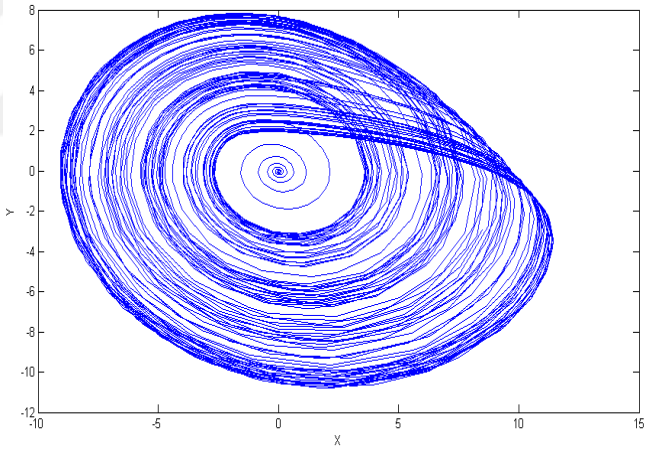
Rössler modeli en çok bilinen basit bir dinamik sistemdir. Kimyasal kinetikler üzerine çalışmalar yaparken ortaya atmış olduğu bu sistem aşağıdaki diferansiyel denklemler ile temsil edilmektedir. Zaman içinde değişen değişkenler x, y, z ile gösterilmektedir. Sabit parametreler ise a, b, c ile gösterilmektedir.

$$\dot{x} = -y - z$$

$$\dot{y} = x + ay \tag{2.2}$$

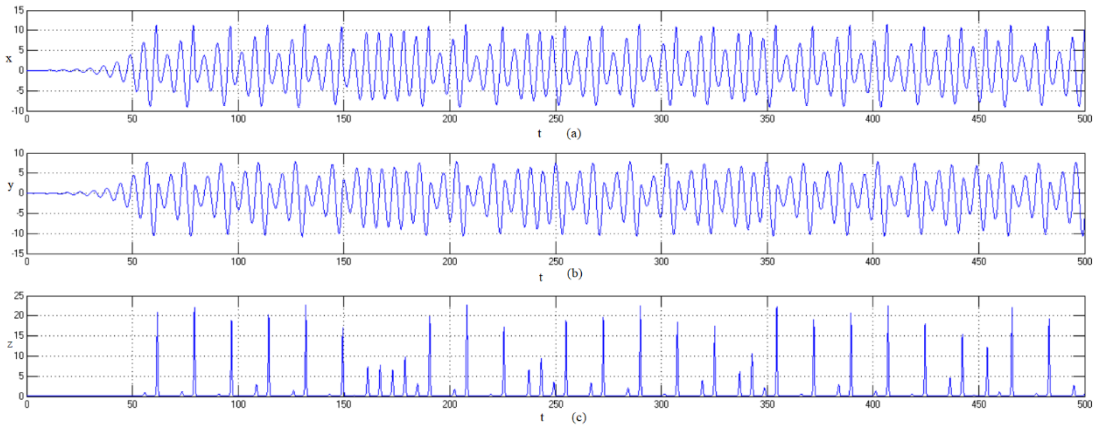
$$\dot{z} = zx - zc + b$$

Sabit parametreler için a=b=0.2 ve c=5 verildiğinde Rössler dinamik denklemi kaotik davranış sergilemektedir. Elde edilen kaotik davranışa ait faz uzay gösterimi Şekil 2.3'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Rössler sistemi x-y faz uzay gösterimi.

Rössler sisteminde bir kaotik çeker oluştuğu gözlemlenmiştir. Rössler sisteminin x, y, z değişkenleri için zaman eksenindeki değişimleri Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 Rössler dinamik denklemlerin x(t), y(t) ve z(t)'nin zaman eksenindeki davranışları.

2.2 Kaotik Osilatörlerin Donanımsal Gerçekleştirimi

Kaotik tabanlı haberleşme sistemlerinin en temel yapısı kaos sinyal üreteçleridir. Kaos sinyalleri haberleşme sistemlerinde bilgi sinyalinin alıcı devreye ulaşmasını sağlar ve bilgi sinyallerini arka planda gizli tutar. Kaos üreteçleri ayrık devre elemanları veya tümleşik yapılar kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Fakat kaos sinyallerinin başlangıç değerlerine olan hassasiyeti ayrık devre elemanları ile gerçekleştirilebilmelerini zorlaştırmıştır. Bu yüzden tümleşik yapıların kaos sinyallerinin elde edilmesinde önemli avantajları vardır. Kaos sinyallerini tümleşik yapılar kullanarak farklı şekillerde elde edilebilir. Bunlar analog tabanlı ve sayısal tabanlı olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.2.1 Sayısal Tabanlı Donanım Kullanarak Kaos Üreteçlerinin Elde Edilmesi

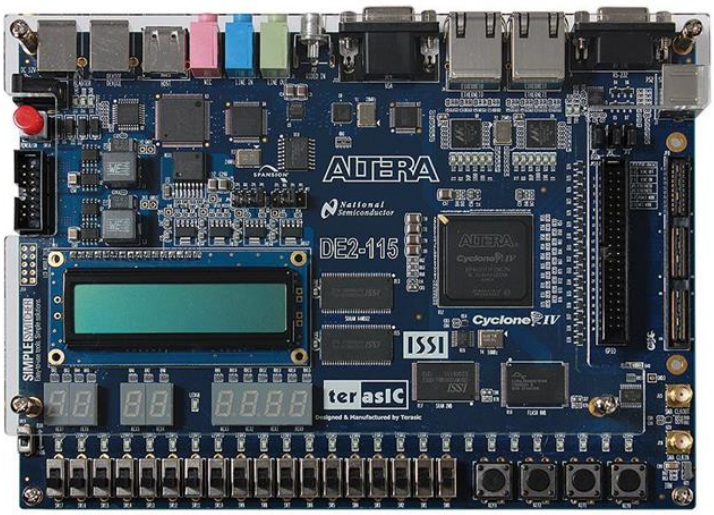
Kaos sinyalleri ASIC, DSP ve FPGA adı verilen tümleşik devre yapıları ile gerçekleştirilebilirler. Bu devre yapılarının performansları Şekil 2.5'te karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.5 Sayısal donanımların karşılaştırılması

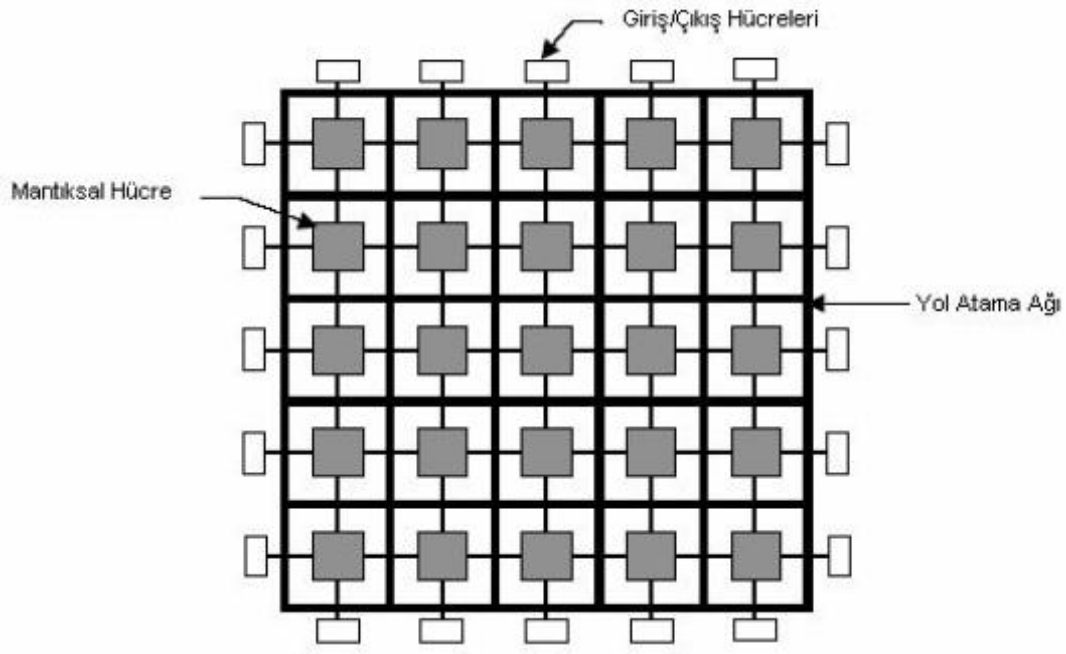
Şekil 1.14'deki karşılaştırmaya bakıldığında ASIC yapı ile kaotik üreteçlerinin yüksek performanslı devre yapıları olduğu görülmektedir. Fakat ASIC tabanlı kaos üreteçlerinin ilk kurulum maliyetinin yüksek ve sahada değiştirilemeyen tasarım yöntemi en önemli dezavantajları olduğunu göstermektedir. O yüzden üretim sırasında yapılacak bir hata çok ciddi mali kayıplara yol açabilir. DSP tasarım metodunun ise düşük frekanslı oldukları gözlemlenmektedir. Bundan dolayı tasarımı yapılan sistemlerin yavaş çalışmasına sebep olur. Ve bir diğer sayısal tabanlı devre yapısı olan FPGA tabanlı tasarımda bu dezavantajlar bulunmamaktadır. FPGA kullanılarak elde edilen yapıların değiştirilebilir olmaları, aynı anda işlem yapabilmeleri ve çok yüksek anahtarlama frekansları sayısal sistemler için çok önemlidir [24]. FPGA yapılar, özellikle teknolojinin hızlıca geliştiği son zamanlarsa medikal, savunma, radar, işaret işleme, uzay, otomotiv endüstrisi gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır [25]. Fourier dönüşümü ve konvolüsyon gibi yüksek performans gerektiren matematiksel döngülerde FPGA yapılar kullanılmaktadır.

FPGA tümleşik yapıları alanda programlanabilen sayısal tabanlı donanımlardır. FPGA yapılar programlanabilen entegre blokları olarak ta bilinir. En önemli özellikleri aynı anda işlem yapmalarıdır. Böylelikle aynı anda birçok görevi veya hesaplamayı yapabilirler [26]. Bilinen entegre devre yapıları paralel işlem yapamazlar. En çok bilinen FPGA yapıları Xilinx ve Altera firmalarının ürettiği kartlardır. Altera firması tarafından üretilen DE2-115 geliştirme kartı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 FPGA uygulama kartI, Altera DE2 115 geliştirme kartı.

FPGA yapısının içyapısı Şekil 2.7'de verilmiştir. FPGA içerisinde PLU ve blokları birbirine bağlayan giriş-çıkış hücreleri ve bağlantı noktaları bulunmaktadır.

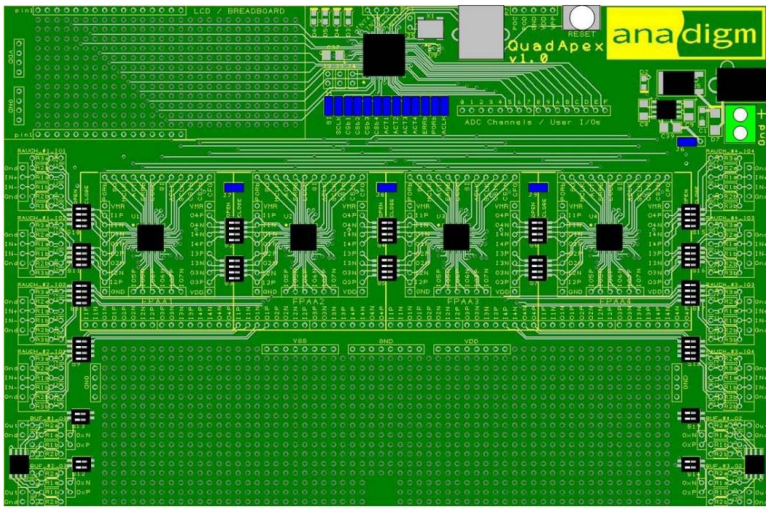


Şekil 2.7 FPGA içyapısı.

FPGA HDL programlama dili kullanılarak programlanır. FPGA yapılarının bu avantajlarından dolayı paralel işlem gerekliliği olan dinamik yapılara sahip kaotik sinyaller için önemli bir platformdur [27-29].

2.2.2 Analog Tabanlı Donanım Kullanılarak Kaos Üreteçlerin Elde Edilmesi

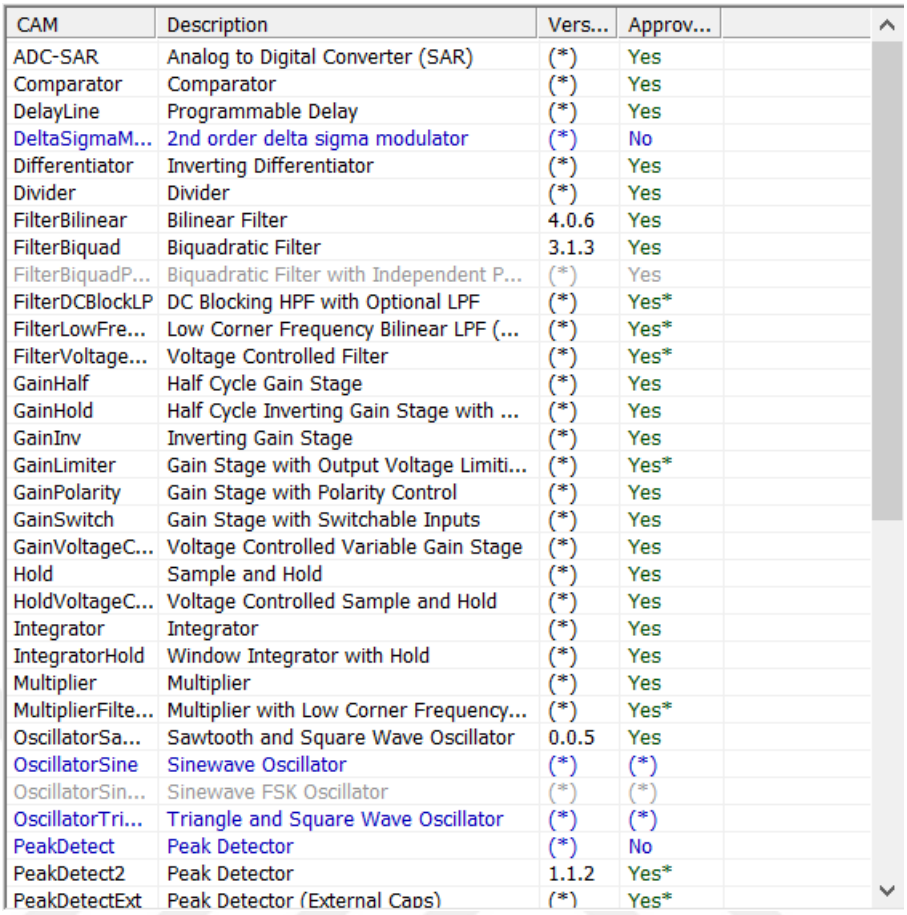
Günümüzde birçok problemin çözümü elektronik devre kontrollü sistemler ile gerçekleştirilmektedir. Bu devrelerin çoğunun sayısal tabanlı olması ve bu devrelerin bazı büyüklükleri tam olarak karşılayamaması sistemlerden beklentileri tam olarak karşılayamamaktadır. Dünyadaki birçok büyüklüğün analog olması bu büyüklülerin kontrollünde de analog tabanlı tümleşik devrelerin kullanılması bir zorunluluk olmuştur. Ancak analog devrelerin tasarımında ayrık 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 2.8'de gösterilen Anadigm AN231K04-QUAD4 Quad geliştirme kartı kullanılmıştır.



Şekil 2.8 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 2.8'de görülmektedir. Bir ara yüz programı ile tasarlanan FPAA modelleri daha sonra karta yüklenerek deneysel sonuçlar elde edilir. FPAA yapılar, haberleşme [30,31], sinyal işleme [32,33], kontrol [34], yapay sinir ağları [35-37], kaotik osilatörler ve diğer mühendislik uygulamaları [39,41] 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. Modellenecek 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.



CAM	Description	Vers...	Approv...
ADC-SAR	Analog to Digital Converter (SAR)	(*)	Yes
Comparator	Comparator	(*)	Yes
DelayLine	Programmable Delay	(*)	Yes
DeltaSigmaM...	2nd order delta sigma modulator	(*)	No
Differentiator	Inverting Differentiator	(*)	Yes
Divider	Divider	(*)	Yes
FilterBilinear	Bilinear Filter	4.0.6	Yes
FilterBiquad	Biquadratic Filter	3.1.3	Yes
FilterBiquadP...	Biquadratic Filter with Independent P...	(*)	Yes
FilterDCBlockLP	DC Blocking HPF with Optional LPF	(*)	Yes*
FilterLowFre...	Low Corner Frequency Bilinear LPF (...	(*)	Yes*
FilterVoltage...	Voltage Controlled Filter	(*)	Yes*
GainHalf	Half Cycle Gain Stage	(*)	Yes
GainHold	Half Cycle Inverting Gain Stage with ...	(*)	Yes
GainInv	Inverting Gain Stage	(*)	Yes
GainLimiter	Gain Stage with Output Voltage Limiti...	(*)	Yes*
GainPolarity	Gain Stage with Polarity Control	(*)	Yes
GainSwitch	Gain Stage with Switchable Inputs	(*)	Yes
GainVoltageC...	Voltage Controlled Variable Gain Stage	(*)	Yes
Hold	Sample and Hold	(*)	Yes
HoldVoltageC...	Voltage Controlled Sample and Hold	(*)	Yes
Integrator	Integrator	(*)	Yes
IntegratorHold	Window Integrator with Hold	(*)	Yes
Multiplier	Multiplier	(*)	Yes
MultiplierFilte...	Multiplier with Low Corner Frequency...	(*)	Yes*
OscillatorSa...	Sawtooth and Square Wave Oscillator	0.0.5	Yes
OscillatorSine	Sinewave Oscillator	(*)	(*)
OscillatorSin...	Sinewave FSK Oscillator	(*)	(*)
OscillatorTri...	Triangle and Square Wave Oscillator	(*)	(*)
PeakDetect	Peak Detector	(*)	No
PeakDetect2	Peak Detector	1.1.2	Yes*
PeakDetectExt	Peak Detector (External Caps)	(*)	Yes*

Şekil 2.9 AD2 yazılımı cam penceresi.

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 taktirde oluşturulan FPAA modelinin kazanç değerlerinde veya kullanılan frekans değerlerinde düzenlemeler yapmak gerekmektedir.

3. KESİR DERECELİ KAOTİK OSİLATÖRLER

Kesir dereceli hesaplama, türev ve integral gibi matematiksel tanımlamaların yapıldığı bir bilim dalıdır [42,43]. Kesir dereceli hesaplamalar gerçek zaman medellemenin önemli olduğu birçok sistemin yeniden tasarlanmasında kullanılmıştır [44-46]. Leibniz ve L'Hopital ilk olarak 0.5 dereceye sahip türev hesabı yapmışlardır [47,48]. Kesir dereceli matematiksel hesaplamaların yapılması oldukça zor ve karmaşıktır. Gerçek sistem davranışlarının önemli olduğu başta kontrol sistemi olmak üzere birçok sistemin benzetim ve modellemelerinde kullanılmaktadır. Kesir dereceli, hesaplama için birçok yöntem önerilmektedir [49].

Kesir derece ile bir türev hesabında, interpolasyon yöntemleri kullanılarak hesaplama yapılmaktadır. Kaotik sistemlerde kesir dereceli parametre yeni bir parametre olarak sistemin karmaşıklığının artırılmasını sağlamaktadır. Bu durum kaotik sistemin gerçek dinamik yapısını elde edilmesini sağlarken kullanıldığı uygulamanın güvenilirliğini de artırmaktadır.

Kesir derece hesabında birçok tanım vardır. Çalışmada Riemann-Liouville yöntemi ile birlikte Grünwald-Letnikov ve Charef yaklaşım metodu kısaca açıklanmıştır.

3.1 Riemann-Liouville

Kesirli analiz alanındaki en popüler tanımlardan biridir. Bernhard Riemann ve Joseph Liouville tarafından önerilmiştir [50]. Bu tanımlamaya göre kesir dereceli integral denklem (3.1) ile ifade edilmektedir.

$$ {}_aD_x^{\alpha} f(x) = \frac{1}{-\alpha} \int_a^x (x-\tau)^{-\alpha-1} f(\tau) d\tau , \quad \alpha < 0 \tag{3.1} $$

n-1 $<\alpha<$ *n* olmak üzere Denklem (1)'in *n*. derece türevi alındığında

$$ {}_aD_x^{\alpha} f(x) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d^n}{dx^n} \int_a^x (x-\tau)^{n-\alpha-1} f(\tau) d\tau , \quad n > 0 \tag{3.2} $$

olur. Denklem (3.2), f(x) fonksiyonunda (n-α). derece kesirli derece türeve karşılık hesaplanır. Burada, a başlangıç değeri ve n bir tam sayıdır. Riemann-Liouville tanımı integral alma işlemine dayanmaktadır, kesir dereceli türev işlemleri yapmak için kesir dereceli integral ve tamsayı dereceli türevleri kullanılır.

3.2 Grünwald-Letnikov

Kesirli analizde yaygın olarak kullanılan bir başka popüler tanım, Anton Karl Grünwald ve ardından Aleksey Vasilievich Letnikov tarafından önerilmektedir [51]. Riemann-Liouville tanımlarından farklı olarak, Grünwald-Letnikov tanımları probleme temel türev kavramından yaklaşır. Kesirli türev için birçok tanım vardır. Bu tanımlamada göre, α derece için hesaplanan integro-diferansiyel hesabı Denklem (3.3) ile gösterilir.

$$ {}_aD_x^{\alpha} f(x) = \lim_{h \to \infty} \frac{\Delta_h^{\alpha} f(x)}{h^{\alpha}} \tag{3.3} $$

D, diferintegral operatörü ve h adım sayısı olarak tanımlanmaktadır. Denklem (3.4) ile $\Delta_h^{\alpha} f(x)$ verilmektedir;

$$ \Delta_h^{\alpha} f(x) = \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(x - jh) \tag{3.4} $$

olarak ifade edildiğinde toplam işlemde r sonlu bir sayı için denklem (3.5) kullanılır;

$$ \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \binom{\alpha}{j} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{\Gamma(r+1-\alpha)}{\Gamma(r+1)} \tag{3.5} $$

$\Gamma(x)$ gama fonksiyonudur ve h zaman içinde küçük bir değişikliktir ve $h = \frac{(x-a)}{r}$ ile ifade edilir. Son olarak Grunwald – Letnikov tanımı denklem (3.6) ile ifade edilmektedir.

$$ {}_aD_x^{\alpha} f(x) = \lim_{r \to \infty} \left\{ \frac{\left(\frac{(x-a)}{r} \right)^{-\alpha}}{\Gamma(-\alpha)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\Gamma(j-\alpha)}{\Gamma(j+1)} f\left(x - j\left(\frac{(x-a)}{r} \right) \right) \right\} \tag{3.6} $$

Denklemde α rasgele sayıyı, a başlangıç değerini ve Γ Euler Gama fonksiyonunu ifade etmektedir. Genel olarak, D hem integral alıcı hem de türev alıcıları ifade etmek için kullanılabilir. a türev alıcılar için pozitif ve integral alıcılar için negatiftir.

3.3 Charef Yaklaşım Metodu

Mühendislik biliminde zaman domenindeki doğrusal sistemlerin frekans domeninde modellenmesinde Laplace dönüşüm metodu ve ters laplace metodu kullanılmaktadır. Bu çalışmada kesir dereceli kaotik sistemlerin analog tabanlı FPAA ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. FPAA tasarımında kesir dereceli operatörler ancak frekans domeninde modellenerek gerçekleştirilebilir. Bu nedenle kesir dereceli sistemlerin frekans domeninde modellenmesine en uygun tanımlamalardan biri Charef yaklaşım metodudur [52]. Charef yaklaşım metodu ile s-domeninde kesir dereceli sistemin sürekli zamanlı yaklaşımı elde edilmektedir.

Bu yöntem ile kesir dereceli integral hesabının tam dereceye yakınsamış Laplace transfer fonksiyonu elde edilir.

$$I^{\alpha}_{(s)} = \frac{1}{s^{\alpha}} \tag{3.7}$$

Denklemde; s=jω kompleks frekans, α pozitif kesir derecesini temsil etmektedir.

$$I^{\alpha}_{(s)} = \frac{1}{s^{\alpha}} \approx \frac{1}{\left(1+\frac{s}{p_T}\right)^{\alpha}},\ 0<\alpha<1 \tag{3.8}$$

Burada, yakınsatılmış transfer fonksiyonunun hesaplanmasında; p_T köşe frekansı, p_0 ilk kutup değeri, y dB olarak hata oranını belirtmektedir. Son kutup olan p_N değeri ise N tarafından belirlenmektedir. $1/p_T$: durulma zaman sabitini temsil etmektedir. Buna göre kesir dereceli transfer fonksiyonu denklem (3.9) ile ifade edilmektedir.

$$I^{\alpha}_{(s)} = \frac{1}{s^{\alpha}} \approx \frac{1}{\left(1+\frac{s}{p_T}\right)^{\alpha}} \lim_{N\to\infty} \frac{\prod_{i=0}^{N-1}\left(1+\frac{s}{z_i}\right)}{\prod_{i=0}^{N}\left(1+\frac{s}{p_i}\right)}, \tag{3.9}$$

Transfer fonksiyonunun kutup ve sıfırları denklem (3.10) ile ifade edilmektedir. Denklem (3.11) ile N-1 sıfır ve kutup oranını ifade eden a, N-1 kutup ve sıfır oranını ifade eden b ve ab değerleri denklem (3.12) ile verilmektedir.

$$p_o = p_T 10^{[y/20\alpha]},\ z_o = p_0 10^{[y/10(1-\alpha)]},\ p_1 = z_0 10^{[y/10\alpha]},\ z_1 = p_1 10^{[y/10(1-\alpha)]} \tag{3.10}$$

$$z_{N-1} = p_{N-1}10^{[y/10(1-\alpha)]}, \; p_N = z_{N-1}10^{[y/10\alpha]} \tag{3.11}$$

$$a = 10^{[y/10(1-\alpha)]} \qquad b = 10^{[y/10\alpha]} \qquad ab = 10^{[y/10\alpha(1-\alpha)]} \tag{3.12}$$

Elde edilen bu kısaltmalarla transfer fonksiyonu denklem (3.13) ile verilmiştir. Ayrıca transfer fonksiyonunun boyutunu gösteren N ifadesi ise denklem (3.14) ile verilmektedir.

$$I^{\alpha}{}_{(s)} = \frac{1}{s^{\alpha}} \approx \frac{1}{\left(1+\frac{s}{p_T}\right)^{\alpha}} \approx \frac{\prod_{i=0}^{N-1}\left(1+\frac{s}{z_i}\right)}{\prod_{i=0}^{N}\left(1+\frac{s}{p_i}\right)} = \frac{\prod_{i=0}^{N-1}\left(1+\frac{s}{(ab)^i ap_0}\right)}{\prod_{i=0}^{N}\left(1+\frac{s}{(ab)^i p_0}\right)}, \tag{3.13}$$

$$N = \text{int}\left(\frac{\log\left(\frac{\omega_{\max}}{p_0}\right)}{\log(ab)}\right)+1 \tag{3.14}$$

Charef yaklaşım metodu ile elde edilen s^{α} değeri bu denklemlerle belirli frekans aralıklarında belirli hata oranı ile yaklaşık olarak frekans domeninde elde edilebilmektedir.

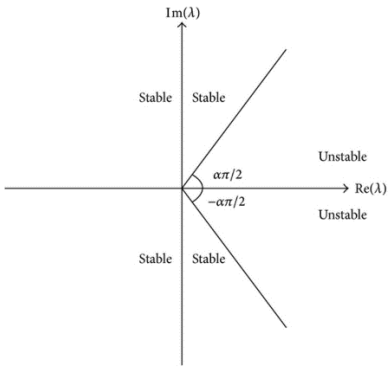
Kaotik sistemler geleneksel hesaplama yöntemleri ile en az üçüncü dereceden dinamik sistemlerle ifade edilebilmekteydi. Kesir dereceli sistem yaklaşımlarında kaotik bir sistemin modellenebilmesi için kesir dereceli bir türev alıcı kullanılmaktadır. Bu çalışmada MATLAB Simulink çalışması ve analog tabanlı FPAA deneysel çalışması için kesir derecesi, frekans domeninde ifade edilmiştir. Bunun için Charef yaklaşım metodu kullanılmıştır. Öncelikle Simulink daha sonrada FPAA uygulaması yapılacak Rössler ve Sprott_h kaotik sistemi için frekans domeninde kesir dereceli transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

Transfer fonksiyonu ile sistemin mimimum kesir derecesindeki öz değerleri bulunur. Hesaplanan her öz değer için kesir derecesi hesaplanır. Sistemi temsil eden kesir derecesi en büyüğü olarak belirlenir [53].

Jacobian matrisi elde edilen sistemdeki öz değerler (λ_1, λ_2,.., λ_n) bulunur. Öz değerler denklem (3.15) ile α kesir derecesi için belirlenir.

$$|\arg(\lambda_i)| > \alpha\pi / 2, \qquad \alpha = \max(q_1, q_2, \ldots, q_n)\ (i = 1,2,\ldots, n), \qquad (3.15)$$

Eğer bir sistem kararlıysa, kesir dereceli sistemde bir noktada kararlı olacaktır. Sistemin kararsız olduğu durumlarda kesir dereceli sistemin kaosa girmesi mümkün olacaktır. Sistemin kararlılık durumu Şekil 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Stability region of the fractional-order system.

Hesaplanan sistemin öz değerleri $\lambda_1 = -1.7452$, $\lambda_2 = 0.3476+i2.2019$ ve $\lambda_3 = 0.3476-i2.2019$ olarak bulunur. Bu durum için kesir dereceleri hesaplanır. Arg (λ_1) = π, arg (λ_2) = 1.41422 ve arg (λ_3) = -1.41422 elde edilir. Sistemin kesir derecesi max(q_1, q_2,q_3) ifadesinden $\alpha=q_2= q_3=0,899$ eşit olur. q_1, q_2 ve q_3'ün hepsi 0.899'dan büyük olduğunda, Denklem (3.15) 'in tüm dengeleri kararsızdır ve dinamik sistemin kaosa girmesi mümkündür.

Charef yaklaşım metodunda örnek olarak hesaplanan transfer fonksiyonu için, literatürde birçok çalışmada verilen kesir derecesi $\alpha = 0,9$ olarak belirlenmiştir. Çalışmada simülasyon ve deneysel uygulama için birçok kesir dereceli transfer fonksiyonu benzer hesaplama yöntemi ile elde edilmiştir.

Yaklaşık transfer fonksiyonu hesaplanacak olan $\alpha = 0,9$ kesir derecesi için; $\omega_{max} = 100\ rad/s,\ \ y = 2\ dB,\ \ p_T = 0,01\ rad/s$ olarak seçilmiştir.

$$p_o = p_T 10^{[y/20\alpha]} = 0,01.10^{[2/20.0,9]} = 0,0129\ ,\ a = 10^{[y/10(1-\alpha)]} = 10^{[2/10(1-0,9)]} = 100$$

$$b = 10^{[y/10\alpha]} = 10^{[2/10.0,9]} = 1,6681\ ,\ ab = 10^{[y/10\alpha(1-\alpha)]} = 10^{[2/10.0,9(1-0,9)]} = 166,81$$

$$N = \text{int}\left(\frac{\log\left(\frac{\omega_{\max}}{p_0}\right)}{\log(ab)}\right)+1 = \text{int}\left(\frac{\log\left(\frac{100}{0,0129}\right)}{\log(166,81)}\right)+1 = \text{int}\left(\frac{3,889}{2,222}\right)+1 = \text{int}\left(1,750\right)+1 = 1+1 = 2$$

İlk olarak ilk kutup değeri daha sonra ise denklem (3.13) ile genelleştirilen transfer fonksiyonu için a, b, ab değerleri bulunmuştur. Daha sonra bulunan sonuçlar kullanılarak transfer fonksiyonunun denklem (3.14) ile boyutu hesaplanmıştır. Elde edilen tüm değerler yerine yazılarak $\alpha = 0,9$ kesir derecesi için transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

$$z_o = p_0 10^{[y/10(1-\alpha)]} = 0,0129.10^{[2/10(1-0,9)]} = 1,29\,,\quad p_1 = z_0 10^{[y/10\alpha]} = 1,29.10^{[2/10.0,9]} = 2,15$$

$$z_1 = p_1 10^{[y/10(1-\alpha)]} = 2,15.10^{[2/10(1-0,9)]} = 2,251\,,\quad p_2 = z_1 10^{[y/10\alpha]} = 215,1.10^{[2/10.0,9]} = 358,80$$

$$I^{0,9}_{(s)} = \frac{1}{s^{0,9}} \approx \frac{1}{\left(1+\frac{s}{0,01}\right)^{0,9}} \approx \frac{\prod_{i=0}^{1}\left(1+\frac{s}{z_i}\right)}{\prod_{i=0}^{2}\left(1+\frac{s}{p_i}\right)} = \frac{\left(1+\frac{s}{(166,81)^0.100.0,0129}\right)\left(1+\frac{s}{(166,81)^1.100.0,0129}\right)}{\left(1+\frac{s}{(166,81)^0.0,0129}\right)\left(1+\frac{s}{(166,81)^1.0,0129}\right)\left(1+\frac{s}{(166,81)^2.0,0129}\right)}$$

$$= \frac{\left(1+\frac{s}{1,29}\right)\left(1+\frac{s}{215,18}\right)}{\left(1+\frac{s}{0,0129}\right)\left(1+\frac{s}{2,15}\right)\left(1+\frac{s}{358,94}\right)} = \frac{\left(1/\,p_T{}^{\alpha}\right)\left(0,036s^2+7,77s+10\right)}{s^3+361s^2+776s+10} = \frac{\left(1/\,0,01^{0,9}\right)\left(0,036s^2+7,77s+10\right)}{s^3+361s^2+776s+10}$$

$$= \frac{\left(1/\,0,01^{0,9}\right)\left(0,036s^2+7,77s+10\right)}{s^3+361s^2+776s+10} = \frac{63,095.\left(0,036s^2+7,77s+10\right)}{s^3+361s^2+776s+10} = \frac{2,271s^2+490,24s+630,95}{s^3+361s^2+776s+10}$$

α = 0,9 kesir derecesi elde edilen transfer fonksiyonunda pay kısmına numerator, payda kısmına ise denominatör denilmektedir. Denklem (3.16)'da $\alpha = 0,9$ kesir dereceli sistemin frekans domeninde transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Transfer fonksiyonu Simulink tasarımında ve FPAA CAM (Configurable Analog Module) tasarımında kullanılmıştır.

$$H(s) = \frac{num(s)}{den(s)} = \frac{2,271s^2+490,24s+630,95}{s^3+361s^2+776s+10} \tag{3.16}$$

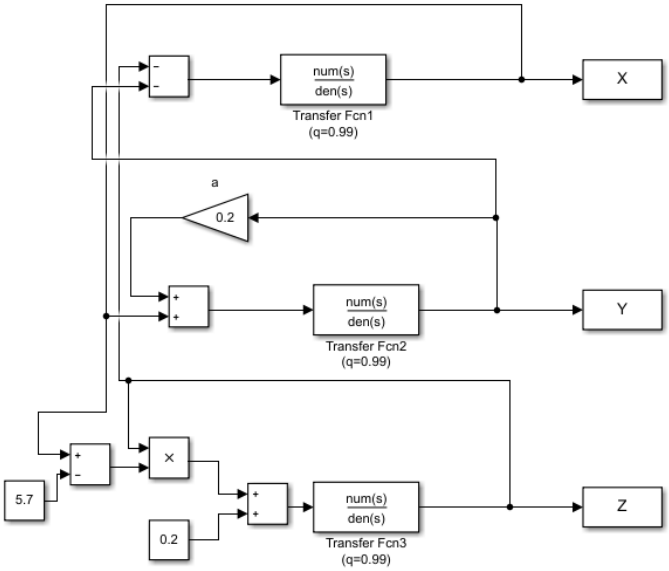
Transfer fonksiyonu sistemin, frekans domenindeki giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi açıklar. Transfer fonksiyonunda payda derecesi, payın derecesinden büyük veya eşit olmalıdır.

3.4 Kesir Dereceli Rössler Kaotik Üreteci

Rössler kaotik sisteme ait kesir dereceli dinamik sistemi Denklem (3.17)'de verilmiştir [54]. Kaotik sistem dinamik denklemleri üç boyutlu olup, altı terimden oluşmaktadır.

$$D_t^{q1}x(t) = -y(t) - z(t)$$
$$D_t^{q2}y(t) = x(t) + a.y(t) \qquad (3.17)$$
$$D_t^{q3}z(t) = x(t).z(t) - c.z(t) + b$$

burada q1, q2 ve q3 kesirli türev alıcının dereceleridir. Matematiksel modelde verilen a=0,20, b=0,20 ve c=5,7 sistem parametrelerinin değerleri ve kaotik sistemin başlangıç şartları (x_0=0, y_0=0, z_0=0) olarak verilmiştir. Bir önceki başlıkta anlatılan hesaplama yöntemi kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonları kullanılarak Şekil 3.2'de gösterilen Rössler kaotik sistemin Simulink tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kesir dereceli analizi yapılacak Rössler kaotik sistemin Jacobian matrisinin öz değerleri yukarıda verilen başlangıç değer ve parametreler için $\lambda_1 = -5.68718$, $\lambda_2 = 0.0971028+i0.995786$ ve $\lambda_3 = 0.0971028-i0.995786$ bulunur. Bu durum için öz değer kesir dereceleri Arg (λ_1) = π, arg (λ_2) = 1.47359 ve arg (λ_3) = -1.47359 bulunmuştur. Bu durumda kesir derecesi max(q_1, q_2,q_3) ifadesinden $\alpha=q_2= q_3$=0,9377 eşit olur. Çalışmada tüm dereceler birbirine eşit seçilerek 0,91-0,99 derecelerinde simülasyon gerçekleştirilmiştir.

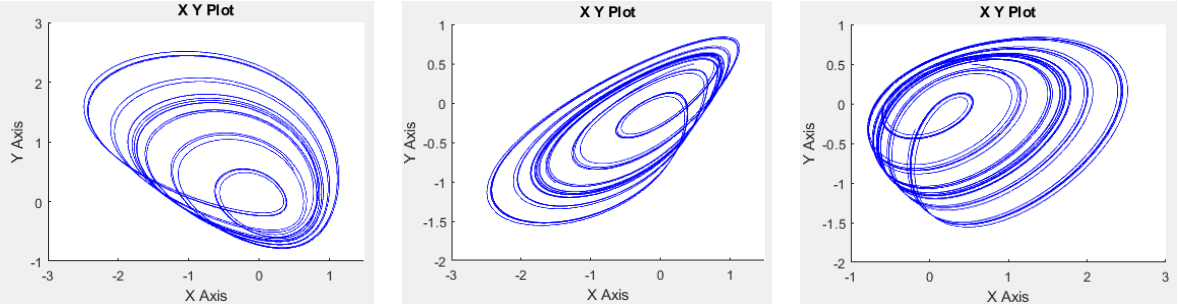


Şekil 3.2 Kesir dereceli Rössler kaotik sistemin kesir dereceli Simulink modeli.

Kaotik tabanlı haberleşme sistemlerinin en temel yapısı kaos sinyal üreteçleridir. Kaos sinyalleri haberleşme sistemlerinde bilgi sinyalinin alıcı devreye ulaşmasını sağlar ve son yıllarda Matematiğin popüler çalışma alanlarından biri de kesir dereceli hesaplamadır. İlk olarak 1695 yıllarında kesir dereceli analizler yapılmıştır. Kesirli dereceli hesaplama, kesir dereceli diferansiyelleri ve kesir dereceli integralleri içerir. Kesir dereceli hesaplama son yıllarda çeşitli alanlarda araştırma ve uygulama alanları bulmaktadır. Kesir dereceli analizin doğa bilimleri ve mühendislik uygulamalarında birçok problemin matematiksel tanımlanmasında gerçek yaklaşımlar önermektedir. Kesir dereceli hesaplamada bir kaotik sistemin kesir dereceli sayısal algoritmalarını ve kesir dereceli senkronizasyonunu içermektedir. Kesir dereceli türevlerin birçok tanımı vardır. Çalışmada Grünwald-Letnikov yaklaşım metodu kısaca açıklanmıştır.

3.4.1 Grünwald-Letnikov Metodu ile Kesir Dereceli Analiz

Kesir dereceli hesabı yapılacak olan Sprott_h kaotik üreteci öncelikle denklem (3.3), denklem (3.4) ve denklem (3.5) içintransfer fonksiyonları elde edilmiştir. Son olarak Denklem (3.6) 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. Bir sistemin kesir dereceli modellenmesiyle sistem gerçek davranışına yakınsar. Böylelikle sistemin komşu tamsayılara yuvarlanması engellenmiş olur. Kaotik osilatörlerde kesir dereceli tasarım yeni bir parametre gibi sistemin karmaşıklığının artmasına neden olur. Kesir dereceli analiz doğrusal olmayan sistemlerin gerçek davranışlarını modelleyerek sistemin kontrol edilebilirliğini artırır. Diğer taraftan kaotik sinyallerin karmaşıklığının artırılmasına katkı sağlayarak güvenilir haberleşme sistemlerinde taşıyıcı sinyalin tahmin edilebilirliğini azaltırken sistemin güvenilirliğini artırmaktadır. Kesir dereceli tanımlamalardan biri Grünwald-Letnikov olarak bilinen yöntemdir [51]. Yapılan çalışmada kesir dereceli sistemin modellenmesinde bu yöntem kullanılmıştır.



(a) (b) (c)

x-y faz-uzay gösterimi x-z faz-uzay gösterimi y-z faz-uzay gösterimi

Şekil 3.3 Sprott_h faz uzay gösterimi.

Uygulamada Sprott_h kaotik üretecinin kesir derecesi $q_1 = q_2 = q_3 = 0{,}92$ için analiz yapılmış ve elde edilen benzetim sonuçları Şekil 3.3'de verilmektedir.

4. KAOTİK TABANLI HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Haberleşme sistemleri anlamlı bir bilginin alışverişini gerçekleştiren aşamaların tamamını içermektedir. Haberleşme sistemleri özellikle insanlık tarihinin başlangıcından günümüze kadar gelişim göstermiştir. Teknolojinin gelişimi ile özellikle geniş bant haberleşme gereksinimi ve bilgi iletiminde güvenlik ihtiyacı farklı haberleşme sistemlerine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Teknolojinin gelişimi ile haberleşme sistemlerinde ilerleme sağlanırken bilgi güvenilirliğinin önemi de artmıştır. Geleneksel haberleşme sistemlerinde bilgi sinyali verici alıcı devreler arasında taşıyıcı sinyal kullanılarak sağlanır. Haberleşme sistemleri analog tabanlı veya sayısal tabanlı olarak gerçekleştirilebilir. Analog tabanlı haberleşme sistemlerinde taşıyıcı sinyal olarak sinüzoidal sinyaller kullanılırken sayısal tabanlı sistemlerde kare dalga kullanılmaktadır. Bu sinyallerin tahmin edilebilir olması ve periyodik olması geleneksel haberleşme sistemlerinin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu durum güvenilir haberleşme sistemleri için periyodik olmayan ve öngörülemeyen taşıyıcı sinyaller kullanılması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Kaotik sinyallerin en önemli özelliği, güvenilir haberleşme sistemlerinde taşıyıcı sinyallerde olması gereken karakteristikleri taşımasıdır. Bu nedenle kaotik sinyallerin son yıllarda taşıyıcı sinyal olarak kullanıldığı çalışmalar artmaktadır. Kaotik sinyallerin özellikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Sürekli güvenilir ve güvenli sistemler, modern haberleşme sistemlerinde özellikle askeri uygulamalarda en önemli ilgi alanıdır. Yayılım spektrum teknikleri, verici tarafından iletilen sinyallerin istenmeyen etkileşimler için koruma sağlamaktadır. Kaotik haberleşme sistemlerinde birçok yayılı spektrum sistemi geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaotik sinyaller kullanılarak güvenli haberleşme sistemleri gerçekleştirilmektedir. Bu kaotik sinyaller gürültü benzeri, periyodik olmayan, başlangıç koşullarına çok duyarlı ve geniş bantlıdır. Kaotik sinyaller deterministik bir davranışa sahiptir. Diğer taraftan sinüzoidal bir taşıyıcı, dar bir frekans bandında yoğunlaşan bir spektral güç yoğunluğu üretirken, kaotik sinyaller geniş bir bant genişliği üretmektedir. Bu durum taşınmak istenen bilgiyi yaymak için kaotik sinyallerin kullanılabileceği fikrini ortaya koymaktadır. Yıllar boyunca birçok kaotik karıştırma tekniği geliştirilmiştir [55-57]. Bu tekniklerin çoğu, Chua'nın kaotik osilatörünü bilgi taşıyıcı bir kaos üreteci kullanır.

4.1 Kaos Tabanlı İşaretlerin Özellikleri

Kaos tabanlı sinyal üreteçlerinin en önemli özelliklerinden biri başlangıç değerine karşı aşırı duyarlı olmasıdır. İlk olarak Lorenz tarafından fark edilen bu özellik farklı başlangıç koşullarında sistem davranışlarının değiştiğini ortaya koymuştur. Bu özellik kaos tabanlı sinyalleri periyodik sinyallerden ayıran önemli karakteristiklerden biridir. Ayrıca kaos tabanlı sinyallerin sistem davranışlarını belirleyen sistem parametrelerine olan hassasiyeti de kaos sinyallerinin tahmin edilebilirliğini azaltmaktadır. Kaotik tabanlı sistemlerde, sistemi kaosa götüren parametrelerdeki küçük değişiklikler dinamik sistemin davranışını da değiştirecektir. Kaos tabanlı sinyallerin tüm bu karakteristikleri özellikle güvenilir haberleşme sistemlerinde kullanılan sinyallerde olması istenilen özelliklerdir.

Kaos tabanlı sinyaller, frekans domeninde geniş bant spektrumuna sahip, önceden tahmin edilemeyen ve gürültüye benzeyen sinyallerdir. Kaotik devreler ayrıca çok az sayıda devre elemanı kullanılarak gerçekleştirilirler. Kaos teorisi üzerine yapılan çalışmaların başlarında kaos sinyalleri, bilinen sinyallere benzemediğinden gürültü gibi tanımlanmaktaydılar. Daha sonraki çalışmalarda bu özellikleri ile özellikle güvenli haberleşme sistemlerindeki kullanımı yaygınlaştı. Kaos sinyalleri periyodik olmadıklarından yayılı spektruma sahiptirler. Bu durum sayesinde geniş bant haberleşmede taşıyıcı olarak kullanılan kaos sinyalleri geleneksel haberleşme sistemlerine göre bilgi sinyallerinin gizlenmesinde daha iyi performans sağlarlar [58,59].

4.2 Kaotik Tabanlı Haberleşme Sistemleri

Kaos tabanlı haberleşme sistemleri bilinen haberleşme sistemlerinde olduğu gibi analog ve sayısal tabanlı haberleşme sistemleri olarak ikiye ayrılır. Kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde analog sinyal kullanımında en önemli problem alıcı devrelerde kaos sinyalinin senkronizasyonunun sağlanması zorunluluğudur [60]. Bu problemin çözümü için literatürde birçok yöntem önerilmiştir [61-65]. Kaos tabanlı haberleşme sistemlerindeki bu çalışmalar güvenilir haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi açısından bir başlangıç noktası olmuştur. Bu amaçla gerçekleştirilen kaos tabanlı analog haberleşme sistemleri üç temel yapıya ayrılabilir: kaotik maskeleme, kaotik modülasyon ve kaotik anahtarlama olarak

adlandırılır. Son yıllarda birçok yeni tasarım önerilmiş olmasına rağmen, bunların çoğu aslında bu üç temel planın değiştirilmiş veya genelleştirilmiş uygulamalarıdır. İlk olarak Yamada ve Fujisaka [66] daha sonra ise Afraimovich [67] alıcı devrelerde senkronizasyonu sağlamak için bazı yöntemler önermişlerdir. Ancak bunlar, Pecora ve Carroll'ın kaotik senkronizasyon yöntemini tanıttıkları ve iletişimi güvenli hale getirme önerisini öne sürdükleri yönteme kadar çok fazla ilgi uyandırmamıştır [68]. Pecora ve Carroll'ın önerdikleri yaklaşımda, bir master sistem ve bir slave sistemi gereklidir; master sistemin tek bir dinamik sinyali, slave sisteminin kaos üretecini alıcı devrede gerçekleştirimini sağlar [68,69].

PC(Pecora-Carroll), kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde senkronizasyon olarak bilinen en temel metodlardandır. PC senkronizasyon metoduyla, verici devredeki kaotik dinamik sistemden bir durum değişkeni verici devreye gönderilir. Verici devrede durum değişkeninin üretildiği kısım master, alıcı devrede kopya alt sistemin üretildiği devre ise slave devre olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemde vericide ve alıcıda bulunan sürücü ve cevap sistemleri kendi aralarında sürekli senkronizayona sahiptirler [68,69]. Pecora ve Carroll, önerdikleri bu sistemle sekronizasyonun sağlanabilmesi için sürücü ve cevap alt sistemlerinde taşıyıcı sinyallerin Lyapunov üstellerinin negatif olması gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Alt sistemlerin kendi aralarında senkronize olmasıyla gerçekleşen bu metotta ilk olarak;

$$\dot{u} = f(u)\,,\ u = (u_1, \ldots\ldots, u_n)$$

Şeklinde verilen bir dinamik sistem,

$$\dot{v} = g(v, w)$$
$$\dot{w} = h(v, w)$$

gibi iki ayrı alt sisteme ayrılır.

Dinamik sistemde m hücre indeksini ifade eder. Buna göre;

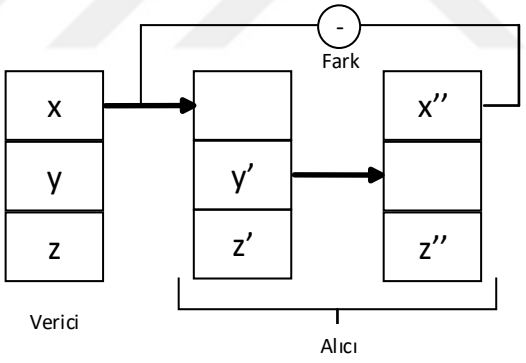
$$v = (v_1, \ldots\ldots, v_m)\,,\ g = (g_1, \ldots\ldots, g_n)\ ,\ w = (w_1, \ldots\ldots, w_{n-m})\ ,\ h = (h_1, \ldots\ldots, h_{n-m})$$

Denklemleri elde edilir. Böylece w alt sisteminin kopyası oluşturulur ve alt sistemin değişkenleri w′ olarak ifade edilir.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= g(v, w) \\ \dot{w} &= h(v, w) \\ \dot{w'} &= h(v, w') \end{aligned} \tag{4.1}$$

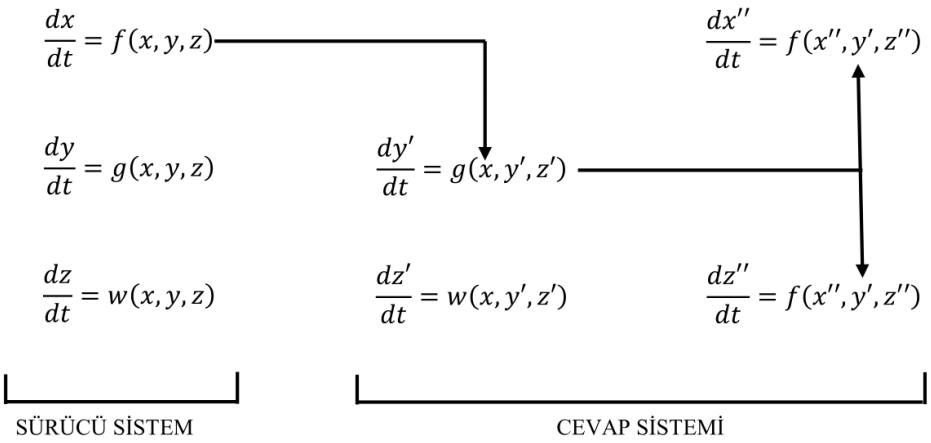
v alt-sistemi, w′ ile bağımsız çalışırken "sürücü sistem" olarak adlandırılır ve v işareti, w′ alt-sistemini sürmek için bu sistemle beslenir. w′ alt-sistemi "cevap sistemi" olarak adlandırılır. Sürücü ve cevap alt sistemleri senkronize olana kadar belli bir zaman geçecektir. Senkronize olduklarında sürücü ve cevap sistemlerinde parametre farkı sıfıra iner. Senkronizasyonun gerçekleşip, farkın sıfır olması için sistemin Lyapunov üstellerinin negatif olması yeterli olur [70].

Şekil 4.1 PC senkronizasyon metodunun blok diyagramını göstermektedir. Diyagramda verici devredeki sürücü sistem ve alıcı devredeki cevap sistemine ait gösterim bulunmaktadır.



Şekil 4.1 PC senkronizasyon sisteminin blok diyagramı.

Pecora-Carroll (P-C) peş peşe bağlama metodunun bir başka anlatım şekli de Şekil 4.2 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.2 PC senkronizasyon sisteminin denklemler ile gösterimi.

4.3 Kaotik Anahtarlamalı Haberleşme Sistemleri

Kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde kaotik sinyallerin karakteristikleri haberleşme sisteminin ana karakteristiğini oluşturur. Bu nedenle kaos tabanlı taşıyıcı üreteç kullanılan haberleşme sistemleri geleneksel haberleşme sistemlerine göre bilgi güvenilirliği açısından daha avantajlıdır. Kaotik sinyallerin parametre ve başlangıç değerlerine olan hassasiyeti haberleşme sistemlerinin de temel karakteristiği olarak ön plana çıkmaktadır [55]. Böylece sistemin karakteristiği kaotik sinyallerin karakteristiğini yansıtır.

Dar bantlı haberleşme sistemlerinde bilgi sinyalinin geniş bantlı kaotik karakteristikler taşıyan taşıyıcı sinyal ile modüle edilmesi, bilgi sinyalinin bant genişliğini değiştirmemekle birlikte, güç spektral yoğunluğunu azaltır. Güç spektral yoğunluğunun azalması haberleşme sisteminde bilgi sinyalinin iletim hattı boyunca ortam gürültüsü içerisinde gizlenmesini sağlar. Böylece kaos sinyalinin taşıyıcı sinyal olarak kullanılması, bilgi sinyalinin sistem dışından fark edilmesini ve müdahale edilmesini zorlaştırır [71].

Kaos tabanlı yayılı spektrum haberleşme sistemleri düşük kesişim olasılığı (low probability of intercept - LPI), sinyal bozucu cihazlara karşı yüksek direnci, çoklu-erişim imkanı, çok yönlü sinyal koruma ve ideal kanal şartlarındaki gürültü performansı gibi özellikleriyle son yıllarda artan bir ilgiye sahiptir [56].

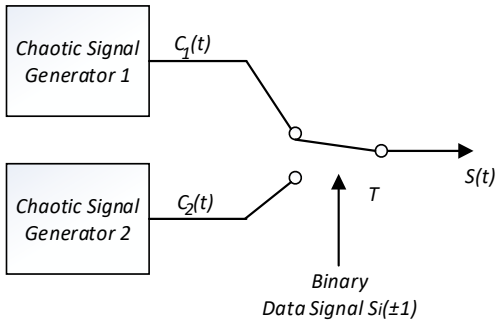
Kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde en önemli problem taşıyıcı sinyallerin alıcı devrelerde yeniden elde edilmesi gerekliliğidir. Üstelik başlangıç değerlerine olan aşırı

hassasiyeti alıcı devrelerde kaos sinyalinin elde edilmesini ve senkronize olmalarını zorlaştırır. Bu nedenle sürekli senkronizasyon gerektirmeyen [71] sayısal tabanlı anlık senkronize olabilen non-coherent [72] haberleşme sistemleri giderek önem kazanmaktadır. Bu hem kaotik sinyallerin hem de periyodik sinyallerin taşıyıcı olarak kullanıldığı sistemler için geçerlidir [73].

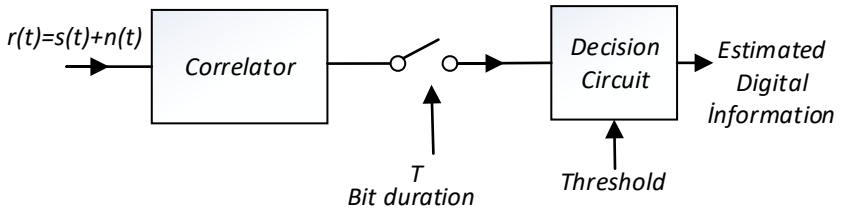
Bu tez çalışmasında sayısal bilgi iletiminde kullanılan ve anlık senkronize olan non-coherent DCC sistemleri olan CSK, DCSK, COOK ve QCSK sistemleri analitik olarak incelenmiştir. Ayrıca DCC sistemler arasında en iyi BER/SNR (Bit Error Rate / Signal Noise Rate) performansına sahip DCSK'nın benzetimi yapılarak sonuçları analiz edilmiştir. Ancak karmaşık devre yapısından dolayı yapılan çalışmalarda, gerek basit yapısı gerekse de benzer BER/SNR performansı ile DCSK'ya en yakın haberleşme sistemi olan COOK haberleşme sistemi tercih edilmiştir. COOK haberleşme sisteminin benzetimi gerçekleştirildikten sonra FPGA ve FPAA gömülü sistemlerde de deneysel uygulaması yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. DCC sistemlerin tüm bu analizleri neticesinde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek BER/SNR performansını etkileyen parametreler belirlenmiştir. Buradan yola çıkılarak daha iyi BER/SNR performansı elde edebileceğimiz bir haberleşme modeli önerilmiştir.

4.3.1 Kaos Kaymalı Anahtarlama (CSK)

CSK sayısal tabanlı haberleşme sistemi 1998 yılında Kolumban'ın önerdiği anlık senkronizasyon olmayan bir haberleşme modelidir. Gönderilen bilgi sinyalinin farklı enerji seviyeleri için kaotik üreteç anahtarlanarak verici devre oluşturulur. Şekil 4.3 ile verilen devrede iki farklı kaotik üreteç veya aynı üretecin farklı bir durum değişkeni kullanılarak gerçekleştirilir [74].



(a)



(b)

Şekil 4.3 a) CSK verici blok şeması, b) CSK alıcı blok şeması [78].

CSK haberleşme sisteminde, iletilen bilgi sinyali '+1' olduğunda $c_1(t)$, '-1' olduğunda $c_2(t)$ kaos sinyali iletilir.

$$s(t) = \begin{cases} c_1(t), & '+1' \text{ bilgisi için} \\ c_2(t), & '-1' \text{ bilgisi için} \end{cases} \tag{4.2}$$

Denklem (4.2)'de verici çıkışına ortam gürültüsü eklenerek alıcıya iletilir.

$$s_{CSK}(t) = s(t) + n(t) \tag{4.3}$$

Alıcı devrede Denklem (4.3)'deki $s_{CSK}(t)$, alıcı devrede körele edilerek integratöre tabi tutulur.

$$z_i = \int_T r^2(t)dt = \int_T [s(t) + n(t)]^2 dt$$

$$= \int_T s^2(t)dt + 2\int_T s(t).n(t)dt + \int_T n^2(t)dt \tag{4.4}$$

İntegral çıkışında elde edilen değer eşik dedektöründen geçirilerek eşik değerinden büyük değerler için +1 küçük değerler için sıfır bilgisi elde edilir.

5. KESİR DERECELİ KAOS TABANLI HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN FPAA TASARIMI VE HATA PERFORMANS ANALİZLERİ

Sayısal tabanlı haberleşme sistemlerinde verici devrede bilgi sinyali taşımada kullanılan doğrusal olmayan yapıdaki taşıyıcı kaos sinyallerinin orthogonal yapılarının BER/SNR 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 karşılaşılmıştır. Bu nedenle esnek kullanım ve yüksek hızları nedeniyle sayısal tabanlı FPGA yapıları kullanılmaktadır [75]. 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.

5.1 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 çatallanma 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 senkronie edilmişse iletilmek istenen bilgi sinyali yeniden elde edilebilir [5,8,76]. Bu haberleşme sistemlerine coherent haberleşme sistemi, senkronize sağlanmadan bilgi sinyallerinin elde edilmesini sağlayan haberleşme sistemlerine ise non-coherent haberleşme sitemi denilmektedir [5]. Sayısal tabanlı bilgi sinyalinin iletilmesini sağlayan bir diğer modülasyon tekniği, diferansiyel anahtarlama yaklaşımına dayanan, diferansiyel kaos kaydırmalı anahtarlama (DCSK) olarak bilinir[11]. 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 yöntemlerindendir. 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 [6,23]. 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;

$$\dot{u} = f(u),\ u = (u_1, \dots\dots, u_n) \tag{5.1}$$

Denklem (5) ile tanımlanan kaotik yapı,

$$\dot{v} = g(v, w)$$
$$\dot{w} = h(v, w) \tag{5.2}$$

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

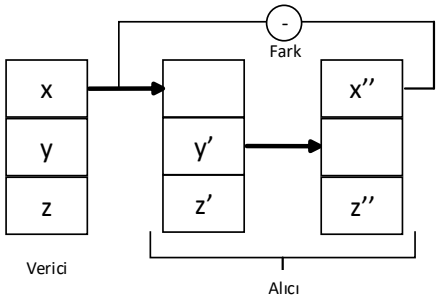
$$\begin{aligned} v &= (v_1, \dots\dots, v_m) \\ g &= (g_1, \dots\dots, g_n) \\ w &= (w_1, \dots\dots, w_{n-m}) \\ h &= (h_1, \dots\dots, h_{n-m}) \end{aligned} \tag{5.3}$$

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

$$\dot{v} = g(v, w)$$
$$\dot{w} = h(v, w) \tag{5.4}$$
$$\dot{w'} = h(v, w')$$

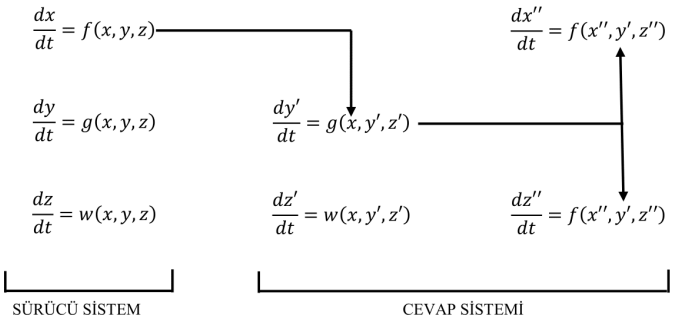
PC tekniğinde sürücü ve cevap kısımları senkronize olana kadar belli bir süre geçmektedir. Senkronize olduklarında iletilen durum değişkeninin hata payı sıfır olur ve sistemin Lyapunov üstellerinin negatif değer alır [70].

Şekil 5.1 PC senkronizasyon tekniğinin blok diyagramını göstermektedir. Diyagramda verici devrede sürücü sistem ve alıcı devrede cevap sistemine ait gösterim bulunmaktadır.



Şekil 5.1 PC senkronizasyon sisteminin blok diyagramı.

Ayrıca PC tekniğine ait denklemlerle ifade edilen bir diğer gösterim ise Şekil 5.2 ile gösterilmektedir.



Şekil 5.2 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 içerisinden ise hata fonksiyonu oluşmaktadır.

5.2 FPAA Tabanlı Analog Tasarım

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

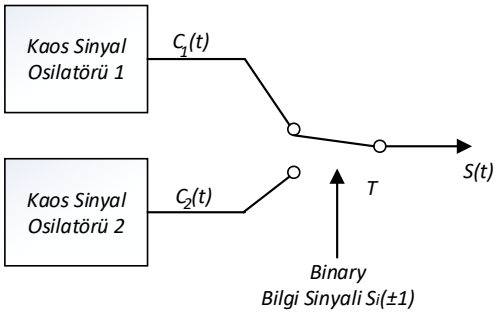
yapılarında kaotik sinyallerdeki uzun periyotlardaki yuvarlama hatalarından kaynaklanan periyodikliğe girme probleminin aşılması amaçlanmıştır. Çalışma ile kesir dereceli dinamik sistemler Grünwald–Letnikov's yaklaşım yöntemi ile tasarlanarak benzetim sonuçları elde edilmiştir.

Kaotik sistemler geleneksel hesaplama yöntemleri ile en az üçüncü dereceden dinamik sistemlerle ifade edilebilmekteydi. Kesir dereceli sistem yaklaşımlarında kaotik bir sistemin modellenebilmesi 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 [77].

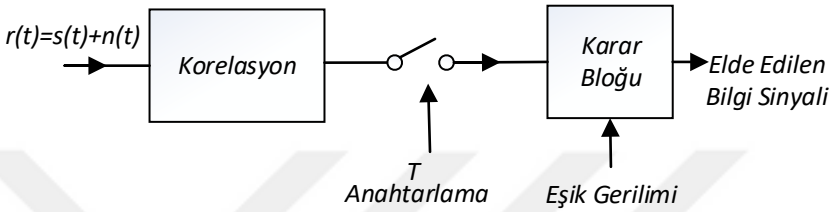
$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -y + z^2 \\ \frac{dy}{dt} &= x + 0{,}5y \\ \frac{dz}{dt} &= x - z \end{aligned} \tag{5.5}$$

(5.5) 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 anahtarlamasıyla modülasyon sinyali elde edilir. Bu sinyale ortam gürültüsü eklenir. Aşağıdaki verici blok şemasında bu anahtarlama modellenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.3 a) CSK Verici blok şeması, b) CSK Alıcı blok şeması (Dedieu vd., 1993).

Denklem (5.6) ile verici blok şeması ifade edilmek istenirse CSK modülasyon sisteminde iletilen bilgi sinyali için anahtarlanan $c_1(t)$ ve $c_2(t)$ kaotik durum denklemleri gösterilmiştir.

$$s(t) = \begin{cases} c_1(t), & \text{'1' bilgisi iletildiğinde} \\ c_2(t), & \text{'-1' bilgisi iletildiğinde} \end{cases} \tag{5.6}$$

Denklem (5.7) ile vericide elde edilen modüleli sinyale eklenen gürültü sinyali gösterilmektedir.

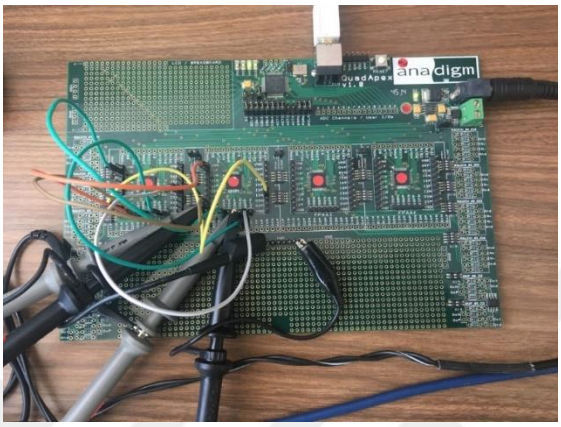
$$s_{CSK}(t) = s(t) + n(t) \tag{5.7}$$

Alıcı girişinde gürültü eklenen modüleli sinyal denklem (5.8) ile gösterilmektedir. Şekil 5.3 (b) ile gösterilen alıcı blok şemadaki $s_{CSK}(t)$ sinyali alıcı girişinde korelasyonu tabi tutularak integrali alınmaktadır.

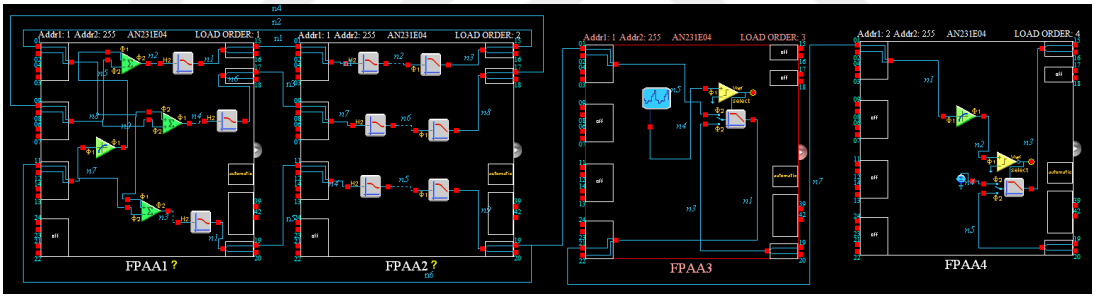
$$z_i = \int_T r^2(t)dt = \int_T [s(t) + n(t)]^2 dt \tag{5.8}$$

$$= \int_T s^2(t)dt + 2\int_T s(t).n(t)dt + \int_T n^2(t)dt$$

İntegratör çıkışındaki sinyal eşik karar bloğuna uygulanarak elde dilen 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 5.4 ile gösterilmiştir. Şekil 5.5'de ise FPAA ile haberleşme sisteminin tasarımı verilmektedir. Şekil 5.5'de gösterildiği gibi tasarlanan haberleşme sisteminde kullanılan blokların işlevleri ise Tablo 5.1 ile açıklanmıştır.

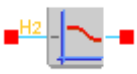
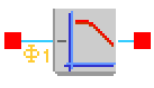


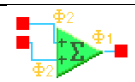
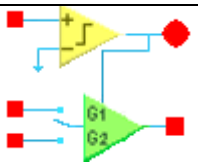
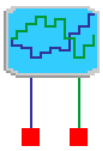
Şekil 5.4 AN231K04-QUAD4 tipi FPAA geliştirme kartı ve Picoscope osiloskop deneysel kurulum.



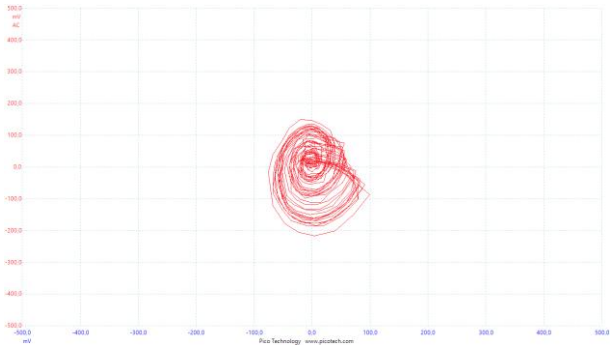
Şekil 5.5 AnadigmDesigner2 gerçekleştirim şeması.

Tablo 5.1 FPAA Gerçekleştirim Blok Şeması.

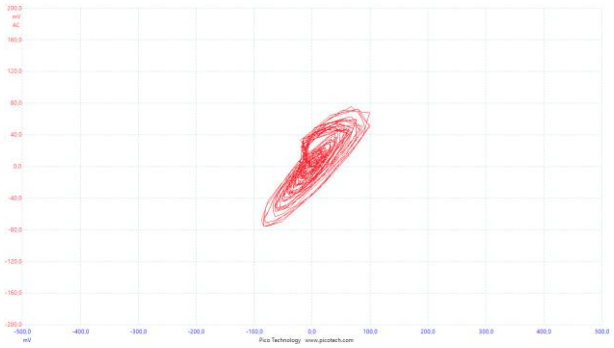
FILTERBILINEAR BLOCK		*FILTERBİLİNEAR BLOCK, FPAA1 ve FPAA2'de Laplace dönüşümlerini kullanarak bulunan kutup ve sıfır noktalarının frekanslarının tanımlanmasını sağlar.*
FILTERBILINEAR BLOCK		*FILTERBİLİNEAR BLOCK, FPAA1 ve FPAA2'de Laplace dönüşümlerini*

		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.

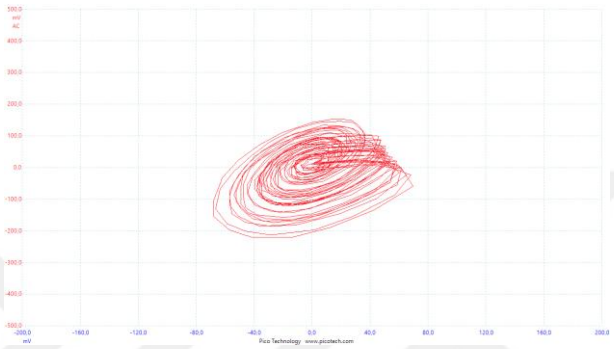
Çalışmada taşıyıcı işaret olarak kullanılan Sprott_h kaotik sisteme ait Şekil 5.6 ile x-y faz uzay gösterimi, Şekil 5.7 ile x-z faz uzay gösterimi ve Şekil 5.8 ile y-z faz uzay gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.6 Sprott H kaotik osilatörün FPAA platformunda x-y faz-uzay gösterimi.



Şekil 5.7 Sprott H kaotik osilatörün FPAA platformunda x-z faz-uzay gösterimi.

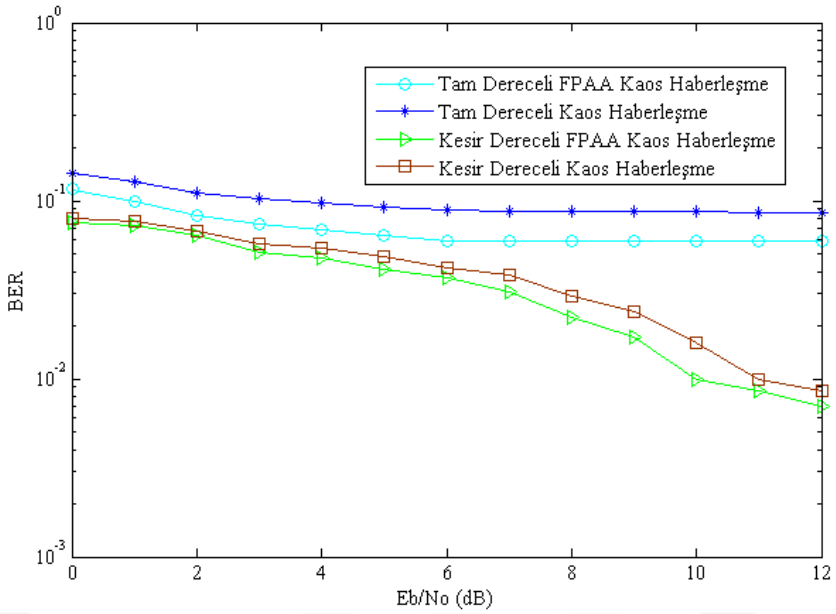


Şekil 5.8 Sprott H kaotik osilatörün FPAA platformunda y-z faz-uzay gösterimi.

DCC haberleşme sisteminde BER/SNR oranı denklem (5.9) ile hesaplanmaktadır. Denklem (5.9)'da E_b kaotik modülatörün çıkışındaki bit enerjisini ve erfc hata fonksiyonunu ifade ederken, No/2 gürültü dağılımını ifade etmektedir [78].

$$BER = {}^{1}/_{2}\, erfc\left(\sqrt{\frac{E_b}{4No}\left(1+\frac{\beta No}{2E_b}\right)^{-1}}\right) \tag{5.9}$$

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 5.9' da verilmiştir.



Şekil 5.9 Kesir dereceli kaos üretecin 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 yapılı 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 5.9'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde çalışmada tasarlanan haberleşme sisteminin daha iyi performans gösterdiği ortaya konulmuştur.

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 güvenirliğini de artıracak bir parametre olarak görülmektedir.

6. SONUÇ TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde bit hata oranını azaltarak haberleşme performansını artıracak bir tasarım amaçlanmıştır. Bunun için bir haberleşme sisteminde en önemli olan taşıyıcı sinyaln gerçek sistem davranışı elde edilebilmesi için kesir dereceli analiz yöntemleri incelenmiştir. Bu nedenle yapılan tez çalışması teorik literatür taramasının yanında, bilgisayar benzetimi ve analog tabanlı deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kaotik sinyaller kullanılarak gerçekleştirilen haberleşme sistemleri literatürde sürekli senkronizasyon ve anlık senkronize olan sistemler olarak bilinir. Kaotik sinyallerin taşıyıcı sinyaller olarak kullanıldığı DCC sistemlerde, özellikle analog tabanlı tümleşik yapılarda ve ayrık devre elemanları kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda sürekli senkronizasyon gerçekleştirmek oldukça zordur. Bu zorluğu ortadan kaldırmak ve senkronize olma sürelerini azaltmak için kaotik üreteçler yeniden modellenmiştir. Diğer taraftan bu yöntem senkronizasyon süresini azaltırken aynı zamanda sistemin karmaşık yapısını da artıracaktır. Bu haberleşme sisteminin güvenilirliğini de artıracaktır.

Bu kapsamda, tez çalışmasının ikinci bölümünde öncelikle kaos sinyallerinin temel karakteristikleri ve kaos analizleri geçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde var olan kaos yapıları tanıtılarak kaos türleri hakkında bilgi verilmiştir. Ardından kaos üreteçleri sayısal tabanlı devre platformu FPGA ve FPAA yapılarından bahsedilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde, kesir dereceli hesaplama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca Rössler modelinin kesirli transfer fonksiyonunu elde edilmesi ayrınıtılı olara anlatılmıştır.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde, Literatürde var olan kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde kullanılan senkronizasyon ve modülasyon teknikleri incelenmiştir. Özellikle sayısal tabanlı modülasyon teknikleri incelenerek benzetim çalışmaları ortaya konmuştur. Sayısal tabanlı modülasyonlardan CSK haberleşme sistemini denklem ve blok diyagram anlatımı verilmiştir.

Tez çalışmasının beşinci bölümünde, Sprott_h kaotik sinyali Grünwald–Letnikov's yaklaşım yöntemi ile esir dereceli olarak yeniden modellenerek benzetim ve FPAA

deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar ilk olarak tam dereceli olarak daha sonra ise kesir dereceli olarak modellenmiştir. Elde edilen BER/SNR oranları farklı gürültü seviyeleri için karşılaştırılmıştır. Tüm deneysel sonuçlar karılaştırıldığından tezin nihai hedefi başarılı olarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasından elde edilen sonuçlardan hareketle;

- Kaos tabanlı haberleşme sistemlerinde sadece bilgi güvenilirliğinin artırılması için yapılan farklı modülasyon çalışmalarının değil aynı zamanda haberleşme performansını etkiyen faktörlerin de araştırılması ve çözüm önerileri ortaya konması gerektiğinden de bahsedilebilir.

- Bu nedenle gerek kaotik üreteç yöntemlerinin gerçek sistem davranışlarının elde edilmesinde gerekse de sistam karmaşıklığnın artırılmasında kesir dereceli analiz yöntemleri kullanılmalıdır.

- Son olarak sayısal sistemlere göre yuvarlama hatası olmayan ve oldukça kolay programlanabilen FPAA yapıların tercih edilmesi yukarıda belirtilen amaçlara ulaşılmasında önemli katkılar sağlamıştır. FPAA yapıların gerçek sistem davranışın önemli olduğu başta kaotik olmak üzere özellikle kontrol sistemlerinde uyguulama platformu seçilmesi önerilmektedir.

Bu çalışma neticesinde elde edilen bilgi ve birikim ile farklı kaos üreteçleri modellenerek başta bilgi güvenliğinin artırılması olmak üzere diğer uygulama alanlarında araştırmalar yapılacaktır.

KAYNAKÇA

[1] **Holmes P**. (1990). Poincare, celestial mechanics, dynamical-system theory and chaos [J]. *Physics Reports*, 193(13):137-163.

[2] **Ott E**., **Grebogi C**., **Yorke J. A**. (1990). Controlling chaos. *Physical review letters*, 64(11):1196.

[3] **Lorenz E. N**. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*, 20(2):130-141.

[4] **Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D**. (2006). Chaos and Fractals: *New Frontiers of Science. Springer Science & Business Media.*

[5] **Kennedy M. P., Kolumbán G.** (2000). Digital communications using chaos. *Signal processing*, 80(7):1307-1320.

[6] **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.

[7] **Chua L. O., Desoer C. A., Kuh E. S.** (1987). *Linear and Nonlinear Circuits*. McGraw-Hill College.

[8] **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.

[9] **Abdullah H. N., Valenzuela A. A**. (2011). Performance evaluation of FM-COOK chaotic communication system. *Journal of Signal and Information Processing*, 2(03):175.

[10] **Kolumbán G**. (1997). *Performance improvement of chaotic communication systems, Proc. ECCTD'97*, 284-289.

[11] **Kolumbán G., Vizvári B., Schwarz W., Abel A**. (1996). *Differential chaos shift keying: a robust coding for chaos communication, Proc. NDES*, 87-92.

[12] **Chua L. O., Yang L**. (1988). *Cellular neural networks: Applications*. IEEE Transactions on circuits and systems, 35(10):1273-1290.

[13] **Petráš I**. (2011). *Fractional-order nonlinear systems*: Modeling, analysis and simulation, Springer.

[14] **Petráš, I., Bednárová, D.** (2009). "*Fractional - order chaotic systems*", Emerging Technologies & Factory Automation 2009. ETFA 2009. *IEEE Conference on*, pp. 1-8.

[15] **Nishimoto, K.** (1984). *Fractional Calculus. Decartess Press, Koriama*.

[16] **Oldham, K.B., Spanier, J**. (1974). *The Fractional Calculus. Academmic Press*, New York.

[17] **Oustaloup, A., Levron, F., Mathieu, B. and Nanot, F.M**., (2000). Frequency-Band Complex Noninteger Differentiator: Characterization and Synthesis, *IEEE Trans CAS-I*, 47,25-39.

[18] **Udita, N. K.** (2014). A new approach to generalized fractional derivatives. *Bulletin of Mathematical Analysis and Applications*, 6(4), 1-15.

[19] **Herzallah, M. A**. (2014). *Notes on some fractional calculus operators and their properties*. J. Fract. Calc. Appl, 5(19), 1-10.

[20] **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.

[21] **Ma, S., Zheng, J., & Li, Y**. (2014). Chaos control and synchronization of a new fractional order chaotic system. *Journal of Informatıon &Computatıonal Scıence*, 11(10), 3469-3479.

[22] **Podlubny, I.** (1999). *Fractional differential equations*. Mathematics in science and engineering, 198, 41-119.

[23] **Pecora L. M., Carroll T. L**. (1990). Synchronization in Chaotic Systems. *Physical Review Letters*, 64(8):821.

[24] **Gürses, S., Akkaş, N., Platin, B. E.** (2006). Ters Dönmüş Bir Sarkacın Doğrusal Olmayan Konum Denetiminden En Büyük Lyapunov Üstelinin Poincare Kesitinden Elde Edilmesi. *Journal of the Istanbul Kültür University Science and Engineering*, 4(4).

[25] **Özer, Ş., & Zorlu, H**. (2012). Doğrusal Olmayan Par Sistemler Kullanılarak Kaotik Zaman Serisi Kestirimi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 27(2).

[26] **Koyuncu, İ.** (2014). Kriptolojik Uygulamalar İçin FPGA Tabanlı Yeni Kaotik Osilatörlerin ve Gerçek Rasgele Sayı Üreteçlerinin Tasarımı ve Gerçeklenmesi. *Sakarya Üniversitesi*, Doktora Tezi, Sakarya, 145p.

[27] **Wang Q., Yu S., Li C., Lü J., Fang X., Guyeux C.**, *et al.* (2016). Theoretical design and FPGA-based implementation of higher-dimensional digital chaotic systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 63(3):401-412.

[28] **Azzaz M. S., Tanougast C., Sadoudi S., Fellah R., Dandache A.** (2013). A new auto-switched chaotic system and its FPGA implementation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18(7):1792-1804.

[29] **Altun K., Günay E**. (2016). Implementation CNN Based Chaos Generator Using Field Programmable Gate Array, *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium'16,* Malatya, IEEE.

[30] **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.,* vol. 11, no. 4, p. 1288.

[31] **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).

[32] **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.

[33] **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.

[34] **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.

[35] **Moreno, D. G., Del Barrio, A. A., Botella, G., & Hasler, J.** (2021). A cluster of FPAAs to recognize images using neural networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(11), 3391-3395.

[36] **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.

[37] **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.

[38] **Altun, K.** (2021). FPAA implementations of fractional-order chaotic systems. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 30(15), 2150271.

[39] **Koziol, S.** (2020). Multi-Objective Path Planning for Autonomous Robots Using Reconfigurable Analog VLSI. *IEEE Access*, 8, 80134-80147.

[40] **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.

[41] **Baccigalupi, A., & Liccardo, A.** (2007). Field programmable analog arrays for conditioning ultrasonic sensors. *IEEE Sensors Journal*, 7(8), 1176-1182.

[42] **Katugampola, U. N.** (2014). *Bull. Math. Anal. Appl*. 6, 1.

[43] **Herzallah, M. A.** (2014). *J. Fract. Calc. Appl*. 5, 1.

[44] **Shaojuan Ma, Jie Zheng and Yuqin Li**, *J. Inf. Comput. Sci*. 11(10), 3469.

[45] **Podlubny, I.** (1998). *Fractional Differential Equations*: An Introduction to Fractional Derivatives, *Fractional Differential Equations*, toMethods of Their Solution and Some of Their Applications, vol. 198. Elsevier, Amsterdam.

[46] **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 Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap*. 66(4), 1484–1495.

[47] **Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J.** (2006). *Theory and applications of fractional differential equations*. Netherlands: Elsevier.

[48] **Miller K.S., Ross B.** (1993). *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations*. USA: John Wiley & Sons.

[49] **Caponetto, R., Dongola, G., Maione, G., Pisano, A.** (2014). Integrated technology fractional order proportional-integralderivative design. *J. Vib. Control* 20(7), 1066–1075.

[50] **Hartley, T.T., Lorenzo, C.F.** (2002). Dynamics and control of initialized fractional-order systems. *Nonlinear Dyn*. 29(1–4), 201–233.

[51] **Nishimoto, K.** (1984) *Fractional Calculus. Decartess Press, Koriama*.

[52] **Charef, A., Sun, H. H., Tsao, Y. Y. and Onaral, B.** (1992). Fractal System as Represented by Singularity Function, *IEEE Trans. Automatic Control*, 37(9), 1465-1470.

[53] **Loverro, A.** (2004). “Fractional calculus: history, definitions and applications for the engineer,” *Rapport technique, Univeristy of Notre Dame: Department of Aerospace and Mechanical Engineering*, pp. 1–28.

[54] **Rössler, O. E.** (1976). An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 57(5):397-398.

[55] **Chua, L. & Yang, L.** (1988). Cellular neural networks: Theory, *IEEE Trans. Circuits Syst*., 35, 732–745.

[56] **Chua L. O., Yang L.** (1988). Cellular neural networks: Applications. *IEEE Transactions on circuits and systems*, 35(10):1273-1290.

[57] **Chua L. O., Roska T.** (1993). The CNN paradigm**.** *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 40(3):147-156.

[58] **Riaz A., Ali M.** (2008). Chaotic Communications, their applications and advantages over traditional methods of communication. *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, CNSDSP, 6th International Symposium on, IEEE*, 21-24.

[59] **Baranovski, A. L., Schwarz, W., Mogel, A.** (1999). Statistical analysis and design of chaotic switched dynamical systems. *In Circuits and Systems, 1999. ISCAS'99. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on IEEE*, pp. 467-470.

[60] **Rulkov, N. F., Tsimring, L. S.** (1999). Synchronization methods for communication with chaos over band-limited channels. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 27(6), 555-567.

[61] **Vaidyanathan S., Pakiriswamy S.** (2015). A 3-D Novel Conservative Chaotic System and its Generalized Projective Synchronization via Adaptive Control. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 8(2).

[62] **Vaidyanathan S., Volos C.** (2015). Analysis and adaptive control of a novel 3-D conservative no-equilibrium chaotic system. *Archives of Control Sciences*, 25(3):333-353.

[63] **Chen M., Han Z. (**2003). Controlling and synchronizing chaotic Genesio system via nonlinear feedback control. *Chaos, Solitons & Fractals*, 17(4):709-716.

[64] **Bowong S., Kakmeni F. M., Fotsin H.** (2006). A new adaptive observer-based synchronization scheme for private communication. *Physics Letters A*, 355(3):193-201.

[65] **Bhalekar S., Daftardar-Gejji V.** (2010). Synchronization of different fractional order chaotic systems using active control. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(11):3536-3546.

[66] **Fujisaka, H., Yamada, T.** (1983). Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems. *Progress of theoretical physics*, 69(1), 32-47.

[67] **Afraimovich, V. S., Verichev, N. N., Rabinovich, M. I.** (1986). Stochastic synchronization of oscillation in dissipative systems. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 29**(**9), 795-803.

[68] **Pecora L. M., Carroll T. L.** (1990). Synchronization in Chaotic Systems. *Physical Review Letters*, 64(8):821.

[69] **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.

[70] **Linsay, P. S.** (1981). Period doubling and chaotic behavior in a driven anharmonic oscillator. *Physical Review Letters*, 47(19), 1349.

[71] **Stavroulakis P.** (2005). *Chaos applications in telecommunications*. CRC press.

[72] **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.

[73] **Serin T.** (2003). Kaotik Yapılarda Lyapunov Üstellerinin Tahmini. *Gazi Üniversitesi*, Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, 117.

[74] **Yardım, F. E., Afacan, E.** (2010). Lorenz-Tabanlı Diferansiyel Kaos Kaydırmalı Anahtarlama (DCSK) Modeli Kullanılarak Kaotik Bir Haberleşme Sisteminin Simülasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(1),101-110.

[75] **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.

[76] **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.

[77] **Sprott J. C.** (1994). Some simple chaotic flows. *Physical review E*, 50(2):R647.

[78] **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