

ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİR SEYRÜSEFER SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Yetkin ERSOY

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA  
2006

Her hakkı saklıdır

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BİR SEYRÜSEFER SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Yetkin ERSOY

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd Doç Dr. Murat EFE

Bu tezde, seyrüsefer kavramı, seyrüsefer sistemleri, seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesi ve bu bütünleştirmede kullanılan kestiriciler ve bunlara ait parametre seçimleri incelenmiştir. Seyrüsefer sistemleri için birleştirilmiş sistem ve adaptif yaklaşımlar olarak iki yeni yöntem önerilmiş ve bu yöntemlerin performansları araştırma bulguları ile ortaya konmuştur. Ayrıca bu yöntemlerin farklı seyrüsefer sistemleri için verdiği performanslar araştırma bulguları ile incelenmiş ve tartışılmıştır.

Seyrüsefer sistemlerinin farklı niteliklerdeki ölçüm birimlerine göre seyrüsefer yetenekleri, hazırlanan test senaryoları ile Monte Carlo benzetimleri yapılarak ortaya konmuştur. Yapılan çalışmalarda önerilen birleştirilmiş sistemin pozisyon ve hız kestirimlerinde diğer yöntemlere oranla daha iyi sonuç verdiği, düşük ve orta kalitede ölçüm birimi için açı kestirimlerinde adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi, yüksek kalitede ölçüm birimi için ise Kalman filtresinin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

**2006, 84 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Seyrüsefer, Ataletsel Seyrüsefer Sistemi, Küresel Konumlandırma Sistemi, Kalman Filtresi, Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi

## ABSTRACT

Master thesis

### SIMULATION AND MODELING OF A NAVIGATION SYSTEM

Yetkin ERSOY

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat EFE

In this study, the concept of navigation, navigation systems, integration of navigation systems and estimators that are employed to integrate navigation systems along with the selection of parameters related to these estimators have been investigated. Two novel methods, namely fused system and adaptive approach, have been suggested for navigation system parameter estimation and performances of these approaches have been demonstrated through simulation. Moreover, performances of these methods for different navigation systems have also been investigated and discussed.

Capabilities of navigation systems with respect to different measurement units have been shown through Monte Carlo simulation on prepared test scenarios. It has been observed that for low, average and high quality measurement units, the newly proposed fused system produces better position and velocity estimations. On the other hand, the modified wave estimator outperforms other methods in terms of angle estimation for low and average quality measurements units. As for angle estimation for high quality measurement units, simulation results have revealed that the Kalman filter's performance is better than other testes schemes.

**2006, 84 pages**

**Key Words:** Navigation, Inertial Navigation System, Global Positioning System, Kalman Filter, Modified Wave Estimator.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek akademik ortamda olduğu kadar beşeri ilişkilerde de engin fikirleriyle yetişme ve gelişmeme katkıda bulunan danışman hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Murat EFE 'ye, çalışmalarım süresince birçok fedakarlıklar göstererek beni destekleyen babam Raif ERSOY'a ve annem Emine ERSOY'a, tez çalışmasının hazırlanmasında ve kontrol edilmesinde yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Gökhan SOYSAL ve Nuray YİĞİT'e en derin duygularla teşekkür ederim.

Yetkin Ersoy

Ankara, Őubat 2006

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Temel Kavramlar.....	2
1.2 Tezin Kapsamı.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 Ataletsel Seyrüsefer Sistemlerine Giriş.....	4
2.1.1 Koordinat çerçeveleri.....	5
2.1.2 Tavr ( Attitude ) parametre tanımları.....	6
2.1.3 Ataletsel seyrüsefer sürekli-zaman eşitlikleri.....	7
2.1.4 Ataletsel ölçüm birimi ( Inertial Measurement Unit – IMU ).....	9
2.2 Küresel Konumlandırma Sistemi'ne Giriş.....	11
2.2.1 GPS verisinin elde edilmesi.....	13
2.2.2 Alıcıdaki saatin modellenmesi.....	14
2.2.3 Dinamik model.....	15
2.2.4 Lineer ölçüm modeli.....	16
2.3 Ataletsel Seyrüsefer ve Küresel Konumlandırma Sistemlerinin Bütünleştirilmesi.....	17
2.3.1 Tamamlayıcı filtreleme ile entegrasyon.....	18
2.3.2 Merkezlenmiş kestirim kaynaştırma ile bütünleşme.....	19
2.3.3 Dağıtılmış kestirim kaynaştırma ile entegrasyon.....	20
2.4 Kalman Filtresi.....	20
2.5 Geliştirilmiş Dalga Kestirimi ( Modified Wave Estimation ).....	23
2.6 Birleştirilmiş Sistem.....	32
2.7 Adaptif Yaklaşımlar.....	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1 Ataletsel Seyrüsefer ve Küresel Konumlandırma Sistemleri Entegrasyon Algoritması.....	38
3.1.1 Kalman filtresi İle ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri entegrasyonu.....	38
3.1.2 Geliştirilmiş dalga kestiricisi ile ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri entegrasyonu.....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	43
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	79
5.1 Kestirim Performansları.....	79
5.2 İşlem Yüğü.....	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	84

## SİMGELER DİZİNİ

- ( $\times \bullet$ ) skew simetrik matris operatörü
- $v$  Dünyaya göre platformun hızı ( E Koordinat Çerçevesi'nde  $R$  vektörünün zamana göre türevi )
- $\rho_{ZN}$   $\omega_{EN}^N$ 'nin düşey elemanı (  $\rho_{ZN}$ 'nin seçimi, N Koordinat Çerçevesi'nin kullanımına bağlıdır )
- $\delta$  her N zaman aralığında görünen birim dürtü fonksiyonları (impulse) içerir. Yoğunlukları, dalga tanımının bilinmeyen katsayıları ile aynıdır.
- $\sigma$  jiroskop sürüklenme hızını gösteren biçim filtresi parametreleri [ $m/s^2$  ve  $s^{-1}$ ]
- $\beta$  jiroskop sürüklenme hızını gösteren biçim filtresi parametreleri [ $m/s^2$  ve  $s^{-1}$ ]
- $\phi_N$  tavır hatası [rad]
- $\delta\omega_N$  jiroskop sürüklenme hızı [rad/s]
- $a_{SF}$  Özgül kuvvet ivmelenmesi ( dönmeyen ataletsel uzaya göre, yerçekimsel olmayan ve ivmeölçerler tarafından ölçülen ivmelenme olarak tanımlanır )
- $B_E$  ivmeölçer eğilimi [ $m/s^2$ ]
- $e$  zayıf gözlenebilir durumların vektörü ( $k \times 1$ )
- $F_c$  Eğrilik Matrisi ( $3 \times 3$ ).  $F_c$  matrisi, pozisyonun bir fonksiyonudur (  $f(C_N^E, h)$  ).  $F_c$  matrisinin, (3,i) ve (i,3)'cü elemanları sifıra eşittir. Kalan elemanları köşegene (diagonala) göre simetriktir. Küresel dünya modeli için, köşegen dışında kalan elemanlar sıfır, köşegen üzerindeki elemanlar ise ataletsel seyrüsefer sistemi ile dünyanın merkezi arasındaki mesafenin tersidir.
- $F$  kuvvetli gözlenebilir durumların durum dönüşüm matrisi ( $n \times n$ )
- $F$  durum dönüşüm matrisi
- $G$  zayıf gözlenebilir durumların, kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisini belirten etki
- $h$  Dünyaya göre yükseklik ( Dünyanın referans geoit yüzeyindeki teğetsel düzleme dik olan ataletsel seyrüsefer sistemi ve dünya yüzeyi arasındaki hattın uzunluğu olarak tanımlanır )
- $H$  gözlem (ölçüm) matrisi
- $g$  Yerçekimsel kütle çekimi ivmelenmesi ya da yerçekimi (  $R$  'nin fonksiyonudur )

$L$	zayıf gözlenebilir durumların durum dönüşüm matrisi ( $k \times k$ )'dir.
$\delta P_E$	X-eksenindeki pozisyon hatası [m]
$R$	Dünyanın merkezi ile ataletsel seyrüsefer sistemi arasındaki pozisyon vektörü
$S_{p1}$	ivmeölçer eğilimi için giriş gürültüsünün tayf yoğunluğu [ $m^2/s^5$ ]
$S_{p2}$	jiroskop sürüklenme hızı için giriş gürültüsünün tayf yoğunluğu [ $m^2/s^3$ ]
$T_1$	ivmeölçer Markov süreci için zaman sabiti [s]
$T_2$	jiroskop Markov süreci için zaman sabiti [s]
$\Delta T$	örnekleme aralığı [s]
$u_{ZN}$	Yersel ( geodetic ) düşeyde yukarı yönde birim vektör ( N Koordinat Çerçevesi'nin Z eksenini )
$w_1, w_2$	Beyaz gürültü
$w$	bilinen R kovaryanslı, sıfır ortalamalı, beyaz normal dağılımlı ölçüm gürültüsü matrisi ( $n \times k$ )
$X$	toplam durum vektörü
$X$	kuvvetli gözlenebilir durumların vektörü ( $n \times 1$ )
$X^0$	kuvvetli gözlenebilir durumların kendilerine etkisi ( $n \times 1$ )
$X^1$	zayıf gözlenebilir durumların, kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisi ( $n \times 1$ )
$\delta V_E$	X-eksenindeki hız hatası [m/s]
$Z$	ölçüm vektörü

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Küresel konumlandırma sistemi uydularının dünya çevresindeki konumu ....	12
Şekil 2.2 INS/GPS entegrasyonunda ileri-besleme yaklaşımı .....	18
Şekil 2.3 INS/GPS entegrasyonunda geri-besleme .....	19
Şekil 2.4 INS/GPS entegrasyonunda sıkı bağlı yaklaşım .....	19
Şekil 2.5 INS/GPS entegrasyonunda gevşek bağlı yaklaşım .....	20
Şekil 2.6 Kalman Filtresi blok şeması .....	23
Şekil 2.7 Geleneksel Kalman'da giriş bozulmaları .....	25
Şekil 2.8 Geliştirilmiş dalga kestiricisinde giriş bozulmaları .....	25
Şekil 2.9 Geliştirilmiş dalga kestiricisi .....	29
Şekil 2.10 Gerçek zamanlı geliştirilmiş dalga kestiricisi .....	30
Şekil 2.11 Geliştirilmiş dalga kestiricisi algoritması .....	31
Şekil 2.12 Geliştirilmiş dalga kestiricisi tur zamanı bloğu algoritması .....	32
Şekil 2.13 Adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi algoritması .....	37
Şekil 4.1 Düşük kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS pozisyon hataları .....	45
Şekil 4.2 Düşük kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS hız hataları .....	46
Şekil 4.3 Düşük kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS açı hataları .....	47
Şekil 4.4 Orta kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS pozisyon hataları .....	52
Şekil 4.5 Orta kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS hız hataları .....	53
Şekil 4.6 Orta kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS açı hataları .....	54
Şekil 4.7 Yüksek kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS pozisyon hataları .....	58
Şekil 4.8 Yüksek kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS hız hataları .....	59
Şekil 4.9 Yüksek kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS açı hataları .....	60
Şekil 4.10 Düşük kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için pozisyon kestirim hataları .....	65
Şekil 4.11 Düşük kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için hız kestirim hataları .....	66
Şekil 4.12 Düşük kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için açı kestirim hataları .....	67
Şekil 4.13 Orta kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için pozisyon kestirim hataları .....	68
Şekil 4.14 Orta kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için hız kestirim hataları .....	69
Şekil 4.15 Orta kalitede ölçüm birimi için kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için açı kestirim hataları .....	70

Şekil 4.16 Yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için pozisyon kestirim hataları .....	71
Şekil 4.17 Yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için hız kestirim hataları.....	72
Şekil 4.18 Yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman kiltresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için açı kestirim hataları .....	73

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2 1 Küresel konumlandırma saat parametreleri .....	15
Çizelge 4.1 Düşük kalitede ölçüm birimi için geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri.....	48
Çizelge 4.2 Düşük kalitede ölçüm birimi için birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri.....	49
Çizelge 4.3 Düşük kalitede ölçüm birimi için RMS pozisyon hatası (m).....	50
Çizelge 4.4 Düşük kalitede ölçüm birimi için RMS hız hatası (m/sn) .....	50
Çizelge 4.5 Düşük kalitede ölçüm birimi için RMS açı hatası (derece).....	50
Çizelge 4.6 Orta kalitede ölçüm birimi için geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri.....	55
Çizelge 4.7 Orta kalitede ölçüm birimi için birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri.....	55
Çizelge 4.8 Orta kalitede ölçüm birimi için RMS pozisyon hatası (m).....	56
Çizelge 4.9 Orta kalitede ölçüm birimi için RMS hız hatası (m/s) .....	56
Çizelge 4.10 Orta kalitede ölçüm birimi için RMS açı hatası (derece) .....	57
Çizelge 4.11 Yüksek kalitede ölçüm birimi için geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri .....	60
Çizelge 4.12 Yüksek kalitede ölçüm birimi için birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri.....	61
Çizelge 4.13 Yüksek kalitede ölçüm birimi için RMS pozisyon hatası (m) .....	62
Çizelge 4.14 Yüksek kalitede ölçüm birimi için RMS hız hatası (m/s).....	62
Çizelge 4.15 Yüksek kalitede ölçüm birimi için RMS açı hatası (derece) .....	62
Çizelge 4.16 Tur zamanlarına göre Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin kayan nokta işlem sayıları (Floating-Point Operations - Flops) .....	63
Çizelge 4.17 Tur zamanlarına göre Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin çalışma süreleri.....	63
Çizelge 4.18 Düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimi ihtiva eden seyrüsefer sistemleri için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistemin RMS pozisyon, hız ve açı kestirimi hataları .....	74
Çizelge 4.19 Düşük kalitede ölçüm birimi için tüm yöntemlerin karşılaştırılması .....	75
Çizelge 4.20 Orta kalitede ölçüm birimi için tüm yöntemlerin karşılaştırılması .....	75
Çizelge 4.21 Yüksek kalitede ölçüm birimi için tüm yöntemlerin karşılaştırılması .....	76
Çizelge 4.22 Geliştirilmiş dalga kestiricisi simülasyon zamanları.....	76
Çizelge 4.23 Kalman filtresi simülasyon zamanları .....	76
Çizelge 4.24 Adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi için pozisyon, hız ve açı hataları....	77
Çizelge 4.25 Adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi simülasyon zamanları .....	77

## 1. GİRİŞ

Seyrüsefer, fiziksel bir platformun herhangi bir referans koordinat çerçevesi ya da koordinat ızgarasına görelî yerinin ve hızının hesaplanmasıdır (Britting 1971). Ancak pek çok uygulamada platformun referans eksene görelî açısal hareketinin de hesaplanması gereklidir.

Seyrüsefer sistemleri pek çok askeri ve sivil uygulamada hayati önem taşımaktadır. Günümüzde, askeri ve sivil hava, deniz ve kara taşıtlarında, seyrüsefer sistemleri, araçların koordinasyonun sağlanması, etkinliğin artırılması gibi sayısız amaçla kendilerine yer bulmaktadır.

Ancak bu tip seyrüsefer sistemlerinin ürettiği hatalar sistemlerin etkinliği azaltmaktadır. Bu nedenle bu sistemlerin hatalarının giderilmesi ya da en aza indirilmesi birincil öncelik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun başarılmasında kullanılan yöntemlerden birisi belki de en etkili olanı ve en sık kullanılanı tümleşik özelliklere sahip sistemlerin bütünleştirilmesidir. Böyle bir yöntemle, bütünleşmiş sistemlerin dezavantajları giderilmeye çalışılmaktadır.

Bu uygulamalarda genellikle Kalman filtresi bütünleşmeyi sağlayan birimdir. Ancak son yıllarda yeni yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri de geliştirilmiş dalga kestiricisi ( modified wave estimator )'dır (Salychev *et al.* 1999). Bu yaklaşımda giriş bozulmaları, Kalman filtresinden farklı olarak deterministik kabul edilmektedir.

Bu tezde, seyrüsefer sistemlerine kısa bir giriş yapılmış ve sıklıkla kullanılan seyrüsefer sistemlerinden, ataletsel seyrüsefer sistemi ve küresel konumlandırma sisteminin teorik alt yapısı verilmiştir. Bu sistemlerin bütünleşmesi için önerilen filtreleme yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan filtrelerden Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi anlatılmıştır. Bu noktada bir seyrüsefer sisteminin modeli oluşturulmuştur. Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi kullanılarak tümleşik seyrüsefer sistemlerinin bütünleşmesi başarılmıştır. Bununla birlikte, Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga

kestiricisinin tümleşik özellikleri de göz önünde bulundurularak Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin birlikte kullanılması yeni bir yöntem olarak önerilmiş ve araştırma bulguları ile elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Tüm bunlara ek olarak geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanına bağımlı yapısı ve sistem gereksinimleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiş dalga kestiricisinin adaptif bir yapı ile kurulması yeni bir yöntem olarak önerilmiştir. Bu yöntem, araştırma bulguları kısmında modellenmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Bu tez çalışması ışığında, Kalman filtresinin ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin performansları göz önünde bulundurulduğunda, önerilen birleştirilmiş sistem ve adaptif yaklaşımların, ilerleyen bölümlerde anlatılacak bazı uygulama alanlarında daha iyi oldukları sonucuna varılmıştır.

## 1.1 Temel Kavramlar

Bu bölümde seyrüsefer uygulamalarında sıkça kullanılan temel kavramlar açıklanacaktır.

**Jiroskop ( Gyro ):** Ataletsel ölçüm biriminde bulunan ve ataletsel uzaya göre platformun açısal hızını ölçen aletlerdir. Ataletsel seyrüsefer sistemlerindeki en önemli hata kaynaklarından biridir. Zamana göre açısal hız değerlerinde belirli bir sürüklenme gösterir.

**İvmeölçer ( Accelerometer ):** Ataletsel ölçüm biriminde bulunan ve ataletsel uzaya göre platformun ivmesini ölçen aletlerdir. Ataletsel seyrüsefer sistemlerindeki bir başka önemli hata kaynağıdır. Jiroskoplar gibi zamana göre ivme değerlerinde eğilim gösterir. Bir başka önemli özellikleri ise yerçekimi ivmesini ölçememeleridir.

**Koordinat çerçevesi ( Coordinate Frame ):** Bir koordinat çerçevesi, sağ el kuralına göre, keyfi olarak seçilmiş bir noktadan çıkan, ard arda indekslenmiş, aralarında dik birim vektörler olarak tanımlanır. Yukarıda bahsedilen sağ el kuralı; fizikten iyi bildiğimiz sağ el kuralıdır. Sağ el, başparmak ve diğer dört parmak birbirine dik olarak

açıldıktan sonra; başparmak, diğer dört parmak ve avuç içinden dışarı yöndeki üç ışın, sağ el kuralına göre seçilmiş bir koordinat sistemi oluşturur. Bir koordinat çerçevesi, platformun görelî hareketinin hesaplandığı çerçevedir. Seyrüsefer sistemleri için böyle bir referansın gerekliliği açıktır. Keyfi olarak seçildiği için uygulamaya göre değişebilir. Ancak genellikle dünya eksenli koordinat eksenleri seçilir.

## **1.2 Tezin Kapsamı**

Tez çalışması süresince yapılan araştırmalarda, seyrüsefer sistemleri, bu sistemlerin bütünleştirilmesi, bütünleştirmede kullanılan yöntemler incelendi. Seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde kullanılan filtreler ve bu filtrelerin parametrelerinin belirlenme ölçütleri incelendi. Filtrelerin hangi kıstaslara göre uygulamalarda kullanılacağı araştırma bulguları ile ortaya konuldu. Çalışmalar sırasında, seyrüsefer sistemleri bütünleştirilmesinde kullanılan iki adet yeni yöntem ortaya konuldu.

Yapılan çalışmalar ve araştırma bulguları tez içerisinde aşağıdaki sıra ile verilmektedir.

“Kuramsal Temeller” isimli 2. bölümde, literatür araştırmalarının sonucunda tezde incelenen seyrüsefer sistemleri verilmektedir. Bu bölümde ataletsel seyrüsefer sistemleri, küresel konumlandırma sistemleri, bu sistemlerin bütünleşme yöntemleri, bütünleşmede kullanılan filtre algoritmaları ve tez çalışması sırasında ortaya konulan birleştirilmiş filtre ve adaptif filtre bütünleştirme algoritmaları sunulmaktadır.

3. bölümde, seyrüsefer sistemlerinin modellenmesi ve bütünleştirilmesi ile test senaryolarının oluşturulması anlatılmaktadır.

4. bölümde, seyrüsefer sistemleri bütünleştirilmesi için kullanılan yöntemlerin çeşitli seyrüsefer sistemleri için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

5. bölümde, elde edilen bulgular değerlendirilmektedir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Ataletsel Seyrüsefer Sistemlerine Giriş

Ataletsel seyrüsefer, toplam ivmenin eksenler boyunca integralinin alınması ile hızın hesaplanması, hızın integralinin alınması ile pozisyonun hesaplanması, açısal hızların integralinin alınması ile de platformun tavrının hesaplanması sürecidir (Bar-Shalom *et al.* 2001).

Yukarıdaki tanım göz önünde bulundurulduğunda ataletsel seyrüsefer sistemlerinin bazı ön gereksinimlerinin olduğu açıkça görülmektedir. Kullanılan referans koordinat çerçevesinin tanımı, yerçekimi alanı ve platformun başlangıç anındaki durumu gibi ön bilgiler bulunmadan ataletsel seyrüseferden bahsedilemez. Bununla birlikte sistemin performansı bu bilgilerin doğruluğu ile yakından ilişkilidir.

Ataletsel seyrüsefer sistemi, ilk olarak II. Dünya Savaşı sırasında V-2 füzelerinde kullanılmıştır. Bunun ardından, bu sistemler hareketli platformlar için standart hale gelmiştir. Ataletsel seyrüsefer sistemlerindeki en büyük ilerleme 1950'lerdeki taktik füze programlarında sağlanmıştır (Lin 1991).

Günümüzde Ataletsel seyrüsefer sistemleri oldukça geniş uygulama alanına sahiptir. Bunun temelinde sistemin özellikleri yatmaktadır. Bir ataletsel seyrüsefer sistemi, seyrüsefer için, bağımsız ( self-contained ), karıştırılmayan ve yayın yapmayan yöntemler üretir (Bar-Shalom *et al.* 2001). Özellikle askeri uygulamalarda, bu özelliklerin ne kadar önemli olduğu aşikardır. Ancak zamanla, sınırsız olarak hatanın büyümesi ve hızdaki osilasyon en önemli dezavantajlarıdır. Bu da ataletsel seyrüsefer sistemlerini uzun süreli uygulamalar için verimsiz kılmaktadır. Örneğin uzun menzilli seyir füzelerinde sadece ataletsel seyrüsefer sistemi kullanmak akıllıca olmayacaktır.

Ataletsel seyrüsefer sistemleri yalpa çemberli ya da platform gövdesine sabit (strapdown) olabilir. Yalpa çemberli bir sistem, sensörlerin platformun hareketinden bağımsız olduğu sistemlerdir. Yani sensör sistemi platforma sabit değildir. Böyle bir

sistem, sensör sistemi üzerindeki gereksinimleri büyük ölçüde azaltmasının yanı sıra seyrüsefer hesaplamalarını da basitleştirir. Ancak, platformdan bağımsız olarak hareket edebilecek, referans koordinat çerçevesine sabit kalacak sensör sistemi ihtiyacı, bu tip seyrüsefer sistemlerini, mekanik olarak karmaşık ve maliyetli hale getirmektedir. Platformun gövdesine sabit sensörleri bulunan seyrüsefer sistemleri ( strapdown ) ise platformun, referans alınmış eksen sistemine göre hareketini matematiksel olarak seyrüsefer bilgisayar yardımıyla hesaplar. Yalpa çemberli sistemlere göre doğruluğu az olsa da, ebatlarının küçük olması, maliyetlerinin düşük olması ve basit sistemler olması bu tip sistemleri popüler hale getirmektedir. Bu çalışmada sensörleri platforma sabit bir sistem göz önünde bulundurulacaktır.

Daha önce bahsedildiği gibi, ataletsel seyrüsefer sistemlerinin bir diğer özelliği ivmeölçerlerin yerçekimi ivmesini ölçmemesidir. Bu konuyu açacak olursak, serbest düşme yapan bir platform üzerindeki ivmeölçerler, sıfır ivme gösterir. Yine daha önce bahsedilen, yerçekimi alanı ön bilgisi gereksinimi bundan dolayıdır.

### **2.1.1 Koordinat çerçeveleri**

Aşağıda seyrüsefer sistemlerinde sıklıkla kullanılan koordinat çerçeveleri tanımlanmıştır;

1. E Koordinat Çerçevesi, dünya merkezli ve dünya ile birlikte dönen ve pozisyon belirlemede kullanılan bir koordinat çerçevesidir. Bir eksenini dünyanın kuzey kutubundan, diğeri ise ekvatorla başlangıç meridyeninin kesiştiği yerden çıkar. Bu iki eksene dik, üçüncü eksen ise sağ el kuralına göre konumlandırılır. Bu koordinat çerçevesi ECEF ( Earth Centered Earth Fixed ) olarak da adlandırılır.
2. N Koordinat Çerçevesi, bir seyrüsefer koordinat çerçevesidir. Z eksenini dünya yüzeyine dik ve yukarı yöndedir. İvmeden, hızın hesaplanmasında ve yerel düşeyin, E Koordinat Çerçevesi'nde açısız yöneliminin tanımlanmasında kullanılır.

3. L Koordinat Çerçevesi, yerel koordinat çerçevesidir. N Koordinat Çerçevesine paraleldir ancak Z eksenini dünya yüzeyine dik ve aşağı yöndedir. X ve Y eksenleri ise, sırasıyla N Koordinat Çerçevesinin Y ve X eksenlerine karşılık gelir. Platforma sabit sensörlerin koordinat çerçevesi yöneliminin tanımlanmasında referans olarak kullanılır ( Local Coordinate Frame ).
4. B Koordinat Çerçevesi, platforma sabitlenmiş sensör sisteminin oluşturduğu koordinat çerçevesidir. Bu koordinat çerçevesi Gövde Koordinat Çerçevesi (Body Coordinate Frame) olarak da adlandırılır.
5. I Koordinat Çerçevesi, dünya merkezli ancak dünya ile dönmeyen, ataletsel koordinat çerçevesidir. Ataletsel ölçümlerin elde edilmesinde referans olarak kullanılır. Bu koordinat çerçevesi Ataletsel Koordinat Çerçevesi (Inertial Coordinate Frame) olarak da adlandırılır.

### 2.1.2 Tavır ( Attitude ) parametre tanımları

Bir Dönüşüm Matrisi ( Direction Cosine Matrix ); sütunları, herhangi bir  $A_1$  koordinat çerçevesinin eksenleri üzerine iz düşümü alınmış herhangi bir  $A_2$  koordinat çerçevesinin eksenleri boyunca uzanan birim vektörlere eşit, birim vektörlerin dik seti olan kare matris olarak tanımlanabilir.

$$C_{A_2}^{A_1} = \begin{bmatrix} u_{1A_2}^{A_1} & u_{2A_2}^{A_1} & u_{3A_2}^{A_1} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada  $u_{iA_2}^{A_1}$ ,  $A_1$  koordinat çerçevesinin eksenleri üzerine iz düşümü alınmış  $A_2$  koordinat çerçevesinin i.ekseni boyunca uzanan birim vektördür. Bu temel tanımlamaya göre,  $C_{A_2}^{A_1}$ 'in i.satırı ve j.sütunundaki eleman,  $A_1$  koordinat çerçevesinin i.ekseni ile  $A_2$  koordinat çerçevesinin j.ekseni arasındaki açının kosinüsüne eşittir.  $C_{A_2}^{A_1}$ 'in devriği (transpoz) ise bunun tersidir. Buradan,  $V^{A_1} = C_{A_2}^{A_1} V^{A_2}$  ise,  $V^{A_2} = (C_{A_2}^{A_1})^T V^{A_1} = C_{A_1}^{A_2} V^{A_1}$  olarak gösterilebilir. Dönüşüm matrisi zincir kuralı ise aşağıdaki gibi gösterilebilir,

$$C_{A_1}^{A_3} = C_{A_2}^{A_3} C_{A_1}^{A_2} \quad (2.2)$$

Bir dönüş vektörü, bir dönüş eksenini ve eksenindeki dönüşün genliğini tanımlar. Buna göre dönüş vektörü ile dönüşüm matrisi arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilebilir.

$$C_{A_2}^{A_1} = \left[ I + \frac{\sin \phi}{\phi} (\vec{\phi} \times) \sin \phi + \frac{(1 - \cos \phi)}{\phi^2} (\vec{\phi} \times)^2 \right] \quad (2.3)$$

Burada  $\vec{\phi}$  ve  $\phi$  sırasıyla, dönüş vektörü ve bu vektörün genliğidir. Dönüşüm matrisi ve dönüş vektörünün türevleri ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\dot{C}_{A_2}^{A_1} = C_{A_2}^{A_1} (\omega_{IA_2}^{A_2} \times) - (\omega_{IA_1}^{A_1} \times) C_{A_2}^{A_1} \quad (2.4)$$

$$\vec{\phi} = \omega_{A_1 A_2}^{A_1} + \frac{1}{2} \vec{\phi} \times \omega_{A_1 A_2}^{A_1} + \frac{1}{\phi^2} \left[ 1 - \frac{\phi \sin \phi}{2(1 - \cos \phi)} \right] \vec{\phi} \times (\vec{\phi} \times \omega_{A_1 A_2}^{A_1}) \quad (2.5)$$

### 2.1.3 Ataletsel seyrişer sürekli-zaman eşitlikleri

İndekslerdeki harfler, koordinat çerçevelerini göstermek üzere tavır ( Attitude ) hız değişimi,

$$\dot{C}_B^L = C_B^L (\omega_{IB}^L \times) - (\omega_{IL}^L \times) C_B^L \quad (2.6)$$

Burada,

$$\omega_{IL}^L = C_N^L (\omega_{IE}^N + \omega_{EN}^N)$$

$$\omega_{IE}^N = (C_N^E)^T \omega_{IE}^E$$

$$\omega_{EN}^N = F_c (u_{ZN}^N \times v^N) + \rho_{ZN} u_{ZN}^N$$

İvme dönüşüm eşitliği aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$a_{SF}^L = C_B^L a_{SF}^B$$

Hız değişim eşitlikleri,

$$g_P^N = g^N - (\omega_{IE}^N \times (\omega_{IE}^N \times R^N))$$

$$\dot{v}^N = a_{SF}^N + g_P^N - (\omega_{EN}^N + 2\omega_{IE}^N) \times v^N$$

ve pozisyon değişim eşitlikleri,

$$\dot{C}_N^E = C_N^E (\omega_{EN}^N \times)$$

$$\dot{h} = u_{ZN}^N \cdot v^N \text{ 'dir.}$$

Burada,

$R$  : Dünyanın merkezi ile ataletsel seyrüsefer sistemi arasındaki pozisyon vektörü

$v$  : Dünyaya göre platformun hızı ( E Koordinat Çerçevesi'nde  $R$  vektörünün zamana göre türevi )

$h$  : Dünyaya göre yükseklik ( Dünyanın referans geoit yüzeyindeki teğetsel düzleme dik olan ataletsel seyrüsefer sistemi ve dünya yüzeyi arasındaki hattın uzunluğu olarak tanımlanır )

$F_c$ : Eğrilik Matrisi (3x3).  $F_c$  matrisi, pozisyonun bir fonksiyonudur (  $f(C_N^E, h)$  ).  $F_c$  matrisinin, (3,i) ve (i,3)'cü elemanları sıfıra eşittir. Kalan elemanları köşegene (diagonala) göre simetriktir. Küresel dünya modeli için, köşegen dışında kalan elemanlar sıfır, köşegen üzerindeki elemanlar ise ataletsel seyrüsefer sistemi ile dünyanın merkezi arasındaki mesafenin tersidir.

$u_{ZN}$ : Yersel ( geodetic ) düşeyde yukarı yönde birim vektör ( N Koordinat Çerçevesi'nin Z eksenini )

$\rho_{ZN}$ :  $\omega_{EN}^N$ 'nin düşey elemanı (  $\rho_{ZN}$ 'nin seçimi, N Koordinat Çerçevesi'nin kullanımına bağlıdır )

$a_{SF}$ : Özgül kuvvet ivmelenmesi ( dönmeyen ataletsel uzaya göre, yerçekimsel olmayan ve ivmeölçerler tarafından ölçülen ivmelenme olarak tanımlanır )

$g$ : Yerçekimsel kütle çekimi ivmelenmesi ya da yerçekimi (  $R$ 'nin fonksiyonudur )

$g_p$ : Yer düzlemine dik yerçekimi ya da sadece yerçekimi ( durağan bir ataletsel seyrüsefer sistemi için yer düzlemine dik hat üzerindedir )

Ataletsel seyrüsefer bilgisayarı, yukarıda verilen tavır hız değişimi, hız değişimi ve pozisyon hız değişimi denklemlerinin, uygun integral algoritmalarını kullanarak integralini alır ve seyrüsefer verisini elde eder (Salvage 1998).

#### **2.1.4 Ataletsel ölçüm birimi ( Inertial Measurement Unit – IMU )**

Ataletsel ölçüm birimi, dik aksellere yerleştirilmiş, üç adet ivmeölçer ve üç adet jiroskop içeren ve seyrüsefer sistemine ölçümler üreten bir birimdir. Ataletsel ölçüm birimi için baskın hata kaynakları genellikle meyiller ( ivmeölçer meyili ve jiroskop sürüklenmesi ), skala faktörü ve yerleştirme hatalarıdır. Meyiller ve skala faktörü,

kalibrasyon ve termometre geri beslemesi ile dengelenir. Yerleştirme hatası ise ataletsel ölçüm biriminin yerleştirilmesi sırasında minimize edilmeye çalışılır. Bir ataletsel ölçüm biriminin çıkışı aşağıdaki gibi modellenenir.

$$\omega_{IMU} = [I - \Delta(\kappa, \alpha)]\omega_{IB}^B - b_1 - w_1 \quad (2.7)$$

$$f_{IMU} = [I - \Delta(\varepsilon, \beta)]f_B - b_2 - w_5 \quad (2.8)$$

Burada,

$$\Delta = \Delta(S, \phi) = \begin{bmatrix} S_x & \phi_{xy} & \phi_{xz} \\ \phi_{yx} & S_y & \phi_{yz} \\ \phi_{zx} & \phi_{zy} & S_z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

ve  $S = [S_x \ S_y \ S_z]^T$  üç skala faktörü hatası ile  $\phi = [\phi_{xy} \ \phi_{xz} \ \phi_{yx} \ \phi_{yz} \ \phi_{zx} \ \phi_{zy}]^T$  altı küçük yerleştirme hatası açısıdır.  $b_1 \in \mathfrak{R}^3$  ve  $b_2 \in \mathfrak{R}^3$  sırasıyla jiroskop ve ivmeölçer meyilleridir.  $w_1 \in \mathfrak{R}^3$  ve  $w_5 \in \mathfrak{R}^3$ , sırasıyla modellenmemiş hatalar ve ölçüm gürültüleridir.  $w_1$  ve  $w_5$  ise normal dağılımlı beyaz gürültü olarak tanımlanabilir.

Bütün hata sinyalleri, B Koordinat Çerçevesinde bileşenlerine ayrılır. Hataların büyüklüğü, ataletsel ölçüm biriminin fiyatı ile doğrudan orantılıdır.

Bir sistemin  $t+1$  anında, belirli bir  $\sigma$  durumunda olma ihtimali, sadece sistemin bir önceki  $t$  anındaki  $\sigma$  durumuna bağlıysa ( sistemin diğer hiçbir eski özelliğine bağlı değilse ) bu süreç, Markov Süreci olarak tanımlanır. Sensör meyilleri, skala faktörü hataları ve yerleştirme açıları hataları 1.dereceden Markov süreci olarak tanımlanabilir.

Bu durum da,

$$\dot{b}_1 = -T_1^{-1}b_1 + w_2$$

$$\dot{\kappa} = -T_2^{-1}\kappa + w_3$$

$$\begin{aligned}
\dot{\alpha} &= -T_3^{-1}\alpha + w_4 \\
\dot{b}_2 &= -T_4^{-1}b_2 + w_6 \\
\dot{\varepsilon} &= -T_5^{-1}\varepsilon + w_7 \\
\dot{\beta} &= -T_6^{-1}\beta + w_8
\end{aligned} \tag{2.10}$$

burada,  $w_2, w_3, w_6, w_7 \in \mathfrak{R}^3$  ve  $w_4, w_8 \in \mathfrak{R}^6$  normal dağılımlı beyaz gürültülerdir.  $T_1, T_2, T_4, T_5 \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$  ve  $T_3, T_6 \in \mathfrak{R}^{6 \times 6}$  diagonal zaman sabiti matrisleridir.  $\kappa = [\kappa_x \ \kappa_y \ \kappa_z]^T$  ve  $\varepsilon = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$ , sırasıyla üçer adet jiroskop ve ivmeölçer skala faktörü hatalarıdır.  $\alpha = [\alpha_{xy} \ \alpha_{xz} \ \alpha_{yx} \ \alpha_{yz} \ \alpha_{zx} \ \alpha_{zy}]^T$  ve  $\beta = [\beta_{xy} \ \beta_{xz} \ \beta_{yx} \ \beta_{yz} \ \beta_{zx} \ \beta_{zy}]^T$ , sırasıyla altışar adet küçük jiroskop ve ivmeölçer yerleştirilme açısı hatasıdır (Fossen 2001).

## 2.2 Küresel Konumlandırma Sistemi'ne Giriş

Küresel Konumlandırma Sistemi, uydu tabanlı, dünya genelinde erişilebilirliği bulunan, kullanıcılara doğru pozisyon ve zaman bilgisi sunan bir seyrüsefer sistemidir.

Küresel konumlandırma sistemi, 50 yıl evvel radyo seyrüseferinin kullanılmasından bu yana, hava ve uzay araçlarının seyrüseferi ve gözetiminde güvenlik ve etkinlik için en önemli gelişme olarak tanımlanabilir. Sistemin yüksek doğruluğu, her yerden erişilebilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle halen devam eden geniş bir etki yaratmıştır. Küresel konumlandırma programı 1973 yılında başlatılmış ve 1995 yılında, sistem işlevsel olarak ilan edilmiştir.

Küresel konumlandırma sistemi üç adet alt sistemden oluşur. Bunlar, yer ve zaman sinyali yayınlayan uydu sistemi, yayınlanan sinyali pozisyon ve zaman hesaplamasında kullanan kullanıcılar ve yer kontrol sistemidir. Yer kontrol sistemi, uydulardan yayınlanan sinyali günceller ve uyduları kontrol eder. Yer kontrol sisteminin ana istasyonu Colorado Springs'de yer alır.

Sistem, dünya çevresindeki 24 uydudan oluşur. Bu uydular, altı tane 12-saat yörüngesi ( her birinde dört uydu ) içinde, her bir uydu ekvatorial düzlem ile  $55^\circ$  lik açı yapacak şekilde ve anma olarak ( nominal ) 20.200km yükseklikte yerleştirilmiştir. Bu yapı ile bir kullanıcı, günün herhangi bir saatinde, dünya üzerinde herhangi bir yerden en az dört, en fazla 11 ve genellikle altı ile sekiz uydudan sinyal alır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Küresel konumlandırma sistemi uydularının dünya çevresindeki konumu

Küresel konumlandırma sistemi, kullanıcı ile her bir görülen uydu arasındaki mesafenin, uydudan gönderilen sinyalin yol alma zamanıyla hesaplanması temel prensibine dayanır. Kullanıcının pozisyonu en az dört mesafe bilgisi, uydudan yayınlanan saat bilgisi ve alıcıdaki saat ile bulunabilir. Her ne kadar, küresel konumlandırma sistemi için dört uydunun görünür olması yeterli olsa da daha fazla uydunun görülen olması hatayı azaltır.

Uyduların yayınladığı sinyaller, uydunun mevcut konumunu, sinyalin gönderildiği zamanı, uydunun güvenilirlik bilgisini içerir. GPS iki servis sağlar. Bunlar, sivil kullanıcılar için Standart Konumlandırma Servisi (Standart Positioning Service - SPS) ve askeri kullanımlar için Kesin Konumlandırma Servisi (Precision Positioning Service – PPS) ‘tir.

Şifresiz P kodu ve sınıflandırılmış W kodu, şifreli Y kodunun üretilmesinde kullanılır. Böylelikle izinsiz sivil kullanım engellenmiş olur. Birkaç yıldır, M kodu gibi yeni askeri kodlarda yayınlanmaktadır.

Her bir uydu, iki taşıyıcıda direkt-dizi dağılım-tayf (direct-sequence spread - specturum) sinyali yayımlar. 1575.42 MHz frekansındaki ana taşıyıcıdaki sinyal:

$$s_1(t) = A_x D(t) X(t) \sin(2\pi f_1 t + \theta_1) + A_p D(t) P(t) \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) \quad (2.11)$$

burada  $X(t) = \pm 1$  (1.023 MHz frekanslı C/A kodu),  $P(t) = \pm 1$  (10.23 MHz frekanslı P kodu) ve  $D(t)$  ise seyrüsefer verisidir.  $D(t)$ , uyduların yer ve zaman bilgisini içerir. 1227.60 MHz frekansındaki ikinci taşıyıcıdaki sinyal ise,

$$s_2(t) = B D(t) P(t) \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \quad (2.12)$$

P kodu kullanıcılarına, iyonosferik ve troposferik yansımalar, çoklu-yol gibi etkilerden kaynaklanan sinyal gecikmesinin hesaplanabilmesini sağlar.

### 2.2.1 GPS verisinin elde edilmesi

Görülür n adet uydu ile temel küresel konumlandırma eşitliği,

$$\rho_i = r_i + c\Delta t + w_i = \psi_i + w_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

olarak verilebilir. Burada,

$\rho_i$  : i.uydu ve kullanıcı arasındaki yalancı menzil ( pseudorange )

$r_i$  : i.uyduyla platform arasındaki gerçek mesafe (  $\sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}$  )

$\psi_i = r_i + c\Delta t$  : i.uyduyla platform arasındaki gürültüsüz yalancı menzil ( pseudorange )

$(X_i, Y_i, Z_i)$  : i.uydunun koordinatları

$(x, y, z)$  : kullanıcı koordinatları

$\Delta t$  : zamanlama hatası

$c$  : ışık hızı ( $3 \times 10^8$  m/s)

$w_i$  : i.uydu için ölçüm hatası

### 2.2.2 Alıcıdaki saatin modellenmesi

Bilinmeyen zaman hatası, iki durum değişkeni ile modellenebilir; faz hatasını gösteren saat eğilimi ( bias )  $b = \Delta t$  ve frekans hatasını gösteren saat sürüklenmesi ( drift )  $d$ . Buna göre,

$$\dot{b}(t) = d(t) + \tilde{v}_b(t) \quad (2.14)$$

$$\dot{d}(t) = \tilde{v}_d(t) \quad (2.15)$$

Burada  $\tilde{v}_b(t)$  ve  $\tilde{v}_d(t)$ , karşılıklı bağımsız, sıfır ortalamalı beyaz gürültüdür ve sırasıyla güç tayfları ( power spectra )  $S_b$  ve  $S_d$ 'dir. Kesikli sürümü ise,

$$x_c(k+1) = F_2 x_c(k) + v_c(k) \quad (2.16)$$

burada  $F_2 = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $x_c = [b \ d]^T$  ve  $v_c(k)$  sıfır ortalamalı kovaryans matrisidir.

$$Q_c = S_b T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + S_d V_2, \quad V_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} T^3 & \frac{1}{2} T^2 \\ \frac{1}{2} T^2 & T \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

burada  $T$  örnekleme aralığıdır.

Birçok GPS saati için  $S_b$  ve  $S_d$  yaklaşık olarak  $S_b = (0.5 \sim 2)\gamma$  ve  $S_d = (2 \sim 8)\pi^2\alpha$  alınabilir.

Burada  $\alpha$  ve  $\gamma$ , saat dengesinin tanımlanması için kullanılan Allan varyans parametreleridir.

Çizelge 2 1 Küresel konumlandırma saat parametreleri

Saat Tipi	$\alpha$	$\gamma$
Kristal	$2 \times 10^{-20}$	$2 \times 10^{-19}$
Fırınlanmış Kristal	$4 \times 10^{-23}$	$8 \times 10^{-20}$
Rubidium	$4 \times 10^{-29}$	$2 \times 10^{-20}$

### 2.2.3 Dinamik model

Sabit kabul edilebilecek yükseklik ve yatay hız değişimine sahip sabit hareket için, kesikli hareket denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$x(k+1) = Fx(k) + v(k) \quad (2.18)$$

Durum değişkenleri  $x = [x \ \dot{x} \ y \ \dot{y} \ z \ x_c^T]^T$ 'dir ve  $v(k)$ , sürekli-zaman süreç gürültüsünün kesikli-zaman eşdeğeridir;  $(x, y, z)$  pozisyon ve  $x_c$  kullanıcının saat durum değişkenidir. Buradaki tüm gürültüler beyaz gürültüdür. Durum değişim matrisi ise,

$$F = \text{diag}[F_2 \quad F_2 \quad 1 \quad F_2] \text{ 'dir.}$$

Buradaki  $F_2$ , alıcıdaki saatin modellenmesi kısmında verilmişti. Uygun süreç gürültüsü kovaryansı ise

$$Q = \text{diag}[S_x V_2 \quad S_y V_2 \quad S_z T \quad Q_c]$$

olarak verilebilir. Burada  $V_2$  ve  $Q_c$ , yine alıcıdaki saatin modellenmesi kısmında verilmişti.

#### 2.2.4 Lineer ölçüm modeli

Ölçümler doğrusal olmadığı için, ölçümler kestirimler etrafında lineerleştirilirse,

$$\begin{aligned} z(k) &= \psi[x(k)] + w(k) \\ &\approx \psi[\hat{x}(k | k-1)] + \left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k|k-1)} [x(k) - \hat{x}(k | k-1)] + w(k) \\ &= \hat{z}(k | k-1) + H(k)[x(k) - \hat{x}(k | k-1)] + w(k) \end{aligned} \quad (2.19)$$

buradan lineer yalancı-ölçüm ( pseudo-measurement ) eşitliği elde edilir.

$$z(k)^* = z(k) - \psi[\hat{x}(k | k-1)] + H(k)\hat{x}(k | k-1) = H(k)x(k) + w(k) \quad (2.20)$$

Yukarıda n tane uydu görülür durumdaysa ve  $x = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad z \quad x_c^T]^T$  ise

$$H = \left. \frac{\partial \rho}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = \left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = \begin{bmatrix} -h_1^x & 0 & -h_1^y & 0 & -h_1^z & c & 0 \\ -h_2^x & 0 & -h_2^y & 0 & -h_2^z & c & 0 \\ \vdots & & & & & & \vdots \\ -h_n^x & 0 & -h_n^y & 0 & -h_n^z & c & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

burada  $(h_i^x, h_i^y, h_i^z)$  i.uydu ile kullanıcı arasındaki görüş hattı vektörü ( Line of Sight – LOS ) ve  $c$  ışık hızıdır. Bu vektörün elemanları ise aşağıdaki şekilde verilebilir,

$$\begin{aligned} h_i^x &= -\frac{\partial \psi_i}{\partial x} = \frac{(X_i - x)}{\sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}} \\ h_i^y &= -\frac{\partial \psi_i}{\partial y} = \frac{(Y_i - y)}{\sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}} \\ h_i^z &= -\frac{\partial \psi_i}{\partial z} = \frac{(Z_i - z)}{\sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Ölçüm hatası için kovaryans matrisi, diagonal olarak düşünülebilir:

$$R = \text{cov}[w] = \text{diag}[\sigma_p^2 \quad \dots \quad \sigma_p^2] \quad \text{buna göre uyduların ilintisiz olduğu düşünülebilir (Bar-Shalom 2001).}$$

### 2.3 Ataletsel Seyrüsefer ve Küresel Konumlandırma Sistemlerinin Bütünleştirilmesi

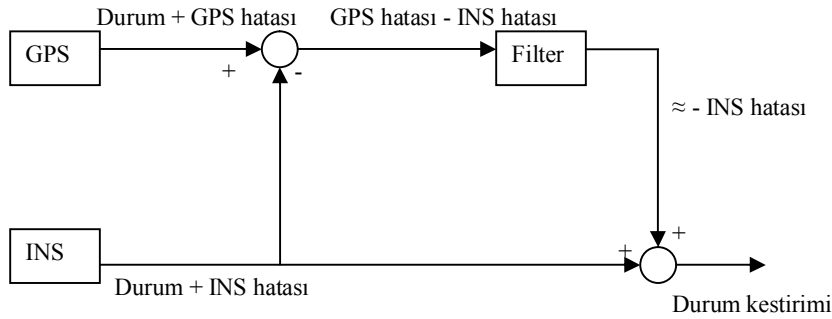
Diğer seyrüsefer sistemleri ile karşılaştırıldığında, ataletsel seyrüsefer sistemi iki önemli avantaja sahiptir. Bu avantajlardan ilki bağımsız olması, ikincisi ise kısa süreli uygulamalarda yüksek doğruluğa sahip olmasıdır. En önemli dezavantajı ise zamanla katlanarak büyüyen pozisyon hatasıdır. Bu nedenle ataletsel seyrüsefer sistemi uzun süreli uygulamalarda çeşitli radyo seyrüsefer ( radio navigation ) temelli seyrüsefer sistemleri ile birlikte kullanılır.

Küresel konumlandırma sistemi ve ataletsel seyrüsefer sistemi neredeyse ideal olarak birbirlerinin tümleyenidir. Bu nedenle ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemine ait seyrüsefer verileri veri kaynaştırma ( data fusion ) teknikleri ile birleştirilerek ayrı ayrı sistemlerin dezavantajları ortadan kaldırılabilir. Tamamlayıcı Filtreleme ( Complementary Filtering ), Merkezlenmiş Kestirim Kaynaştırma ( Centralized Estimation Fusion ) ve Dağıtılmış Kestirim Kaynaştırma ( Distributed

Estimation Fusion ), ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri bütünleştirilmesi için veri kaynaştırma yaklaşımları olarak verilebilir.

### 2.3.1 Tamamlayıcı filtreleme ile entegrasyon

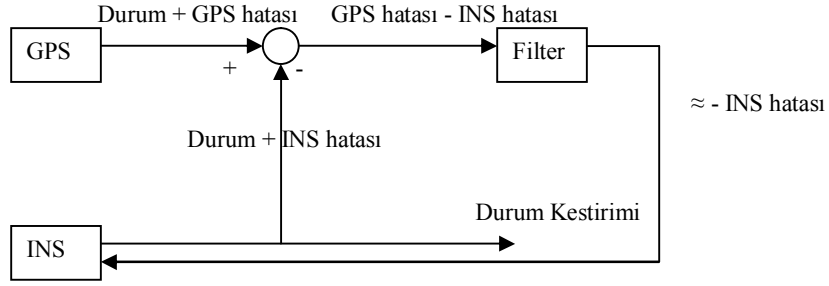
Bu yaklaşımda; filtreleme ile küresel konumlandırma sistemi hatasını yaklaşık olarak ataletsel seyrüsefer sisteminin hatasının negatifine çevirip, bu hatayı ataletsel seyrüsefer sisteminin çıkışına eklemek suretiyle, ataletsel seyrüsefer sistemi hatasının ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Bu ileri-besleme bir yaklaşımdır.



Şekil 2.2 INS/GPS entegrasyonunda ileri-besleme yaklaşımı

Ataletsel seyrüsefer sisteminden gelen seyrüsefer verisi, küresel konumlandırma sisteminden gelen seyrüsefer verisinden çıkarılarak hata ölçümleri elde edilir. Bu hata ölçümleri kestiriciye beslenerek, platformun durum kestirimleri elde edilir. Bu kestirimler, ataletsel seyrüsefer sisteminin, seyrüsefer verisine ait hata kestirimleridir. Bu kestirimleri başlangıçtaki ataletsel seyrüsefer verisinden çıkararak nihai seyrüsefer verisi elde edilir( Şekil 2.2 ).

İleri-Besleme yaklaşımına alternatif olarak, geri besleme yaklaşımı da kullanılabilir. Burada, ataletsel seyrüsefer sistemi hata kestirimleri, ataletsel seyrüsefer sistemine geri beslenerek, ataletsel seyrüsefer sistemi çıkışındaki hatanın azaltılması amaçlanmaktadır.

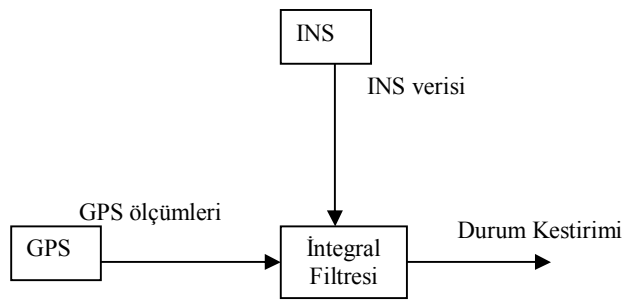


Şekil 2.3 INS/GPS entegrasyonunda geri-besleme

Bu bütünleşme yönteminde, ileri beslemede olduğu gibi ataletsel seyrüsefer sistemi hata kestirimleri elde edilir. Bu hata kestirimleri, ataletsel seyrüsefer sistemine geri beslenerek, seyrüsefer sisteminin çıkışındaki verinin iyileştirilmesi sağlanır( Şekil 2.3 ).

### 2.3.2 Merkezlenmiş kestirim kaynaştırma ile bütünleşme

Teorik olarak, Ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri bütünleştirilmesinin daha iyi ve daha kolay bir yolu, ataletsel seyrüsefer sisteminden ve küresel konumlandırma sisteminden gelen tüm verilerin en uygun filtrede kullanılmasıdır. Bu yaklaşım ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri bütünleştirilmesinde, Sıkı Bağlı ( Tightly Coupled ) olarak bilinir.



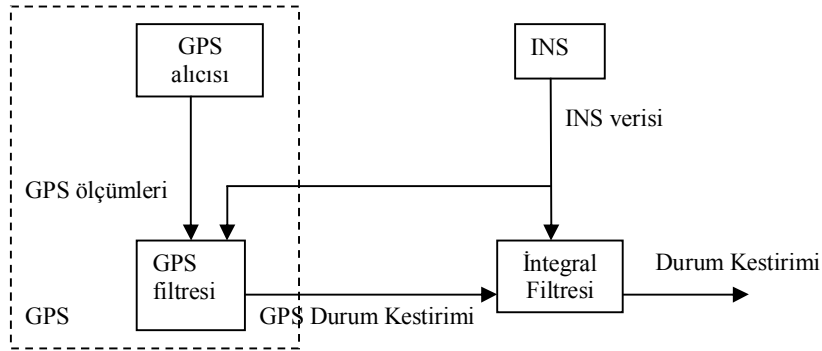
Şekil 2.4 INS/GPS entegrasyonunda sıkı bağlı yaklaşım

Bu yöntemde küresel konumlandırma sistemi ölçümleri ve ataletsel seyrüsefer sistemi ölçümleri, merkezi bir işlem biriminde işlenir ve sonuç kestirimi elde edilir. Bu yaklaşımın en büyük avantajı, her bir küresel konumlandırma sistemi, uydusundan

gelen ilintisiz veriyi ayrı işleyen integral filtresinin esnek olmasıdır. Dezavantajı ise, böyle bir integral alma işleminin, ağır hesaplama yükü ve düşük hata payı getirmesidir ( Şekil 2.4 ).

### 2.3.3 Dağıtılmış kestirim kaynaştırma ile entegrasyon

Sıkı Bağlı yaklaşımına ek olarak ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri bütünleştirilmesi, Gevşek Bağlı ( Loosely Coupled ) olarak da yapılabilir. Gevşek Bağlı yaklaşım, Kaskat Filtreleme olarak da bilinir. Bu yaklaşım basit ve daha ekonomiktir.



Şekil 2.5 INS/GPS entegrasyonunda gevşek bağlı yaklaşım

Bu yöntemde küresel konumlandırma sistemi ölçümleri, ataletsel seyrüsefer sisteminden ölçümlerle ön filtrelemeden geçirilir ve küresel konumlandırma sistemi için iyileştirilmiş durum kestirimleri elde edilir. Bu kestirimler, ataletsel seyrüsefer sistemi ölçümleri ile bir integral filtresine beslenerek, seyrüsefer verisi elde edilir( Şekil 2.5 ).

## 2.4 Kalman Filtresi

Önceki konu başlıkları altında açıklanan bütünleştirme yöntemlerinin performansı, kullanılan durum kestirici tarafından belirlenir. En çok kullanılan ve geleneksel durum kestirici Kalman filtresidir (Kalman 1960, Kalman *et al.* 1961). Kalman filtresi, doğrusal kuadratik Gaussian probleme yinelemeli bir çözüm üreten kestiricidir. Eğer hedef dinamikleri tam olarak tanımlanabilirse, Kalman filtresi, doğrusal hedef ve ölçüm

modeli, süreç ve ölçüm gürültüsünün beyaz Gaussian olduğu durum için en küçük ortalama kareler kistasına göre katkısız ( unbiased ) ve en uygun kestirim üretir.

Seyrüsefer hatasının dinamik sürecinin kesikli Markov biçiminde tanımlanabildiği varsayılırsa, Markov süreci cinsinden seyrüsefer hatası dinamikleri aşağıdaki gibi tarif edilebilir.

$$X(k+1) = FX(k) + \Gamma v(k) \quad (2.23)$$

Burada  $X(k)$  n boyutlu seyrüsefer durum vektörü,  $F$  bilinen durum geçiş matrisi,  $\Gamma$  bilinen dış etki geçiş matrisi ( disturbance transition matrix ) ve  $v(k)$  bilinen  $Q$  kovaryansına sahip, sıfır ortalamalı bilinmeyen beyaz Gaussian gürültüdür. Ölçümler durum değişkenlerinin doğrusal kombinasyonları olup, ilintisiz beyaz gürültü ile bozulmuş değerlerdir. Bu durumda m boyutlu ölçüm vektörü aşağıdaki gibi modellenir.

$$Z(k) = HX(k) + w(k) \quad (2.24)$$

Burada  $H$  mxn ölçüm matrisi ve  $w(k)$   $R$  kovaryanslı, sıfır ortalamalı beyaz normal dağılımlı gürültüdür.  $v(k)$  ve  $w(k)$  istatistiksel bağımsızdırlar. Durum vektörü  $X(k)$  genelde seyrüsefer sisteminin, pozisyon, hız, açı ve meyil durum değişkenlerini içerir. Kalman filtresi denklemlerinin nasıl elde edileceği (Gelb 1974)'de verilmektedir. Burada yukarıdaki bilgiler ışığında Kalman filtresi eşitliklerinin türetilmiş halleri verilmektedir.

$$\tilde{X}(k+1/k) = F\hat{X}(k/k) \quad (2.25)$$

$$v(k+1) = Z(k+1) - HX(k+1/k) \quad (2.26)$$

$$P(k+1/k) = FP(k/k)F^T + \Gamma Q \Gamma^T \quad (2.27)$$

$$S(k+1) = HP(k+1/k)H^T + R \quad (2.28)$$

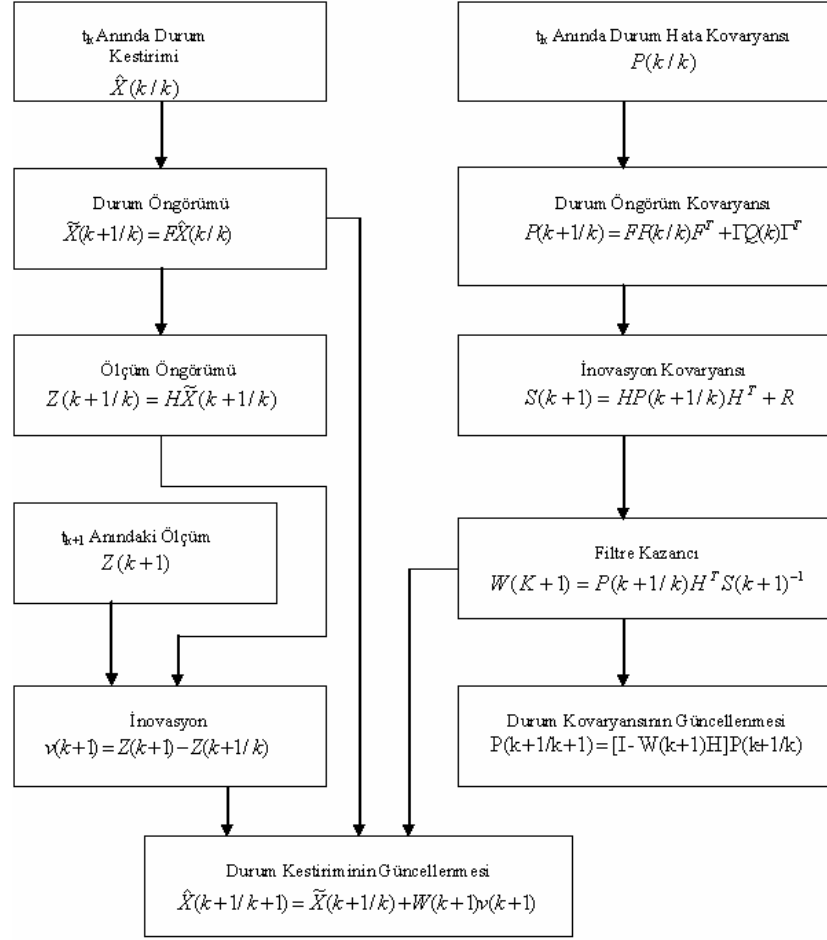
$$W(k+1) = P(k+1/k)H^T S(k+1)^{-1} \quad (2.10)$$

$$\hat{X}(k+1/k+1) = \tilde{X}(k+1/k) + W(k+1)v(k+1) \quad (2.29)$$

$$P(k+1/k+1) = P(k+1/k) - P(k+1/k)W(k+1)H \quad (2.30)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $\tilde{X}(k+1/k)$  ve  $P(k+1/k)$  sırasıyla durum öngörümü ve durum öngörüm kovaryansıdır.  $\hat{X}(k+1/k+1)$  ve  $P(k+1/k+1)$  sırasıyla güncellenmiş durum kestirimi, ve ona ait kovaryanstır.  $S(k)$ ,  $W(k)$ ,  $R$ ,  $v(k)$  sırasıyla inovasyon kovaryansı, filtre kazancı, ölçüm gürültüsü kovaryansı ve inovasyondur. Durum öngörüm kovaryansı hesaplanırken kullanılan süreç gürültüsü varyansı, filtrenin seyrüsefer sistemi hata kestirimi yeteneğini belirler.

Şekil 2.6'de Kalman filtresinin blok şeması görülmektedir. Şekil 2.6 incelendiğinde, Kalman filtresinde durum kestirim döngüsü ile durum kovaryans döngüsü arasında hiçbir bağlantı olmadığı görülür. Durum kovaryans döngüsü ölçümlerden bağımsız olarak çalışmaktadır. Bu durum bir önceki ana ait durum kovaryansının bilinmesi halinde, filtre kazancının ölçüm bilgisi olmadan hesaplanabileceği anlamına gelir. Durum kovaryans döngüsünün bu yapısı, belirli bir zaman sonra durum kovaryansının ve buna bağlı olarak filtre kazancının sabit bir değere doğru yakınsamasına neden olur. Bir başka deyişle filtrenin yaptığı hata sabit hale gelir ve filtre tepkisinde iyileştirme yapılamaz.



Şekil 2.6 Kalman Filtresi blok şeması

## 2.5 Geliştirilmiş Dalga Kestirimi ( Modified Wave Estimation )

Geliştirilmiş dalga kestiricisi tekniği; giriş bozulmalarının, kısa zaman aralıklarında ( periyotlarında ), deterministik ortalamalar ile tanımlanabileceği prensibine dayanır. Normal Dağılımlı beyaz gürültü ile sürülen biçimlendirme filtresi ( shaping filter ) kullanmak yerine; geliştirilmiş dalga kestiricisi, giriş bozulmalarını, bilinmeyen ancak kestirilebilir yoğunluklu, bilinen temel fonksiyonlarla modeller.

Geliştirilmiş dalga kestiricisinde, giriş bozulmaları aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$w(t) = c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t) + \dots + c_n f_n(t) \quad (2.31)$$

burada  $w(t)$  giriş bozulumu,  $f_1(t), \dots, f_n(t)$  bilinen temel fonksiyonlar ( örnek olarak, yatay doğru, eğimli doğru, üstel fonksiyon ) ve  $c_1, \dots, c_n$  anlık bir zamandan diğerine değişen bilinmeyen katsayılarıdır.

Sistem aşağıdaki gibi;

$$X(k+1) = FX(k) + \delta(k) \quad (2.32)$$

ve durağan bir süreç olarak düşünülebilir ölçüm modeli ise;

$$Z(k+1) = HX(k+1) + w(k) \quad (2.33)$$

burada,

$X$  : toplam durum vektörü

$F$  : durum dönüşüm matrisi

$\delta$  : her N zaman aralığında görünen birim dürtü fonksiyonları (impulse) içerir. Yoğunlukları, dalga tanımının bilinmeyen katsayıları ile aynıdır.

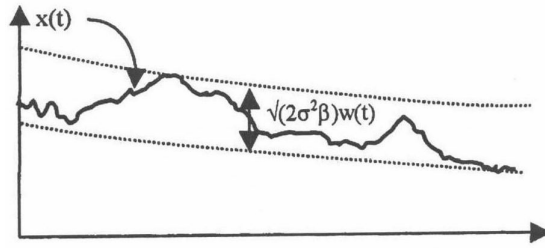
$Z$  : ölçüm vektörü

$H$  : gözlem (ölçüm) matrisi

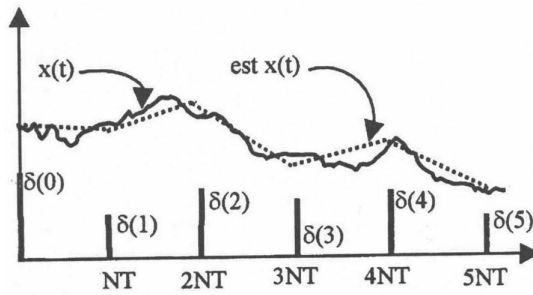
$w$  : bilinen R kovaryanslı, sıfır ortalamalı, beyaz normal dağılımlı ölçüm gürültüsü

olarak tanımlanır.

Eşitlik (2.31) ve (2.33) kullanılarak; sistemi, kısa zaman aralığı  $NT$ 'de deterministik olarak tanımlamak mümkündür. Burada,  $T$  örnekleme periyodu ve  $NT$  ise tur zamanı ( cycle time )'dir. Burada en önemli nokta, uygun tur zamanının seçimidir. Küçük tur zamanı, sistemin çok daha doğru ifade edilebilmesine izin verir ancak tüm durum vektörlerinin yakınsaması ( converge ) için yeterli olmayabilir. Diğer taraftan, büyük tur zamanı yakınsamayı kesinleştirse de kestirim doğruluğunu düşürür. Daha mantıklı bir yaklaşım, durum değişkenlerini gözlenebilirlik derecelerine göre iki gruba ayırmaktır. Gözlenebilirlik koşulu, verilen ölçümlerden durum değişkenlerinin hesaplanabilmesi kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Bu yaklaşımda, ilk grup tüm kuvvetli gözlenebilir durumlardan ( states ) oluşur. Yani basit ( temel ) sistem modelidir. İkinci grup ise tüm zayıf gözlenebilir durumlardan oluşur. Yani dalga ( wave ) gösteriminin durum değişkenleridir. Böylelikle, sadece kuvvetli gözlenebilir durumlarının yakınsamasını sağlamak için daha kısa dalga ( wave ) turu kullanılabilir. Tur zamanında yakınsamayan zayıf gözlenebilir durumlar, ayrı olarak ikinci grupta hesaplanabilir. Giriş bozulmaları Kalman filtre ve geliştirilmiş dalga kestirici için sırasıyla Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2.7 Geleneksel Kalman'da giriş bozulmaları



Şekil 2.8 Geliştirilmiş dalga kestiricisinde giriş bozulmaları

Ayırma sayesinde, temel sistem modeli, bir dalga turunda iki bileşene sahip olur. İlk bileşen, kuvvetli gözlenebilir durumların kendilerine olan etkileri ve ikinci bileşen de zayıf gözlenebilir durumların, kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisidir. Bu nedenle, sistemin temel modeli aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$X(k+1) = X^0(k+1) + X^1(k+1) \quad (2.34)$$

başlangıç koşulları  $X^0(0) = X(0)$  ve  $X^1(0) = 0$ 'dır.

$$X^0(k+1) = F(k)X^0(k)$$

$$X^1(k+1) = F(k)X^1(k) + Ge(k)$$

$$e(k+1) = Le(k)$$

(2.35)

burada,

$X$  : kuvvetli gözlenebilir durumların vektörü (n x 1)

$X^0$  : kuvvetli gözlenebilir durumların kendilerine etkisi (n x 1)

$X^1$  : zayıf gözlenebilir durumların, kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisi (n x 1)

$F$  : kuvvetli gözlenebilir durumların durum dönüşüm matrisi (n x n)

$G$  : zayıf gözlenebilir durumların, kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisini belirten etki matrisi (n x k)

$e$  : zayıf gözlenebilir durumların vektörü (k x 1)

$L$  : zayıf gözlenebilir durumların durum dönüşüm matrisi ( $k \times k$ )'dir.

Genellikle,  $e_k$  vektöründeki zayıf gözlenebilir durumlar, bilinmeyen katsayılı dalga ( wave ) fonksiyonlarını gösteren durum değişkenleridir.

Yukarıda verilenlere göre, bir dalga turunda  $k$ .devirdeki ilk bileşenin bir sonraki kestirimi

$$\hat{X}^0(k+1|k+1) = F(k)\hat{X}^0(k|k) + W(k+1)(Z(k+1) - HF(k)\hat{X}^0(k|k)) \quad (2.36)$$

ve kestirim hatası,

$$\begin{aligned} \tilde{X}^0(k+1) &= \hat{X}^0(k+1) - X^0(k+1) \\ &= (I - W(k+1)H)F(k)\tilde{X}^0(k) + W(k+1)HD(k+1)e_0 + W(k+1)w(k+1) \\ &= \prod_{i=1}^k (I - W(k+2-i)H)F(k-i)\tilde{X}^0(0) + \Psi(k+1)e_0 \\ &\quad + \sum_{j=0}^{k-1} \left[ \prod_{i=1}^j (I - W(k+2-i)H)F(k-i) \right] W(k+1-j)w(k+1-j) \end{aligned} \quad (2.37)$$

burada

$$\begin{aligned} D(k+1) &= F(k)D(k) + GL(k|0) \\ \Psi(k+1) &= (I - W(k+1)H)F(k)\Psi(k) + W(k+1)HD(k+1) \\ \prod_{i=1}^j (I - W(k+2-i)H)F(k-i) &= I \quad \text{eğer } i > j \end{aligned} \quad (2.38)$$

Kestirim hatasında, eşitlik (2.37), ilk bileşen başlangıç kestirimindeki hatadan, ikinci bileşen zayıf gözlenebilir durumların kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisinden ve üçüncü bileşen ölçüm gürültüsünden kaynaklanır.  $D(k+1)$  matrisi, dalga turu ( wave

cycle ) boyunca zayıf gözlenebilir durumların kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisini üretir. Bu önemlidir, çünkü geleneksel Kalman filtresinde, kuvvetli ve zayıf gözlenebilir durumların yakınsaması ardışık şekilde olur ve ilk olarak kuvvetli gözlenebilir durumlar yakınsar. Bu nedenle kuvvetli gözlenebilir durumların kestirimi, henüz yakınsamamış zayıf gözlenebilir durumlar tarafından etkilenir.

Başlangıç kestirimi hatası ve bir dalga turundaki zayıf gözlenebilir durumların başlangıç değerleri ( örnek olarak,  $\tilde{X}^0(0)$  ve  $e_0$  ) ilintisiz olduğunu düşünelim. Hata kovaryansı, aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
P(k+1) &= E\left[\left(\tilde{X}^0(k+1)\right)\left(\tilde{X}^0(k+1)\right)^T\right] \\
&= (I - W(k+1)H)F(k)P(k)F^T(k)(I - W(k+1)H)^T \\
&\quad + (I - W(k+1)H)F(k)\Psi(k)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T W^T(k+1) \\
&\quad + W(k+1)HD(k+1)E[e_0 e_0^T]\Psi^T(k)F^T(k)(I - W(k+1)H)^T \\
&\quad + W(k+1)HD(k+1)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T W^T(k+1) + W(k+1)RW^T(k+1) \quad (2.39)
\end{aligned}$$

En uygun kazanç için en küçük hata kovaryansı,  $(\partial \text{trace}[P(k+1)]/\partial W(k+1)) = 0$  olduğunda elde edilir.  $P(k+1)$ 'nin türevi alındıktan ve uygun şekilde düzenlendikten sonra, en uygun ( optimal ) kazanç için eşitlik aşağıdaki gibi olur.

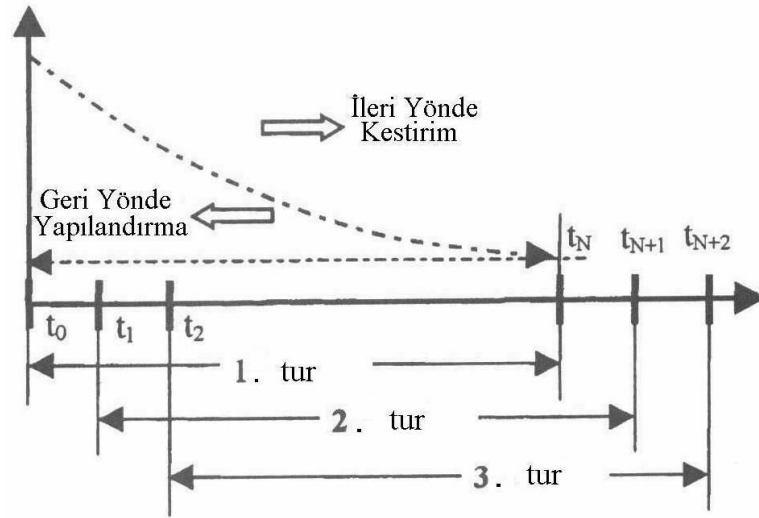
$$\begin{aligned}
W(k+1) &= \left\{ F(k)P(k)F^T(k)H^T - F(k)\Psi(k)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T \right\} \\
&\quad \times \left\{ HF(k)P(k)F^T(k)H^T + HD(k+1)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T \right. \\
&\quad \left. + R - HF(k)\Psi(k)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T \right. \\
&\quad \left. - HD(k+1)E[e_0 e_0^T]\Psi^T(k)F^T(k)H^T \right\}^{-1} \quad (2.40)
\end{aligned}$$

ve uygun bir sonraki kovaryans matrisi aşağıdaki gibidir:

$$P(k+1) = (I - W(k+1)H)F(k)P(k)F^T(k) + W(k+1)HD(k+1)E[e_0 e_0^T]\Psi^T(k)F^T(k) \quad (2.41)$$

Eşitlik (2.36),(2.40) ve (2.41) kullanılarak, tur zamanları  $t_0$ 'den  $t_N$ 'e kadarlık sürede ölçüm verisinden  $X^0(N)$ 'ın kestirilmesi mümkündür. Çünkü kuvvetli gözlenebilir durumların bu sürede yakınsadığı düşünülür. Bu ileri kestirim ( forward estimation ) olarak adlandırılır( Şekil 2.9). İleri kestirimin sadece, tur sonunda durum vektörü kestiriminin hesaplanmasında kullanıldığı vurgulanmalıdır. Bu kestirim, başlangıç turuna kadar geriye doğru kendi değerini yeniden yapılandırır. Sistemin deterministik tanımından dolayı bu mümkündür.

$t_1, t_2, t_3$  gibi anlarda ( $t_0$  dışında) kestirimlerin yeniden yapılandırılması için,  $e(k+1)$  ve  $X^1(k+1)$ 'in kestirilmesine ihtiyaç vardır. Ancak sıklıkla,  $e(k+1)$ 'nin kestirimi ile ilgilenilmez, çünkü normalde bu kestirim, dalga gösterimini ( wave representation ) içerir. Bu nedenle,  $e(k+1)$ 'nin kestiriminden kaçınmak fakat aynı zamanda kuvvetli gözlenebilir durumlara etkisini bilmek avantajlıdır. Bu amacın başarılmasında aşağıdaki yöntem kullanılabilir.



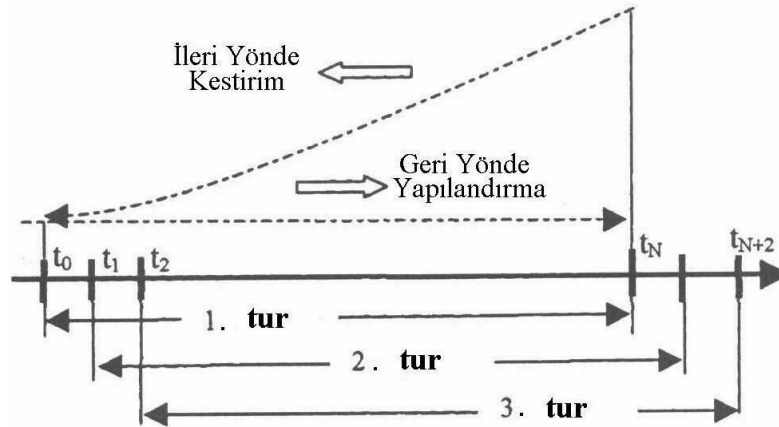
Şekil 2.9 Geliştirilmiş dalga kestiricisi

Bir önceki kabule göre,  $t = t_0$  anında  $X^0(0) = X(0)$ 'dir. Bu nedenle, eğer  $t_0-t_N$  aralığı süresince ölçümler,  $\hat{X}^0(N)$ 'in kestiriminde kullanılırsa,  $e(k+1)$  ve  $X^1(k+1)$

kestirilmeden, başlangıç değerinin  $\hat{X}^0(0) = F(0|N)\hat{X}^0(N) = \hat{X}(0)$  olarak yeniden yapılandırılması mümkündür.

Benzer şekilde, bir sonraki dönemde ( $t_1$ ),  $t_1$  ve  $t_{N+1}$  aralığı süresince ölçümler,  $\hat{X}(1)$ 'in yeniden yapılandırılmasında, aralık boyunca  $\hat{X}^0(0)$  için başlangıç koşulu gibi kullanılabilir (Şekil 2.9). Ancak bu yaklaşımda, kestirimler, dalga turuna ( wave cycle ) eşit zaman gecikmesi ile üretileceklerdir.

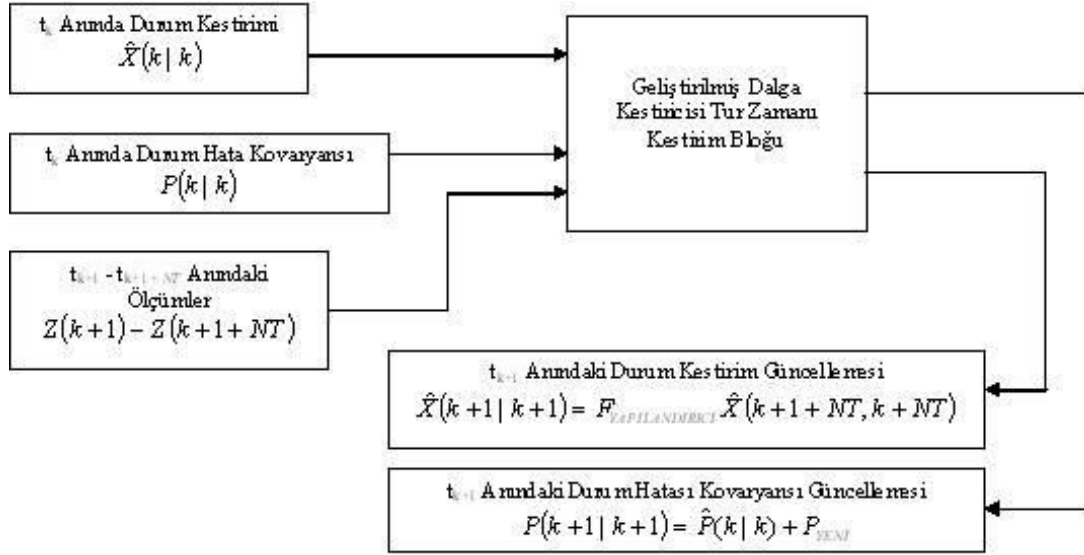
Tam bir dalga turu için (  $NT$ , örnek olarak  $t_0$ 'dan  $t_N$ 'e ) ölçümleri toplayarak ve daha önceki algoritmayı  $t_N$ 'den  $t_0$ 'a tanımlayarak ( ileri kestirim ), bu tekniği gerçek zamanlı kestirimler üretmekte kullanmak mümkündür.  $t_N$  anındaki başlangıç değeri, gerçek zamanlı olarak yeniden yapılandırılır ( geriye doğru düzeltme ). Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, başarılı dalga turları için bu tekrarlanabilir. Ancak bu durumda, ilk dalga turu süresince (  $NT$  ) kestirim mevcut olmayacaktır (Salychev *et al.* 1999).



Şekil 2.10 Gerçek zamanlı geliştirilmiş dalga kestiricisi

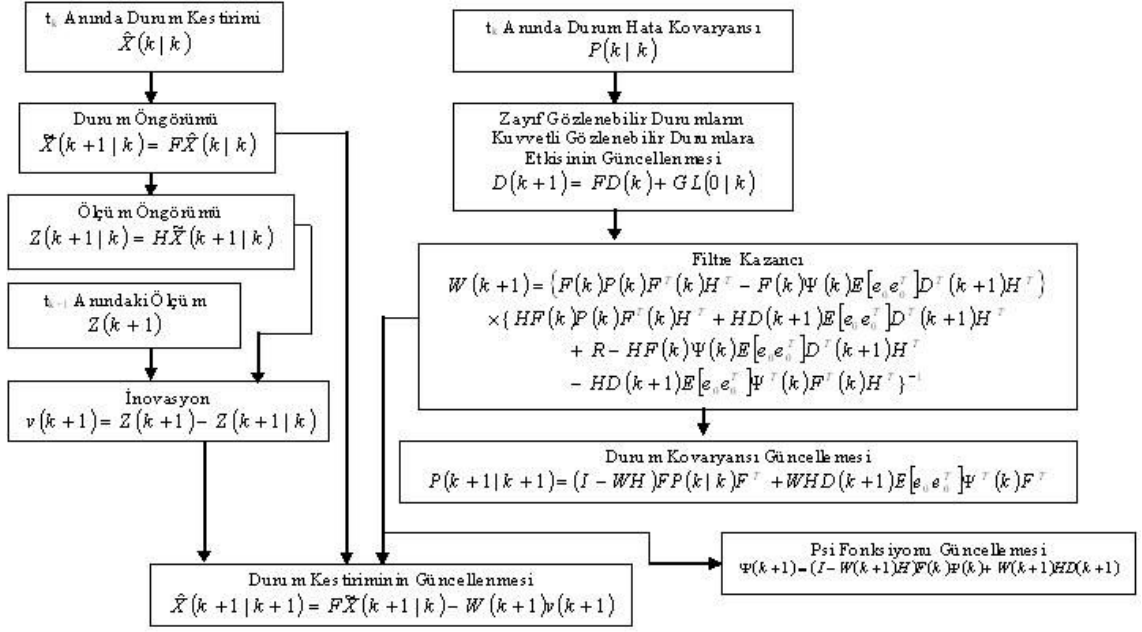
Şekil.2.11'de geliştirilmiş dalga kestirici algoritması için hazırlanmış blok şema görülmektedir. Şekilde  $t_k$  anındaki durum kestirimi, bu kestirime ait durum hata kovaryansı ve ölçüm seti, geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanı kestirim bloğuna beslenir. Blok işlemlerin sonunda  $\hat{X}(k+1+NT, k+NT)$  durum kestirimini ve durum hata kovaryansı değişimi olan  $P_{YENI}$  matrisini üretir. Bloktan elde edilen durum

kestiriminden, yeniden yapılandırma matrisi kullanılarak k+1 anı için durum kestirim elde edilir. Böylelikle durum kestirimi güncellenmesi başarmış olur. Yine bloktan elde edilen durum hata kovaryansı değişim matrisi, bir önceki andaki durum hata kovaryansı matrisine eklenerek k+1 anı için durum hata kovaryansı elde edilmiş olur.



Şekil 2.11 Geliştirilmiş dalga kestiricisi algoritması

Şekil 2.12’de ise Geliştirilmiş dalga kestiricisi tur zamanı kestirim bloğu algoritması verilmiştir. Şekil 2.12 ve şekil 2.6 arasındaki benzerlik ilk bakışta göze çarpar. Geliştirilmiş dalga kestiricisini, Kalman filtresinden ayıran zayıf gözlenebilir durumları kuvvetli gözlenebilir durumlardan ayırmasıdır.



Şekil 2.12 Geliştirilmiş dalga kestiricisi tur zamanı bloğu algoritması

## 2.6 Birleştirilmiş Sistem

Yeni bir yöntem olarak önerilen birleştirilmiş sistemin temelinde, seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde kullanılan, Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi filtrelerinin özellikleri yatmaktadır. Kalman filtresi kuvvetli gözlenebilir durum pozisyon için sınırsal olarak daha iyi sonuç vermektedir. Buna karşılık geliştirilmiş dalga kestiricisi pozisyona göre daha zayıf gözlenebilir durumlar hız ve açı durumları için daha iyi sonuç vermektedir (Salychev *et al.* 1999). Bununla birlikte geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanına eşit miktarda zaman gecikmesine sahip olması ( gerçek zamanlı bir sistem için tur zamanına eşit miktarda kestirim elde edilememesi ) ve yüksek işlem yükü önemli dezavantajlarını oluşturur. İşlem yükünden çok sistemin doğruluğunun ön plana çıktığı uygulamalarda için Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin tümleşik hata özelliklerinden faydalanmak ve seyrüsefer kestirimlerini iyileştirmek mümkün olabilir. Böyle bir çalışma ise uygun veri birleştirme yöntemi ile başarılabilir.

Veri birleştirme teknikleri, birçok seyrüsefer, hedef izleme ve gözetleme gibi güvenilirliğin önemli olduğu uygulamalarda kullanılır. Veri birleştirme ile ilgili daha geniş bilgi literatürden elde edilebilir (Li *et al.* 2000, Li *et al.* 2002, Vershinin 2002).

Karmaşık bir sistemin alt sistemlerinin dinamikleri aşağıdaki form da verilebilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + w_i(t) \\ y_i(t) &= C_i x_i(t) + v_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.42)$$

Burada

$n$  : alt sistemlerin sayısı

$x_i(t)$  : i. alt sistemin durum değişkenleri

$u_i(t)$  : i. alt sistemindeki kontrol sinyali

$y_i(t)$  : i. alt sistemin çıkışı

$w_i(t)$  : i. alt sistemindeki gürültü

$v_i(t)$  : i. alt sistemindeki ölçüm gürültüsü

olarak tanımlanır.

Alt sistem gürültüsü  $w_i(t)$  ve ölçüm gürültüsü  $v_i(t)$ 'nin, aşağıdaki istatistiksel özelliklere sahip sıfır ortalamalı normal dağılımlı beyaz gürültü olduğu farz edilir.

$$\begin{aligned}
E\{x_i(0)\} &= E\{w_i(0)\} = E\{v_i(0)\} = 0 \\
E\{w_i(t)w_i^T(\tau)\} &= Q_i(t)\delta(t-\tau) \\
E\{v_i(t)v_i^T(\tau)\} &= R_i(t)\delta(t-\tau) \\
E\{x_i(0)w_i^T(t)\} &= E\{x_i(0)v_i^T(t)\} = E\{w_i(t)v_i^T(\tau)\} = 0
\end{aligned} \tag{2.43}$$

ve  $Q_i(t) \geq 0$ ,  $R_i(t) > 0$ .

En küçük kare ortalamalar kıssasına göre alt sistemlerin durum kestirimi,

$$\dot{\hat{x}}_i(t) = A_i \hat{x}_i(t) + B_i u_i(t) + K_i [y_i(t) - C_i \hat{x}_i(t)] \tag{2.44}$$

Hata kovaryansı çoğalması aşağıdaki şekilde hesaplanır,

$$\frac{d}{dt}(P_i^{-1}) = -P_i^{-1} A_i - A_i^T P_i^{-1} - P_i^{-1} Q_i P_i^{-1} + C_i^T R_i^{-1} C_i \tag{2.45}$$

$R_i^{-1}$ 'in var olduğunu düşünerek, en küçük ortalamalar kıssasına göre kazanç matrisi

$$K_i = P_i C_i^T R_i^{-1} \text{ 'dir.} \tag{2.46}$$

Böyle bir sistem için bağımsız kestirimlerin en uygun birleşimi aşağıdaki gibidir (Schweppe 1973).

$$\hat{x}(t) = P [P_1^{-1} \hat{x}_1 + P_2^{-1} \hat{x}_2 + \dots + P_n^{-1} \hat{x}_n] \tag{2.47}$$

$$P = (P_1^{-1} + P_2^{-1} + \dots + P_n^{-1})^{-1} \tag{2.48}$$

Yukarıda verilen veri birleştirme yöntemini iki adet en küçük kare ortalamalar kıssasına göre çalışan kestiricinin birleştirilmesine uygularsak aşağıdaki eşitlikleri elde ederiz.

$$\hat{X} = P \left( P_{kalman}^{-1} \hat{X}_{kalman} + P_{GDK}^{-1} \hat{X}_{GDK} \right) \quad (2.49)$$

$$P = \left( P_{kalman}^{-1} + P_{GDK}^{-1} \right)^{-1} \quad (2.50)$$

## 2.7 Adaptif Yaklaşımlar

Adaptif yaklaşımlar seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde önerilen ikinci yeni yöntemdir. Entegre edilmeye çalışılan seyrüsefer sistemlerinin bir parçası olan jiroskop ve ivmeölçerlerin ani hata değişimlerinde, kestiricilerin kestirimleri kötüleşecektir. Özellikle tur zamanının seçiminin önemli olduğu geliştirilmiş dalga kestiricisi böyle bir duruma karşı etkin bir tepki veremeyecektir. Hatanın durağan değiştiği bir ölçüm birimi için uzun tur zamanları seçmek sisteme gereksiz yük bindirecektir. Ayrıca ani hata değişimlerinde, küçük tur zamanları etkisiz kalacaktır. Böyle bir durumdan kaçınmak için adaptif tur zamanına sahip geliştirilmiş dalga kestirici kullanmak hem hatanın kestiriminde hem de işlem yükünün azaltılmasında önemli avantaj sağlayacaktır. Böyle bir kestiriciye sahip bir seyrüsefer sistemi farklı uygulamalardaki farklı ölçüm birimlerine daha iyi tepki verecektir.

Sistemin hata ölçütü olan kovaryansın değişimine göre eğer geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanın ayarlarsak sistemin etkinliği artırılabilir. Geliştirilmiş dalga kestiricisi için kestirimler elde edilirken, sistem kovaryansına bağlı normalize inovasyon kareleri (Bar-Shalom *et al.* 2001) hesaplanır ve bu değere göre kestiricinin tur zamanı adaptif olarak ayarlanabilir. Bu durumda sistem kovaryansı arttığında kestirici tur zamanını arttırarak daha doğru kestirimler elde edebilir. Bununla birlikte kovaryans azaldığında tur zamanı küçültülerek işlem yükü azaltılabilir. Böylelikle adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ile elde edilen seyrüsefer kestirimlerinin, normal geliştirilmiş dalga kestiricisi ile elde edilmiş seyrüsefer kestirimlerine oranla daha az işlem yükü ile daha doğru elde edilmesi sağlanabilir.

Geliştirilmiş dalga kestiricisi için inovasyon kovaryansı eşitlik 2.51'de verilmiştir.

$$S(k+1) = HFP(k+1|k+1)F^T H^T + HD(k+1)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T$$

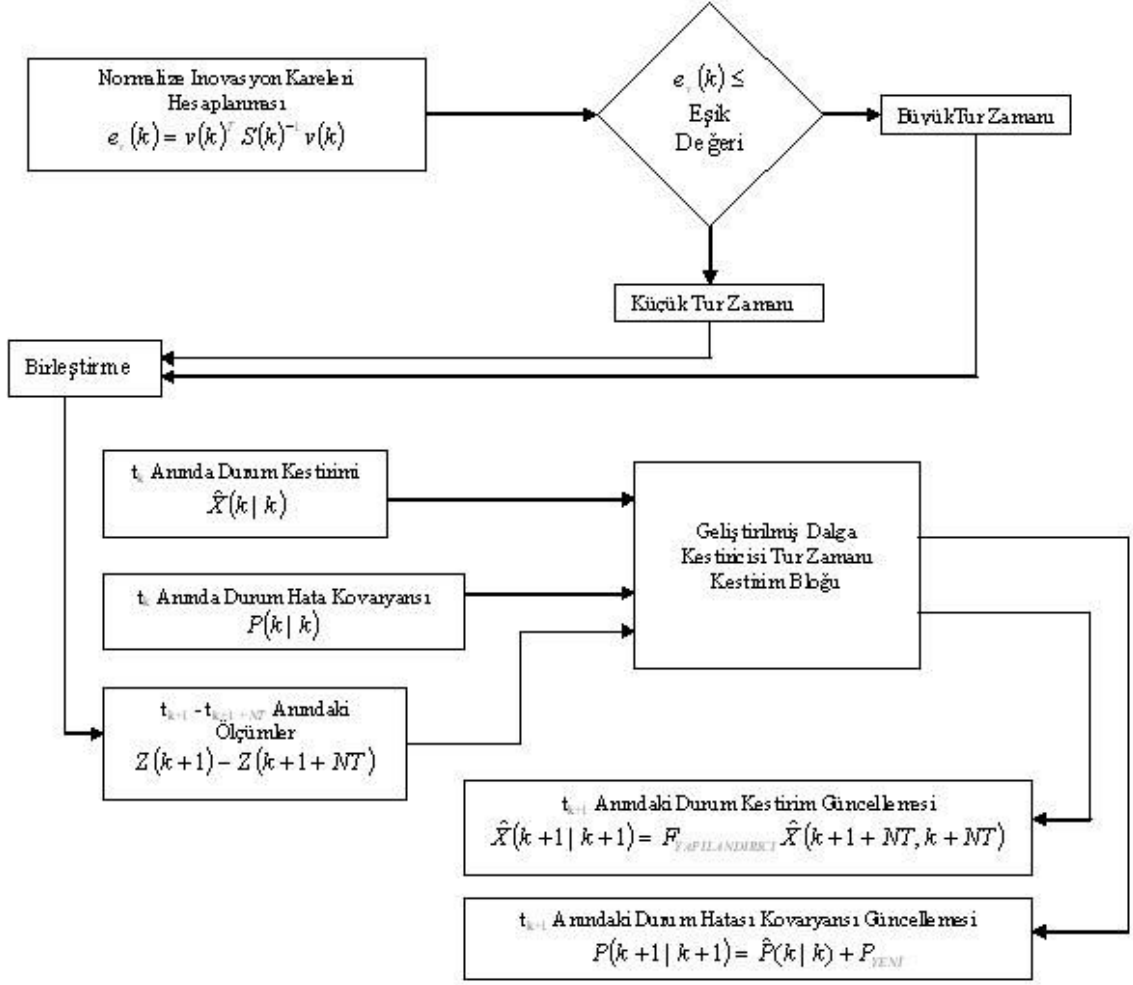
$$+ R - HF\Psi(k)E[e_0 e_0^T]D^T(k+1)H^T - HD(k+1)E[e_0 e_0^T]\Psi^T(k)F^T H^T \quad (2.51)$$

Normalize inovasyon kareleri değeri;

$$e_v(k) = v^T(k)S(k)^{-1}v(k) \quad (2.52)$$

Bu değer deneysel yollarla belirlenmiş eşik değerinin altında kaldığında yüksek tur zamanları ile uğraşmak anlamsız olacaktır. Çünkü sistem gereksiz işlem yükü ile uğraşmak zorunda kalacaktır. Böyle bir durumda tur zamanını küçültüp daha az veri seti ile işlem yapılır. Normalize inovasyon kareleri değeri eşik değerinin üstünde ise bu durumda daha iyi kestirim yapılabilmesi için tur zamanı yükseltilir ve daha büyük veri seti ile işlem yapılır.

Şekil 2.13'de yukarıda anlatılan temeller doğrultusunda oluşturulmuş adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi algoritmasının blok şeması verilmiştir. Bir önceki anda hesaplanan inovasyon kovaryansına göre normalize inovasyon kareleri değeri elde edilir. Bu değer, önceden belirlenmiş eşik değeri altında ise sistem tur zamanını küçültür ve bu tur zamanına uygun ölçüm setini hazırlar. Bir önceki ana ait kestirim ve durum hata kovaryansı değerleri, hazırlanmış ölçüm seti ile birlikte geliştirilmiş dalga kestiricisi tur zamanı kestirim bloğuna beslenir. Blok için tur zamanı küçültüldüğü için daha az işlem sayısı ile  $k+1+NT$  anındaki kestirim elde edilir. Elde edilen bu değer yeniden yapılandırılarak,  $k+1$  anındaki durum kestirimi elde edilmiş olur. Benzer şekilde, eğer normalize inovasyon kareleri değeri eşik değerini aşarsa sistem tur zamanını artırır ve bu tur zamanı değerine uygun ölçüm setini hazırlar. Tur zamanı büyük olduğu için  $k+1+NT$  kestiriminin elde edilmesi daha uzun süre alacaktır. Ancak yüksek tur zamanı ile daha doğru kestirimin elde edilmesi sağlanır. Son olarak algoritma her an için durum dönüşüm matrisi ve yeniden yapılandırıcı matrisini, belirlenen tur zamanına göre günceller. Bunun yapılmasının nedeni farklı tur zamanlarına göre her an için farklı yeniden yapılandırıcılarına ve durum dönüşüm matrislerine ihtiyaç duyulmasıdır.



Şekil 2.13 Adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi algoritması

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Ataletsel Seyrüsefer ve Küresel Konumlandırma Sistemleri Entegrasyon Algoritması

Küresel Konumlandırma ve Ataletsel Seyrüsefer Sistemlerinin tümleşik hata özelliklerine sahip olduğundan daha önce bahsetmiştik. Örnek olarak Ataletsel Seyrüsefer Sistemi kısa süreli uygulamalarda yüksek doğruluğa sahiptir ancak uzun süreli uygulamalarda hatanın sürekli büyümesiyle doğruluk gittikçe bozulur. Buna karşılık, Küresel Konumlandırma Sistemi kısa süreli uygulamalarda yüksek gürültü seviyesine sahiptir ancak uzun süreli uygulamalarda doğruluk istikrarlıdır. Bunlara ek olarak, Küresel Konumlandırma Sistemi, anten ile uydu arasındaki görüş-hattına ( line-of-sight ) ihtiyaç duyduğundan, herhangi bir gölgeleme sorunu doğruluk performansını düşürecektir. Bu nedenle Küresel Konumlandırma Sistemi ve Ataletsel Seyrüsefer Sistemleri bütünleştirilmesi ile her iki seyrüsefer sisteminin yararlarından faydalanılır.

##### 3.1.1 Kalman filtresi İle ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri entegrasyonu

Tek bir eksen için bir INS sistemi, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$\begin{aligned}\delta\dot{P}_E &= \delta V_E \\ \delta\dot{V}_E &= -g\phi_N + B_E \\ \dot{\phi}_N &= \frac{\delta V_E}{R} + \delta\omega_N \\ \dot{B}_E &= -\beta_1 B_E + \sqrt{2\sigma_1^2\beta_1} w_1 \\ \delta\dot{\omega}_N &= -\beta_2 \delta\omega_N + \sqrt{2\sigma_2^2\beta_2} w_2\end{aligned}\tag{3.1}$$

burada,

$$\delta P_E : X-eksenindeki pozisyon hatası [m]$$

$\delta V_E$  : X-eksenindeki hız hatası [m/s]

$\phi_N$  : tavrı hatası [rad]

$B_E$  : ivmeölçer eğilimi [m/s<sup>2</sup>]

$\delta\omega_N$  : jiroskop sürüklenme hızı [rad/s]

$\sigma_1, \beta_1$  : ivme ölçer eğilimini gösteren biçimlendirme filtresi parametreleri [m/s<sup>2</sup> ve s<sup>-1</sup>]

$\sigma_2, \beta_2$  : jiroskop sürüklenme hızını gösteren biçim filtresi parametreleri [m/s<sup>2</sup> ve s<sup>-1</sup>]

$w_1, w_2$  : Beyaz gürültü

Burada, jiroskop sürüklenme hızı ve ivmeölçer eğilimi, her biri için farklı parametreler kullanılarak, birinci dereceden Gauss-Markov süreci kullanan bir biçimlendirme filtresi ile modellenir. Ölçümler, Ataletsel Seyrüsefer Sistemi ve Küresel Konumlandırma Sistemi arasındaki pozisyon farkıdır. Bu pozisyon hatasıdır ve ölçüm hatası olarak düşünülecektir.

$$P_{INS} = P_{True} + \delta P$$

$$P_{GPS} = P_{True} + v$$

$$z_k = P_{INS} - P_{GPS} = \delta P + v_k$$

(3.2)

Model için süreç gürültüsü matrisi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q = \int_0^{\Delta T} \Phi(t, \tau) G E [w w^T] G^T \Phi^T(t, \tau) d\tau$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{p1} \frac{\Delta T^3}{3} & 0 & -S_{p1} \left( 0.5 \Delta T^2 + \frac{\Delta T^3}{3T_1} \right) & 0 \\ 0 & 0 & S_{p2} \frac{\Delta T^3}{3} & 0 & -S_{p2} \left( 0.5 \Delta T^2 + \frac{\Delta T^3}{3T_2} \right) \\ 0 & -S_{p1} \left( 0.5 \Delta T^2 + \frac{\Delta T^3}{3T_1} \right) & 0 & S_{p1} \left( \Delta T + \frac{\Delta T^2}{T_1} + \frac{\Delta T^3}{3T_1^2} \right) & 0 \\ 0 & 0 & -S_{p2} \left( 0.5 \Delta T^2 + \frac{\Delta T^3}{3T_2} \right) & 0 & S_{p2} \left( \Delta T + \frac{\Delta T^2}{T_2} + \frac{\Delta T^3}{3T_2^2} \right) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

burada,

$S_{p1}$  : ivmeölçer eğilimi için giriş gürültüsünün tayf yoğunluğu [ $m^2/s^5$ ]

$S_{p2}$  : jiroskop sürüklenme hızı için giriş gürültüsünün tayf yoğunluğu [ $m^2/s^3$ ]

$T_1$  : ivmeölçer Markov süreci için zaman sabiti [s]

$T_2$  : jiroskop Markov süreci için zaman sabiti [s]

$\Delta T$  : örnekleme aralığı [s]

Eşitlik (3.1)-(3.3), tek eksenli Ataletsel Seyrüsefer Sistemi ve Küresel Konumlandırma Sisteminin bütünleştirilmesi için Kalman filtresinin çekirdeğini oluşturur.

### 3.1.2 Geliştirilmiş dalga kestiricisi ile ataletsel seyrüsefer ve küresel konumlandırma sistemleri entegrasyonu

Geliştirilmiş dalga kestiricisinde, durum değişkenleri iki gruba ayrılır: Kuvvetli ve Zayıf gözlenebilir durumlar. Ataletsel Seyrüsefer Sistemi ve Küresel Konumlandırma Sistemi

pozisyonları arasındaki fark ölçüm olarak kullanıldığından pozisyon hatası, sistem modelinde kuvvetli gözlenebilir durumdur. Hız hatası, ölçümlerin türevinin alınmasıyla elde edildiğinden, pozisyon hatası durumuna göre bir derece daha zayıftır. Tavr ( attitude ) hatası ise hız hatasına göre bir derece daha zayıftır. Sistem modelindeki bu üç durum değişkeni, kuvvetli gözlenebilir durum olarak düşünülebilir.

Daha önce tartışıldığı üzere, Geliştirilmiş Dalga kestiricisi, geleneksel biçim filtresinin yerine, genellikle zayıf gözlenebilir durumlar olan giriş bozulmalarını, deterministik eğimler ya da dalgalar kullanarak modeller. Bu durumda, ivmeölçer eğilimi ve jiroskop sürüklenme hızı, zayıf gözlenebilir durumlar olarak düşünülebilir ve dalga gösterimi kullanılarak modellenilebilir. Örnek olarak, eğimli doğrular olarak gösterimi aşağıda verilmiştir.

$$B_E = C_1 + C_2 t \quad (3.4)$$

Burada,  $e_1 = B_E$   $e_2 = \dot{B}_E$  olsun. Bu durumda,

$$\begin{aligned} e_1(0) &= C_1 = \delta_1 \\ e_2(0) &= C_2 = \delta_2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Benzer şekilde  $e_3 = \delta\omega$  ve  $e_4 = \delta\dot{\omega}$  olsun. Bu durumda,

$$\begin{aligned} e_3(0) &= \delta_3 \\ e_4(0) &= \delta_4 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Bu nedenle aşağıdaki eşitlikleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} X^0 &= [\delta P_E \quad \delta V_E \quad \phi_N]^T \\ e &= [B_E \quad \dot{B}_E \quad \delta\omega \quad \delta\dot{\omega}]^T \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\omega_s} \sin(\omega_s \Delta T) & R[\cos(\omega_s \Delta T) - 1] \\ 0 & \cos(\omega_s \Delta T) & -\frac{g}{\omega_s} \sin(\omega_s \Delta T) \\ 0 & \frac{1}{R\omega_s} \sin(\omega_s \Delta T) & \cos(\omega_s \Delta T) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Burada,  $\omega_s = 1.24 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$  'dir ve Schuler frekansı olarak adlandırılır.

$$L(k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$e_0 = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \delta_3 \quad \delta_4]^T \quad (3.11)$$

Eşitlik (2.36), (2.40) ve (2.41), yinelemeli (recursively) olarak eşitlik (3.7)-(3.11) arasındaki denklemlerin parametrelerinin değiştirilmesinde kullanılır. Böylelikle kuvvetli gözlenebilir durumların kestirimi gerçekleştirilmiş olur (Salychev *et al.* 1999).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Seyrüsefer sistemlerinin modellenmesi kuramsal temeller bölümünde verilen teorik alt yapı ile kurulabilir. Ancak araştırmanın etkinliği ve kolaylık açısından metaryal ve yöntem bölümünde verilen hata modeli üzerinden çalışmalar sürdürülmüştür.

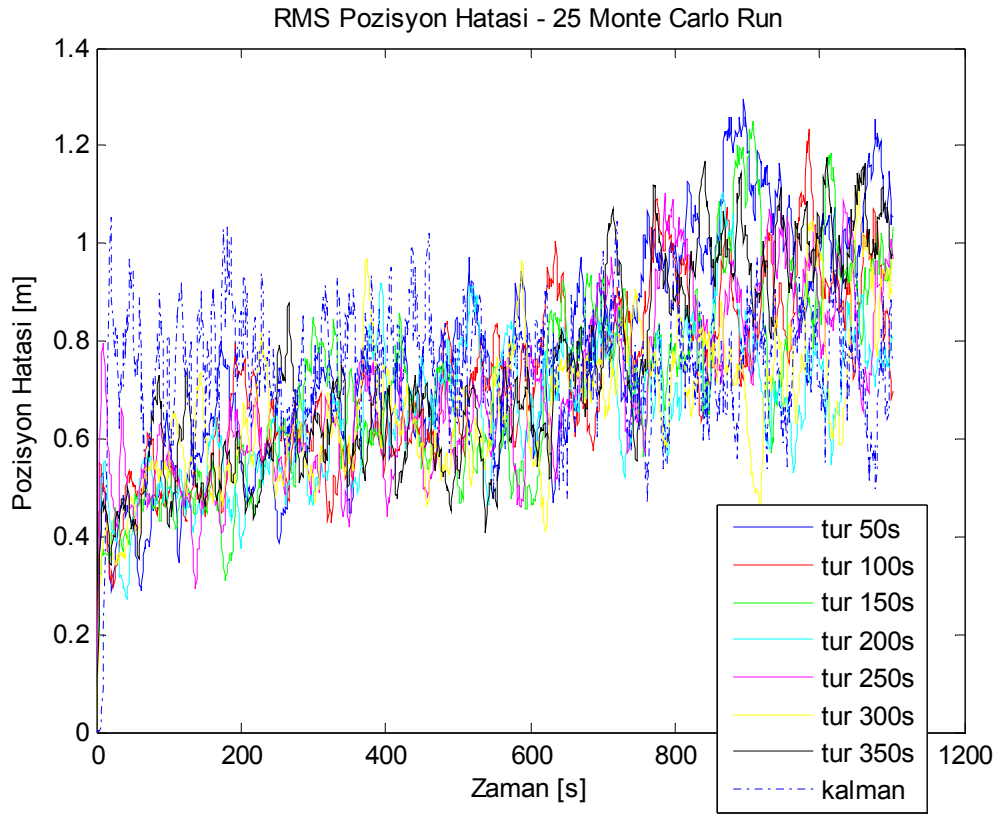
Küresel konumlandırma sistemi hatası sıfır ortalamalı, 10m standart sapmalı normal dağılımlı beyaz gürültü olarak modellenmiştir. Ataletsel seyrüsefer sisteminin ölçüm birimini oluşturan ivmeölçerler ve jiroskoplar için farklı gürültü değerleri seçilmiştir.

Sistem 1500 saniye boyunca bütünleşmiş bir sistemin ürettiği hatayı modellemektedir. Ancak sonuçlar 1100 saniye üzerinden yorumlanacaktır. Bunun nedeni geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanına eşit ölçüde zaman gecikmesine sahip olmasıdır. Eğer geliştirilmiş dalga kestiricisi gerçek zamanlı çalışacak şekilde kurulursa, tur zamanına eşit zaman süresince kestirim üretilmiyordu. 1500 saniyelik verinin 1100 saniyesinin kullanılmasının nedeni, daha gerçekçi bir kıyaslamanın yapılabilmesine olanak sağlayacak olmasıdır. Burada oluşturulan ileri beslemeli bütünleşme modeli ile Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin ayrı ayrı performansları irdelenmektedir. Bununla birlikte yeni yöntem olarak verdiğimiz birleştirilmiş sistem ve adaptif yaklaşımların bu veri üzerindeki performansı da gözlenmiştir.

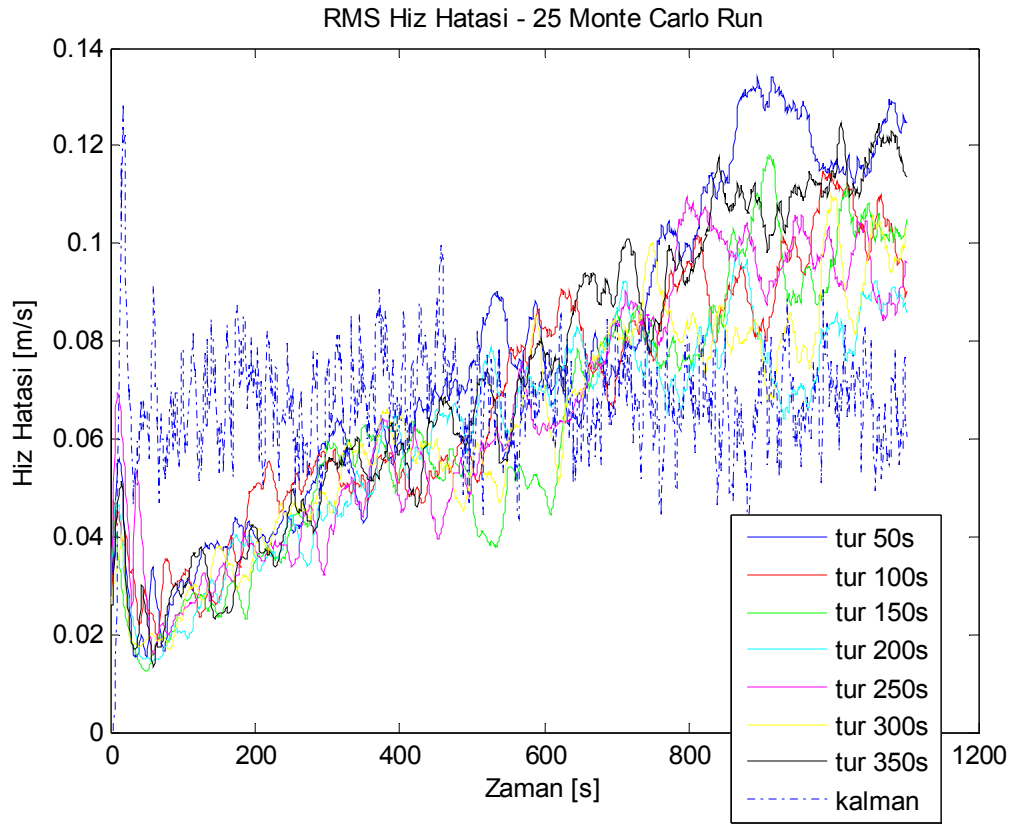
Bu noktada ilk olarak ivmeölçer gürültüsü  $v_i \sim N(0,250000) (\mu g)^2 / Hz$  ve Jiroskop gürültüsü  $v_j \sim N(0,10^{-4}) (deg/s)^2 / Hz$  olan bir sistem göz önünde bulunduralım. Böyle bir sistem, ataletsel ölçüm biriminde düşük kalitede bir jiroskop ve düşük kalitede bir ivmeölçer içermektedir.

Şekil 4.1–4.3’de böyle bir sistemin pozisyon, hız ve açı hata kestirimlerinin, geliştirilmiş dalga kestiricisinin farklı tur zamanları ve Kalman filtresinin hataları görülmektedir. Grafiklerde ilk olarak göze çarpan, geliştirilmiş dalga kestiricisinin hata değerlerinin zamanla artış göstermesidir. Buna karşın Kalman filtresi hata değerleri, belirli bir ölçme aralığı içinde kalmaktadır. Bu durumda eğer ataletsel ölçüm birimi

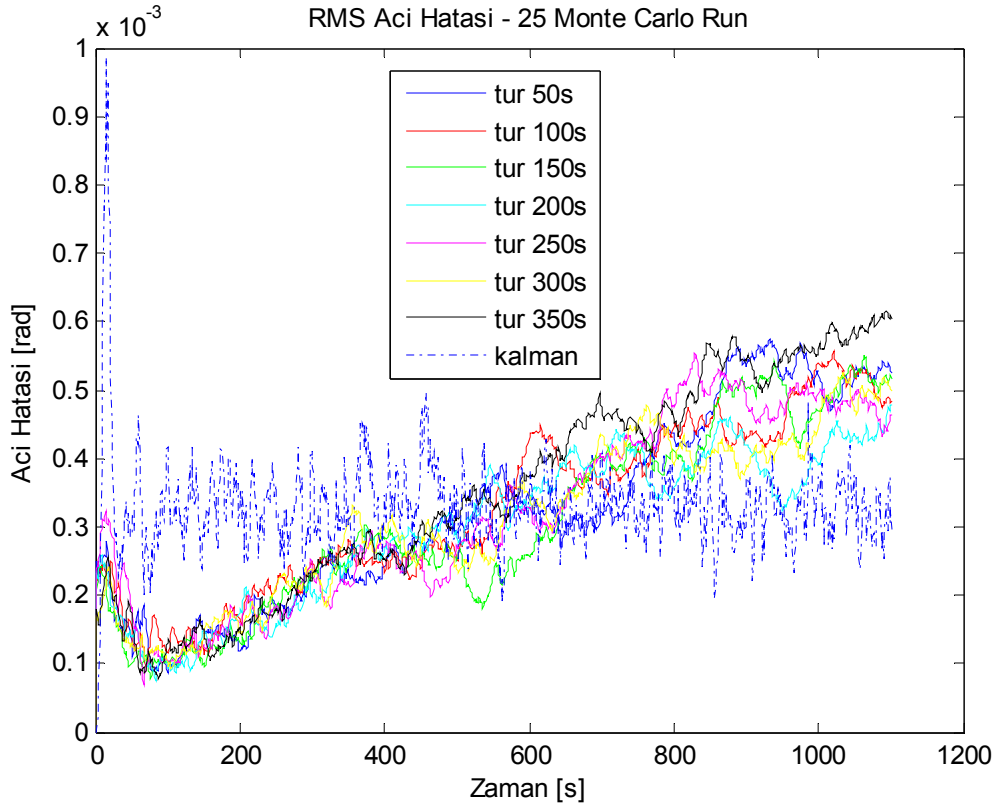
elemanları düşük kalitede ise, geliştirilmiş dalga kestiricisi kestirim hatası, artan bir hata eğilimi göstermektedir. Bunun nedeni, düşük kalitede ölçüm biriminin ürettiği hatanın değişimini, geliştirilmiş dalga kestiricisinin yakalayamıyor olmasıdır. Bunu hedef izleme uygulaması olarak düşünürsek, hata modeli izlediğimiz hedef olduğundan hedefin manevralarına karşı geliştirilmiş dalga kestiricisi yetersiz kalmaktadır. Tur zamanının artması ile geliştirilmiş dalga kestiricisinin performansının iyileştiği görülse de, kestiricinin hatasının zamanla artması sağlıklı kestirimlerin üretilmediğini göstermektedir. Tur zamanının artması geliştirilmiş dalga kestiricisi için aynı zamanda işlem yükünün artması anlamına geldiğinden, kestiricinin düşük kaliteli bir ölçüm biriminde kullanılması mantıklı değildir. Araştırma bulguları sonucunda, geliştirilmiş dalga kestiricisinin zayıf gözlenebilir durumlarda kısa süreli uygulamalar için tercih edilebilir olduğu ortaya çıkmıştır. Özellikle sistem gereksinimlerinin önemsiz olduğu, performansın önem kazandığı kısa süreli uygulamalarda Kalman filtresi yerine tercih edilebilir. Yine de uzun süreli uygulamalarda Kalman filtresi ön plana çıkmaktadır.



Şekil 4.1 Düşük kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS pozisyon hataları



Şekil 4.2 Düşük kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS hız hataları



Şekil 4.3 Düşük kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş galga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS açı hataları

Çizelge 4.3 – Çizelge 4.5’de verilen sistemin ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında ölçüm hatası ile geliştirilmiş dalga kestiricisi, Kalman filtresinin ve birleştirilmiş sistem için sırasıyla RMS pozisyon, hız ve açı hataları verilmiştir. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de ölçüm hatası yer almamaktadır. Bunun nedeni hız ve açı durumlarının gözlenememesidir. Bilindiği gibi küresel konumlandırma sisteminden sadece pozisyon ölçümü elde edilmekteydi. Kalman filtresinin pozisyonda ölçüm hatasına göre %60 iyileştirme yaptığı görülmektedir. Çizelge 4.1’de geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre yaptığı iyileştirme miktarları verilmektedir. Çizelgedeki negatif değerler geliştirilmiş dalga kestiricisinin kalman filtresine göre daha kötü sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Pozitif değerlerde ise geliştirilmiş dalga kestiricisinin kalman filtresinden iyi olduğunu gösterir. Bu bilgiler ışığında çizelgeler incelendiğinde, kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi performans açısından farklı değildir. Geliştirilmiş dalga kestiricisinin yaptığı performans iyileştirmesi miktarı %10

civarlarında kalmaktadır. Geliştirilmiş dalga kestiricisi değerlerinin, 200 saniyelik tur zamanında maksimum iyileştirmeyi yaptığı görülmektedir. Geliştirilmiş dalga kestiricisi geriye doğru yeniden yapılandırmayı tek adımda yaptığı için kestiricinin tur zamanı belirli bir değerdeyken en uygun değere ulaştığı düşünülebilir. Bu değer altında gürültü düzgün olarak modellenemezken bu değerden sonraki tur zamanlarında kestirici hata modelinin yaptığı manevralara karşı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle de 200 saniyelik tur zamanından sonra iyileştirme miktarı azalmaktadır. Bu durumda sistem yükü açısından Kalman filtresine göre dezavantajlı olan geliştirilmiş dalga kestiricisi geri plana düşmektedir. 100 saniye ve daha yüksek tur zamanı ile geliştirilmiş dalga kestiricisi Kalman filtresine göre performans açısından pozisyonda %2.38–10.97 arasında iyileşme sağlamaktadır. Hız söz konusu olduğunda ise performans iyileşmesi 150 saniyelik tur zamanı ve sonrasında gelmektedir. 150 saniyelik tur zamanından sonra performans iyileştirmesi hız için %1.15–8.99 arasındadır. Açıda ise iyileşme 350 saniyelik tur zamanı dışında tüm tur zamanlarında ortaya çıkmakta ve %0.59–9.59 arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi pozisyon, hız ve açı da maksimum iyileştirme 200 saniyelik tur zamanındadır. Bu değerden sonra gelen 350 saniyelik tur zamanındaki performans düşmesi doğaldır.

Çizelge 4.1 Düşük kalitede ölçüm birimi için geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri

Tur Zamanı (saniye)	Pozisyon İyileştirmesi (m)	Hız İyileştirmesi (m/s)	Açı İyileştirmesi (derece)
50	-%3.44	-%13.53	%2.59
100	%3.94	-%1.99	%0.59
150	%6.10	%5.88	%6.96
200	%10.97	%8.99	%9.59
250	%6.70	%2.94	%3.28
300	%8.30	%3.73	%2.80
350	%2.38	-%7.22	-%6.13
400	%5.72	%1.15	%0.69

Bunun yanında yeni önerilen birleştirilmiş sistem her tur zamanı için hem Kalman filtresi hem de geliştirilmiş dalga kestiricisine göre yüksek oranda performans iyileştirilmesi sağlamaktadır. Çizelge 4.2’de birleştirilmiş sistemin, Kalman filtresine ve

geliştirilmiş dalga kestiricisine göre yaptığı performans iyileştirmeleri verilmektedir. Birleştirilmiş sistemin, Kalman filtresine göre pozisyon kestirimi iyileştirmesi %32.19–36.17 değerleri arasında değişmektedir. Hız iyileştirmesi ise %46.74–51.74 arasındadır. Birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisine göre pozisyonda yaptığı iyileştirme %27.49–35.25, hız için ise %46.98–52.85 değerleri arasında değişmektedir. Birleştirilmiş sistemin, kuvvetli gözlenebilir durumlar üzerindeki performans iyileştirmesi göze çarpmaktadır. Ancak bu performans iyileştirmesi, açılış konusu olduğunda gözlenmemiştir. Bunun nedeni, açılış durumunun sistemin zayıf gözlenebilir durumu olmasıdır.

Çizelge 4.2 Düşük kalitede ölçüm birimi için birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri

Tur Zamanı (saniye)	Pozisyon İyileştirmesi (m)		Hız İyileştirmesi (m/s)		Açılış İyileştirmesi (derece)	
	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre
50	%33.03	%35.25	%46.47	%52.85	-%7.29	-%10.15
100	%35.32	%32.67	%49.52	%50.50	-%9.31	-%9.95
150	%37.63	%33.58	%50.90	%47.83	-%1.30	-%8.87
200	%35.42	%27.49	%51.74	%46.98	-%0.13	-%10.75
250	%36.17	%31.59	%51.04	%49.56	-%7.48	-%11.13
300	%34.97	%29.09	%51.17	%49.28	-%6.50	-%9.57
350	%32.19	%30.53	%48.53	%52.00	-%16.45	-%9.73
400	%34.00	%29.99	%49.94	%49.35	-%9.14	-%9.90

Kalman filtresine göre geliştirilmiş dalga kestiricisi, pozisyon, hız ve açılış performanslarını yaklaşık %2–10 mertebesinde iyileştirdiği için uygulamada geliştirilmiş dalga kestiricisinin kullanılması düşük kalitede ölçüm birimi bulunan bir seyrüsefer sistemi için pek de mantıklı görülmemektedir. Bunun nedeni geliştirilmiş dalga kestiricisinin yüksek işlem yükü gereksinimidir. Yine de performansın hayati önem kazandığı uygulamalar için, özellikle sistem gereksinimleri elverişli ise, geliştirilmiş dalga kestiricisi tercih edilebilir. Ancak böyle bir durumda, geliştirilmiş dalga kestiricisi yerine birleştirilmiş sistemin kullanılması daha mantıklı olacaktır. Bunun nedeni, birleştirilmiş sistemin işlem yükünün geliştirilmiş dalga kestiricisine çok

yakın olmasının yanı sıra performansının da çok daha iyi olmasıdır. Açık kestirimlerinin önem kazandığı uygulamalar da ise Kalman filtresi ya da geliştirilmiş dalga kestiricisinin kullanılması daha avantajlı olacaktır.

Çizelge 4.3 Düşük kalitede ölçüm birimi için RMS pozisyon hatası (m)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	1.9694	0,74626	0,77193	0,49979
100	1.9694	0,74805	0,71861	0,48385
150	1.9694	0,74739	0,70179	0,46612
200	1.9694	0,73985	0,65867	0,47781
250	1.9694	0,74839	0,69826	0,47767
300	1.9694	0,72752	0,66716	0,47309
350	1.9694	0,74923	0,7314	0,50809
400	1.9694	0,73395	0,69195	0,48442

Çizelge 4.4 Düşük kalitede ölçüm birimi için RMS hız hatası (m/sn)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	Gözlenemez	0,067295	0,0764	0,036025
100	Gözlenemez	0,066889	0,068217	0,033768
150	Gözlenemez	0,066932	0,062997	0,032864
200	Gözlenemez	0,067042	0,061016	0,032353
250	Gözlenemez	0,067389	0,065405	0,032991
300	Gözlenemez	0,065161	0,062732	0,031816
350	Gözlenemez	0,06742	0,072287	0,034701
400	Gözlenemez	0,065489	0,064736	0,032787

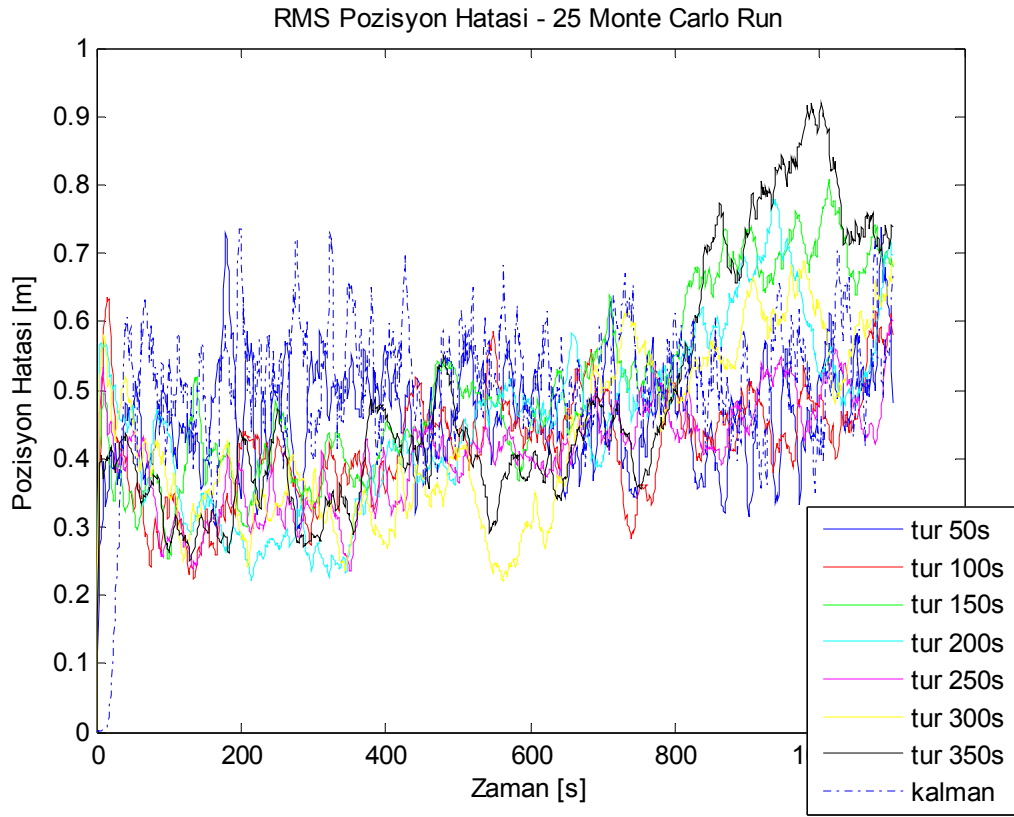
Çizelge 4.5 Düşük kalitede ölçüm birimi için RMS açı hatası (derece)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	Gözlenemez	0,018975	0,018483	0,020359
100	Gözlenemez	0,018774	0,018664	0,020521
150	Gözlenemez	0,018904	0,017589	0,01915
200	Gözlenemez	0,019042	0,017216	0,019066
250	Gözlenemez	0,018967	0,018344	0,020386
300	Gözlenemez	0,018268	0,017756	0,019456
350	Gözlenemez	0,019016	0,020181	0,022144
400	Gözlenemez	0,018438	0,01831	0,020123

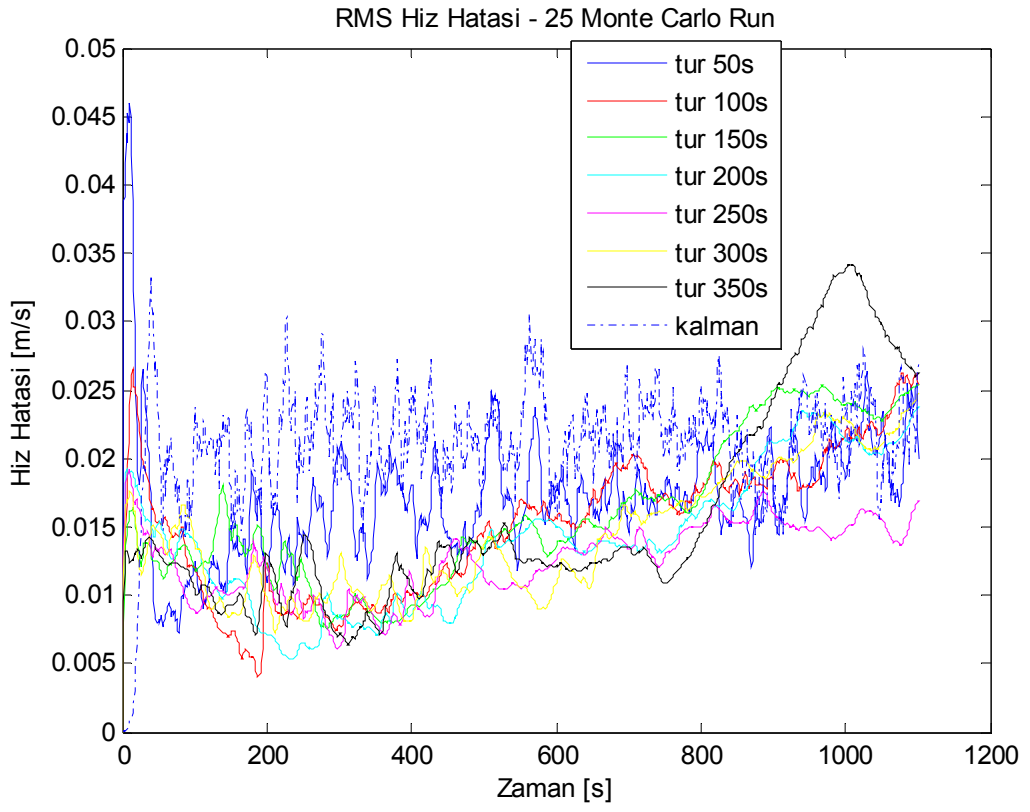
İkinci olarak ivmeölçer gürültüsü  $v_i \sim N(0,2500) (\mu g)^2/Hz$  ve Jiroskop gürültüsü  $v_j \sim N(0,10^{-6}) (\text{deg/s})^2/Hz$  olan bir sistem göz önünde bulunduralım. Böyle bir sistemin ataletsel ölçüm biriminde orta kalitede bir jiroskop ve orta kalitede bir ivmeölçer var diyebiliriz.

Şekil 4.4–4.6’de böyle bir sistemin pozisyon, hız ve açı hata kestirimlerinin, geliştirilmiş dalga kestiricisinin farklı tur zamanları ve Kalman filtresinin hataları görülmektedir. Şekillerde ilk göze çarpan geliştirilmiş dalga kestiricisinin, ıraksayan ölçme aralığından, açı kestirimleri için kurtulmuş olmasıdır. Yine de pozisyon ve hız kestirim hataları zamanla artan özelliktedir. Ancak düşük kaliteli ölçüm birimi barındıran seyrüsefer sistemlerindeki artış eğilimine göre bu artış daha azdır. Bunun nedeni, ölçüm biriminin iyileşmesi ile hata modelinin manevra miktarının azalmasıdır. Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi karşılaştırıldığında performans açısından geliştirilmiş dalga kestiricisinin, özellikle kısa süreli uygulamalarda daha iyi olduğu söylenebilir. Geliştirilmiş dalga kestiricisi için tur zamanı arttığında pozisyon, hız ve açı performansları artmaktadır. Ancak bu kısa süreli uygulamalar için doğrudur. Çünkü tur zamanı yüksek sistemler için zamanla hata büyük sıçramalar yapmaktadır.

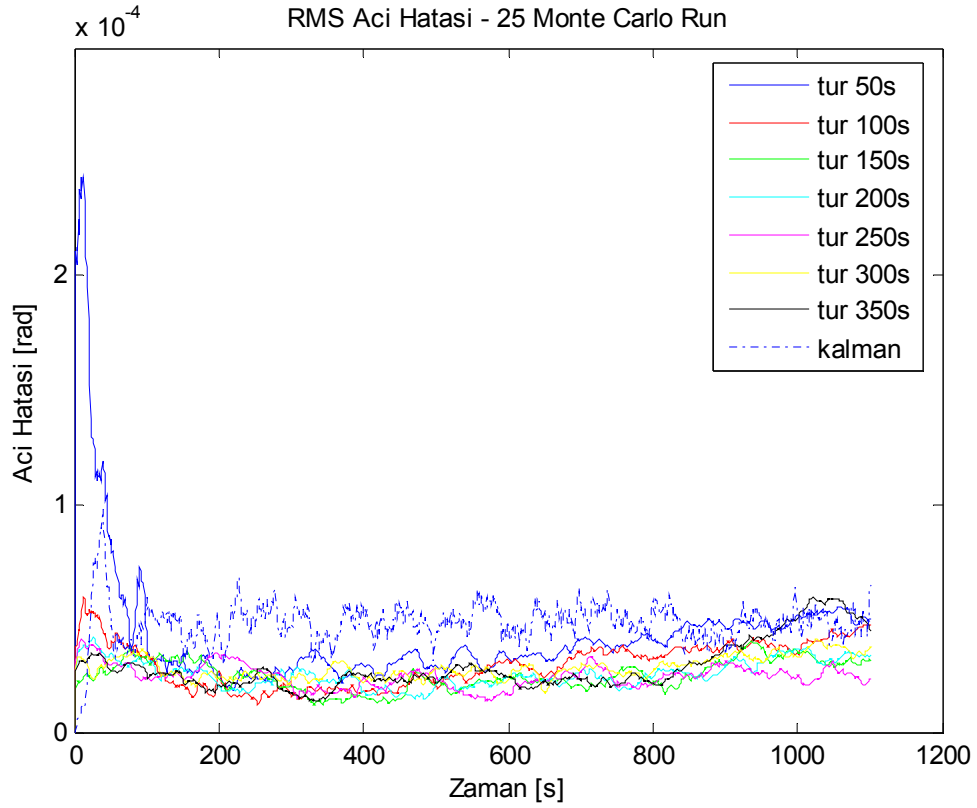
Çizelge 4.8 – Çizelge 4.10’de verilen sistemin ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında ölçüm hatası ile geliştirilmiş dalga kestiricisi, Kalman filtresi ve birleştirilmiş sistem için sırasıyla RMS pozisyon, hız ve açı hataları verilmiştir. Kalman filtresinin ölçüm hatasındaki iyileştirmesi yaklaşık %75 civarındadır. Çizelge 4.6’da geliştirilmiş dalga kestiricisinin Kalman filtresine göre yaptığı performans iyileştirmeleri görülmektedir. Bu çizelgede görüldüğü gibi geliştirilmiş dalga kestiricisi, Kalman filtresine göre performans açısından daha iyidir. Tüm tur zamanlarında, pozisyon için %0.39–17.44, hız için %18.58–39.44 ve açı için %10.82–48.61 oranlarında değişen performans iyileştirmeleri elde edilmiştir. Ancak performans iyileştirmesinin en iyi olduğu tur zamanı 250 saniyedir. En yüksek iyileştirme miktarının, düşük kaliteli ölçüm birimine göre daha yüksek tur zamanında olması dikkat çekicidir. Ölçüm birimi kalitesi iyileşmesinden kaynaklanan manevra azalması bu sonucu doğurmuştur.



Şekil 4.4 Orta kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS pozisyon hataları



Şekil 4.5 Orta kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS hız hataları



Şekil 4.6 Orta kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS açı hataları

Bunun yanında yeni önerilen birleştirilmiş sistem her tur zamanı için hem Kalman filtresi hem de geliştirilmiş dalga kestiricisine göre pozisyon ve hız değerlerinde yüksek oranda performans iyileştirilmesi sağlamaktadır. Bu pozisyonda Kalman filtresi için %29.14-35.43 değerleri arasında, geliştirilmiş dalga kestiricisi için ise %14.92-29.34 değerleri arasında değişmektedir. Hız değerlerinde ise Kalman filtresi için %32.07-46,36 arasında, geliştirilmiş dalga kestiricisi için ise %5.42–34.13 arasında değişmektedir. Ancak açı göz önünde bulundurulduğunda birleştirilmiş sistem, Kalman filtresi göre yaklaşık %40'lara varan iyileştirme sağlarken, geliştirilmiş dalga kestiricisine göre yaklaşık %25 daha kötü performans verir. Birleştirilmiş sistemin, pozisyon, hız ve açı değerleri için Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisine göre performans iyileştirmeleri Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.6 Orta kalitede ölçüm birimi için geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri

Tur Zamanı	Pozisyon İyileştirmesi (m)	Hız İyileştirmesi (m/s)	Açı İyileştirmesi (derece)
50 sn	%8.52	%18.58	%10.82
100 sn	%17.44	%27.99	%37.51
150 sn	%0.39	%23.53	%47.65
200 sn	%11.18	%33.59	%47.20
250 sn	%18.55	%39.44	%48.61
300 sn	%15.18	%31.82	%41.61
350 sn	%3.87	%24.73	%39.27
400 sn	%5.06	%25.38	%39.16

Çizelge 4.7 Orta kalitede ölçüm birimi için birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri

Tur Zamanı	Pozisyon İyileştirmesi (m)		Hız İyileştirmesi (m/s)		Açı İyileştirmesi (derece)	
	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre
50 sn	%29.46	%22.89	%46.36	%34.13	%15.20	%4.91
100 sn	%29.76	%14.92	%41.44	%18.68	%24.44	-%20.91
150 sn	%29.14	%28.87	%32.07	%11.17	%34.43	-%25.24
200 sn	%34.08	%25.78	%39.55	%8.97	%34.87	-%23.36
250 sn	%35.43	%20.73	%42.72	%5.42	%38.15	-%20.36
300 sn	%32.48	%20.39	%40.10	%12.15	%27.50	-%24.16
350 sn	%32.08	%29.34	%38.24	%17.95	%8.33	-%50.94
400 sn	%31.84	%28.21	%39.47	%18.88	%25.52	-%22.41

Sonuçlardan da görüldüğü üzere orta kalitede ölçüm birimi kullanan seyrüsefer sistemleri için, geliştirilmiş dalga kestiricisi, pozisyon, hız ve açı kestirimi performansı açısından çok daha iyidir. Özellikle zayıf gözlenebilir durumlar için performans iyileştirmesi çok iyidir. Yeni yöntem olarak önerilen birleştirilmiş sistem göz önünde bulundurulduğunda ise sistem sadece açı kestirimleri için geliştirilmiş dalga kestiricisinden kötüdür. Bu durumda pozisyon ve hız durumlarının kestiriminin ön plana çıktığı uygulamalar için birleştirilmiş sistem düşünülebilir. Bunun nedeni yüksek performans iyileştirmesidir. Ancak, sistem gereksinimleri, birleştirilmiş sistem için, geliştirilmiş dalga kestiricisine yakındır. Bu durumda sistem kısıtlamaları, geliştirilmiş

dalga kestiricisi ya da birleştirilmiş sistemin kullanılmasına izin vermiyorsa Kalman filtresi en iyi çözüm olacaktır. Son zamanlarda, bilgisayar sistemlerindeki gelişmeler, hem geliştirilmiş dalga kestiricisi hem de birleştirilmiş sistemin kullanımına olanak sağlayacak seviyeye gelmiştir. Özellikle, savunma sanayi gibi performansın hayati önem taşıdığı uygulama alanlarında kullanılması önerilebilir.

Çizelge 4.8 Orta kalitede ölçüm birimi için RMS pozisyon hatası (m)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	1.9794	0,50875	0,46539	0,35888
100	1.9794	0,508	0,41942	0,35684
150	1.9794	0,50714	0,50516	0,35934
200	1.9794	0,51075	0,45363	0,33669
250	1.9794	0,49977	0,40706	0,32269
300	1.9794	0,51103	0,43344	0,34504
350	1.9794	0,50246	0,48299	0,34129
400	1.9794	0,50879	0,48304	0,34678

Çizelge 4.9 Orta kalitede ölçüm birimi için RMS hız hatası (m/s)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	Gözlenemez	0,021042	0,017133	0,011286
100	Gözlenemez	0,020902	0,015052	0,01224
150	Gözlenemez	0,020814	0,015916	0,014138
200	Gözlenemez	0,021179	0,014064	0,012802
250	Gözlenemez	0,020761	0,012572	0,011891
300	Gözlenemez	0,021096	0,014383	0,012636
350	Gözlenemez	0,020712	0,01559	0,012792
400	Gözlenemez	0,02096	0,01564	0,012687

Çizelge 4.10 Orta kalitede ölçüm birimi için RMS açı hatası (derece)

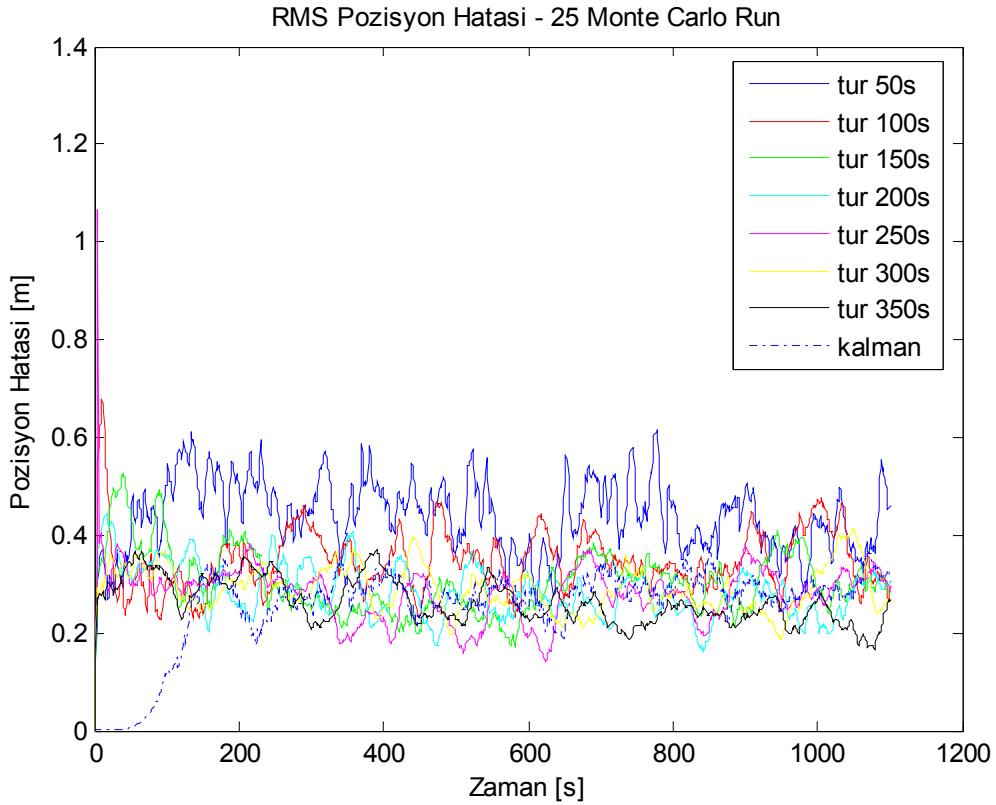
Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	Gözlenemez	0,0027322	0,0024367	0,002317
100	Gözlenemez	0,0027033	0,0016893	0,0020426
150	Gözlenemez	0,0027201	0,0014241	0,0017836
200	Gözlenemez	0,0027658	0,0014604	0,0018015
250	Gözlenemez	0,0027244	0,0014	0,001685
300	Gözlenemez	0,0027678	0,0016161	0,0020066
350	Gözlenemez	0,002686	0,0016312	0,0024622
400	Gözlenemez	0,0027147	0,0016517	0,0020219

Üçüncü olarak ivmeölçer gürültüsü  $v_i \sim N(0,25) (\mu g)^2 / Hz$  ve Jiroskop gürültüsü  $v_j \sim N(0,10^{-9}) (deg/s)^2 / Hz$  olan bir sistem göz önünde bulunduralım. Böyle bir sistemin ataletsel ölçüm biriminde yüksek kalitede bir jiroskop ve yüksek kalitede bir ivmeölçer var diyebiliriz.

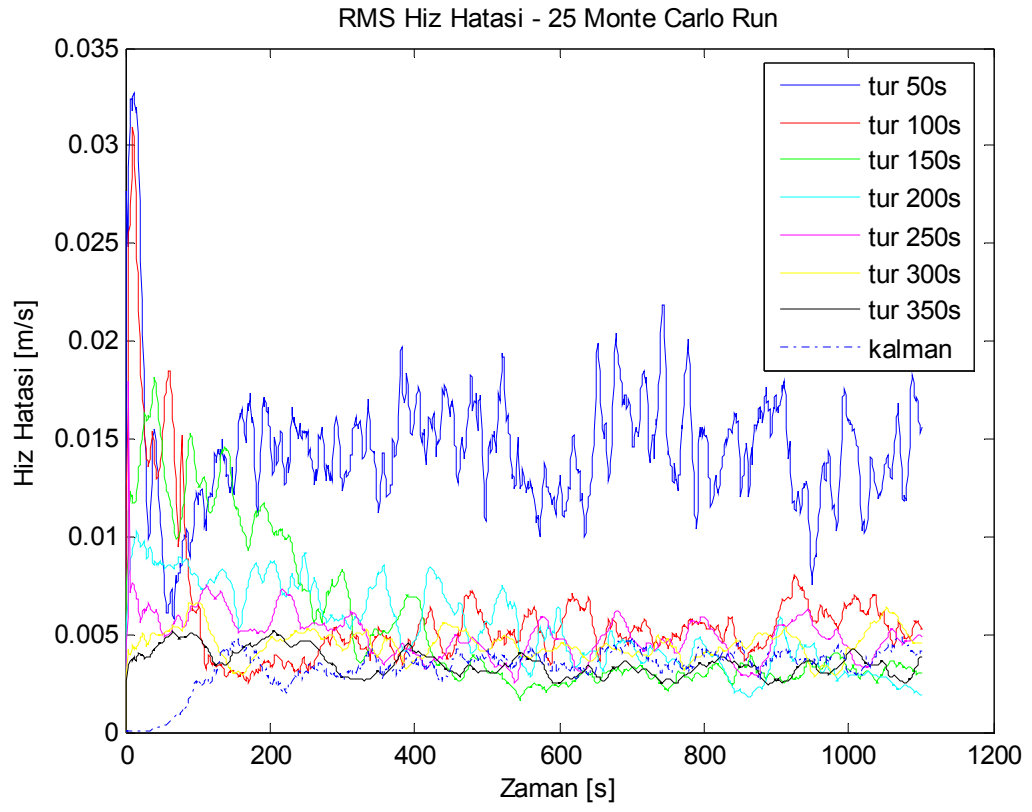
Şekil 4.7–4.9’de böyle bir sistemin pozisyon hata kestirimlerinin, geliştirilmiş dalga kestiricisinin farklı tur zamanları ve Kalman filtresinin hataları görülmektedir. Şekillerde ilk göze çarpan, düşük ve orta kalitede ölçüm birimi kullanan seyrüsefer sistemleri için kullanılan geliştirilmiş dalga kestiricisinin kestirimlerinin aksine, yüksek kalitede ölçüm birimi kullanan seyrüsefer sistemlerinde kullanılan geliştirilmiş dalga kestiricisi kestirimlerinin iraksamadığıdır. Bunun nedeni ölçüm biriminin kalitesinin yüksek olması dolayısıyla manevra miktarının az olmasıdır. Bu da sistemdeki gürültü miktarı arttıkça geliştirilmiş dalga kestiricisinin kestirimlerinin bozulduğu, manevraları izleyemediği ve filtrenin iraksama eğilimi gösterdiği anlamına gelir. Bunun temelinde, geriye doğru yeniden yapılandırma sisteminin yapısı yatmaktadır.

Çizelge 4.13–Çizelge 4.15’de verilen sistemin ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında ölçüm hataları ile geliştirilmiş dalga kestiricisi, Kalman filtresi ve birleştirilmiş sistem için sırasıyla RMS pozisyon, hız ve açı hataları verilmiştir. Kalman filtresinin ölçüm hatasına göre yaptığı iyileştirme yaklaşık olarak %85 civarındadır. Fark edileceği üzere ölçüm birimi kalitesi arttıkça Kalman filtresinin ürettiği kestirimler iyileşmektedir. Çizelge 4.11’de görüldüğü gibi geliştirilmiş dalga kestiricisi, Kalman filtresine göre

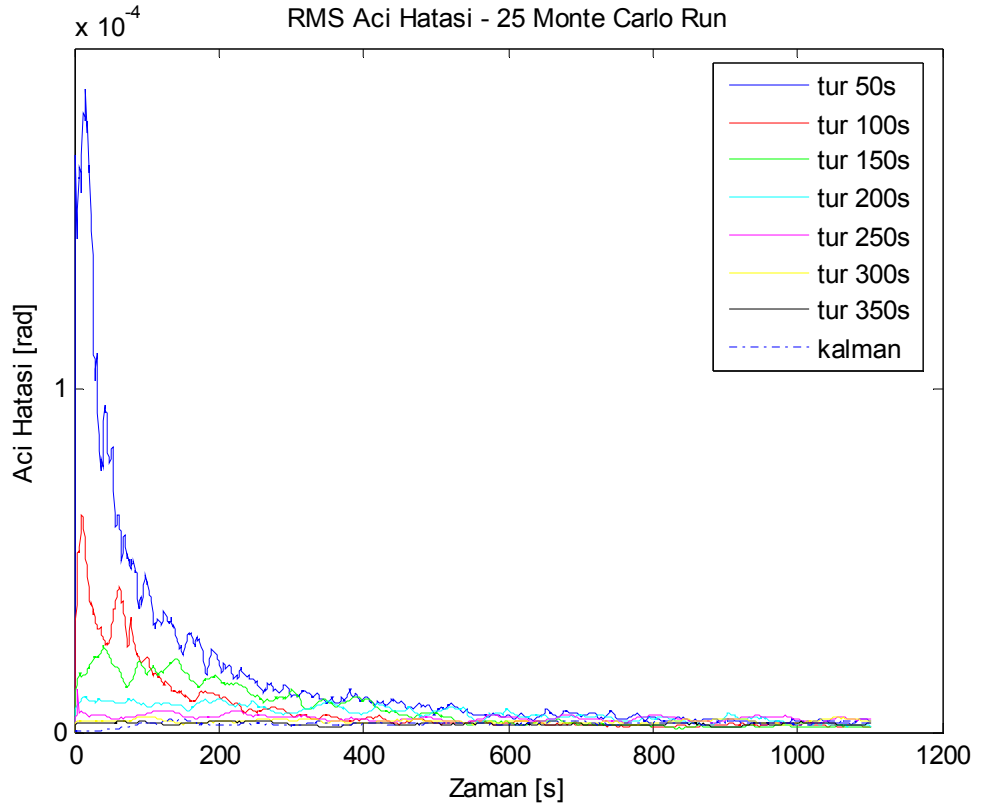
performans açısından daha kötüdür. Ancak tur zamanı arttıkça geliştirilmiş dalga kestiricisinin pozisyon performansı Kalman filtresinin performansına yaklaşmaktadır. Geliştirilmiş dalga kestiricisi hız kestirimlerinin performansı, 400 saniyelik tur zamanı ile birlikte Kalman filtresinin performansını geçmekte ve yaklaşık %5 seviyesinde iyileştirme sağlamaktadır. Geliştirilmiş dalga kestiricisi için açı kestirimleri performansı göz önünde bulundurulduğunda ise 350 saniyelik tur zamanı ve üstü için iyileştirme sağlanmaktadır. 350 saniyelik tur zamanında açı kestirimi için performans iyileştirmesi yaklaşık %3 iken 400 saniyelik tur zamanında bu değer %19'a çıkmaktadır. Bu da göstermektedir ki yüksek kalitede ölçüm birimi kullanılan uygulamalar için Kalman filtresi daha uygun bir seçim olacaktır.



Şekil 4.7 Yüksek kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS pozisyon hataları



Şekil 4.8 Yüksek kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS hız hataları



Şekil 4.9 Yüksek kalitede ölçüm birimi için farklı tur zamanlarında geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresinin sırasıyla RMS açı hataları

Çizelge 4.11 Yüksek kalitede ölçüm birimi için geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri

Tur Zamanı	Pozisyon İyileştirmesi (m)	Hız İyileştirmesi (m/s)	Açı İyileştirmesi (derece)
50 sn	-%70.97	-%333.73	-%551.99
100 sn	-%30.31	-%75.28	-%176.57
150 sn	-%17.51	-%66.06	-%83.70
200 sn	-%13.18	-%65.56	-%32.08
250 sn	-%9.11	-%47.36	-%69.37
300 sn	-%10.21	-%34.40	-%29.37
350 sn	-%2.55	-%7.18	%2.84
400 sn	-%2.25	%4.63	%18.66

Çizelge 4.12 Yüksek kalitede ölçüm birimi için birleştirilmiş sistemin, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve Kalman filtresine göre performans iyileştirmeleri

Tur Zamanı	Pozisyon İyileştirmesi (m)		Hız İyileştirmesi (m/s)		Açı İyileştirmesi (derece)	
	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre	Kalman Filtresine Göre	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisine Göre
50 sn	%2.09	%42.73	%17.22	%80.91	%22.27	%88.08
100 sn	%12.93	%33.18	%24.01	%56.65	%19.22	%70.79
150 sn	%10.29	%23.66	%17.35	%50.23	-52.95	%63.71
200 sn	%9.64	%20.16	%16.40	%49.50	-%29.12	%44.37
250 sn	%11.69	%19.06	%16.00	%42.99	-%99.15	-%17.59
300 sn	%16.20	%23.97	%30.30	%48.14	-%21.30	%6.24
350 sn	%18.97	%20.98	%31.75	%36.32	-%15.27	-%18.63
400 sn	%22.16	%23.88	%33.87	%30.66	-%3.32	-%27.02

Yeni yöntem olarak önerilen birleştirilmiş sistem göz önünde bulundurulduğunda ise sistem, sadece açı kestirimleri için, Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinden kötüdür. Bu durumda pozisyon ve hız durumlarının kestiriminin ön plana çıktığı uygulamalar için birleştirilmiş sistem düşünülebilir. Bunun nedeni yüksek performans iyileştirmesidir. Ancak sistem gereksinimleri, birleştirilmiş sistem için, geliştirilmiş dalga kestiricisine yakındır. Bu durumda sistem kısıtlamaları, geliştirilmiş dalga kestiricisi ya da birleştirilmiş sistemin kullanılmasına izin vermiyorsa Kalman filtresi en iyi çözüm olacaktır. Son zamanlarda, bilgisayar sistemlerindeki gelişmeler, hem geliştirilmiş dalga kestiricisi hem de birleştirilmiş sistemin kullanımına olanak sağlayacak seviyeye gelmiştir. Özellikle, savunma sanayi gibi performansın hayati önem taşıdığı uygulama alanlarında kullanılması önerilebilir. Bunun yanında birleştirilmiş sistem her tur zamanı için hem Kalman filtresi hem de geliştirilmiş dalga kestiricisine göre, pozisyon ve hız değerlerinde yüksek oranda performans iyileştirilmesi sağlamaktadır. Bu pozisyonda Kalman filtresi için yaklaşık %15, geliştirilmiş dalga kestiricisi için yaklaşık %25 civarlarındadır. Hız değerlerinde ise Kalman filtresi için yaklaşık %16–30, geliştirilmiş dalga kestiricisi için %30–80 civarındadır. Ancak açı göz önünde bulundurulduğunda birleştirilmiş sistem, Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %20 daha kötü performans verir. Birleştirilmiş sistemin, pozisyon, hız ve açı değerleri için performans iyileştirmeleri Çizelge 4.12’de verilmektedir.

Çizelge 4.13 Yüksek kalitede ölçüm birimi için RMS pozisyon hatası (m)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	1.9835	0,25692	0,43925	0,25154
100	1.9835	0,26673	0,34757	0,23223
150	1.9835	0,25887	0,30419	0,23222
200	1.9835	0,25279	0,28612	0,22843
250	1.9835	0,2586	0,28216	0,22838
300	1.9835	0,26381	0,29075	0,22106
350	1.9835	0,25667	0,26322	0,20799
400	1.9835	0,27503	0,28123	0,21407

Çizelge 4.14 Yüksek kalitede ölçüm birimi için RMS hız hatası (m/s)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	Gözlenemez	0,0033348	0,014464	0,0027606
100	Gözlenemez	0,0033777	0,0059204	0,0025667
150	Gözlenemez	0,0033024	0,005484	0,0027294
200	Gözlenemez	0,003213	0,0053193	0,0026862
250	Gözlenemez	0,0033284	0,0049048	0,002796
300	Gözlenemez	0,0033456	0,0044966	0,002332
350	Gözlenemez	0,0032782	0,0035137	0,0022374
400	Gözlenemez	0,0035607	0,0033959	0,0023547

Çizelge 4.15 Yüksek kalitede ölçüm birimi için RMS açı hatası (derece)

Tur Zamanı (saniye)	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi	Birleştirilmiş Sistem
50	Gözlenemez	0,00014013	0,00091364	0,00010892
100	Gözlenemez	0,00014029	0,000388	0,00011332
150	Gözlenemez	0,00013796	0,00039139	0,00014203
200	Gözlenemez	0,00013635	0,00031644	0,00017605
250	Gözlenemez	0,00013946	0,0002362	0,00027774
300	Gözlenemez	0,00013797	0,00017849	0,00016736
350	Gözlenemez	0,00013887	0,00013493	0,00016007
400	Gözlenemez	0,00014558	0,00011841	0,00015041

Sistem performansı kadar önemli olan bir diğer parametre de çalışma zamanıdır. Daha önce de bahsedildiği üzere, çalışma zamanı ya da işlem yükü, uygulamalarda kullanılacak kestirici seçiminde etkin bir ölçüttür. Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga

kestiricisi göz önünde bulundurulduğunda karşımıza büyük bir fark çıkmaktadır. Örnek olarak Kalman filtresinin bir adımda yaptığı işi geliştirilmiş dalga kestiricisi tur zamanına eşit adımda yapmaktadır. Bu da geliştirilmiş dalga kestiricisi için sisteme büyük bir yük bindirmektedir. Kalman Filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi için işlem yükü miktarları Çizelge 4.16’da verilmiştir. Yine Çizelge 4.17’de Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin 1100 saniyelik seyrüsefer verisi üzerinde ortalama çalışma süreleri verilmiştir.

Çizelge 4.16 Tur zamanlarına göre Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin kayan nokta işlem sayıları (Floating-Point Operations - Flops)

Tur Zamanı[sn]	Kalman[flops]	G.D.K.[flops]	Katı
50	1.964.812	128.261.377	65.28
100	1.964.812	246.828.679	125.62
150	1.964.812	356.611.047	181.50
200	1.964.812	457.608.375	232.90
250	1.964.812	549.820.294	279.83
300	1.964.812	633.247.398	322.29
350	1.964.812	707.889.577	360.28
400	1.964.812	773.746.957	393.80

Çizelge 4.17 Tur zamanlarına göre Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin çalışma süreleri

Tur Zamanı[sn]	Kalman (sn)	G. D. K. (sn)	Katı
50	0.099821	5.1058	51.1496
100	0.10373	10.0607	96.9893
150	0.10682	15.0151	140.5645
200	0.11645	20.1372	172.9257
250	0.12749	25.4436	199.5733
300	0.15374	33.5356	218.1319
350	0.15433	38.4445	249.1058
400	0.15729	43.8652	278.8810

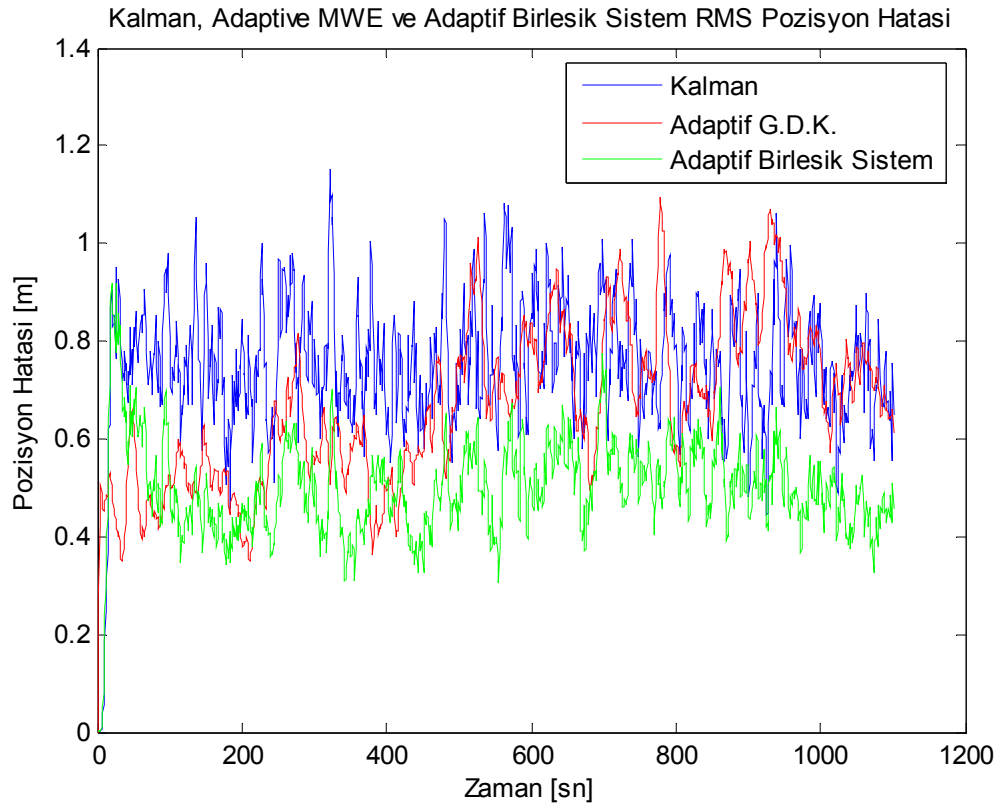
Çizelge 4.16-17’den görüleceği üzere geliştirilmiş dalga kestiricisinin işlem yükü, Kalman filtresine oranla çok fazladır. Geliştirilmiş dalga kestiricisi için tur zamanı arttıkça işlem yükü de doğrusal olarak artmaktadır. Eğer sistem özellikleri bu yükü kaldıracak seviyede değilse geliştirilmiş dalga kestiricisi uygun bir seçim olmayacaktır. Ancak doğruluğun ön planda olduğu uygulamalarda, özellikle sistem için

kısıtlamalar söz konusu değilse geliştirilmiş dalga kestiricisi ya da birleştirilmiş sistem kullanılması uygun olacaktır.

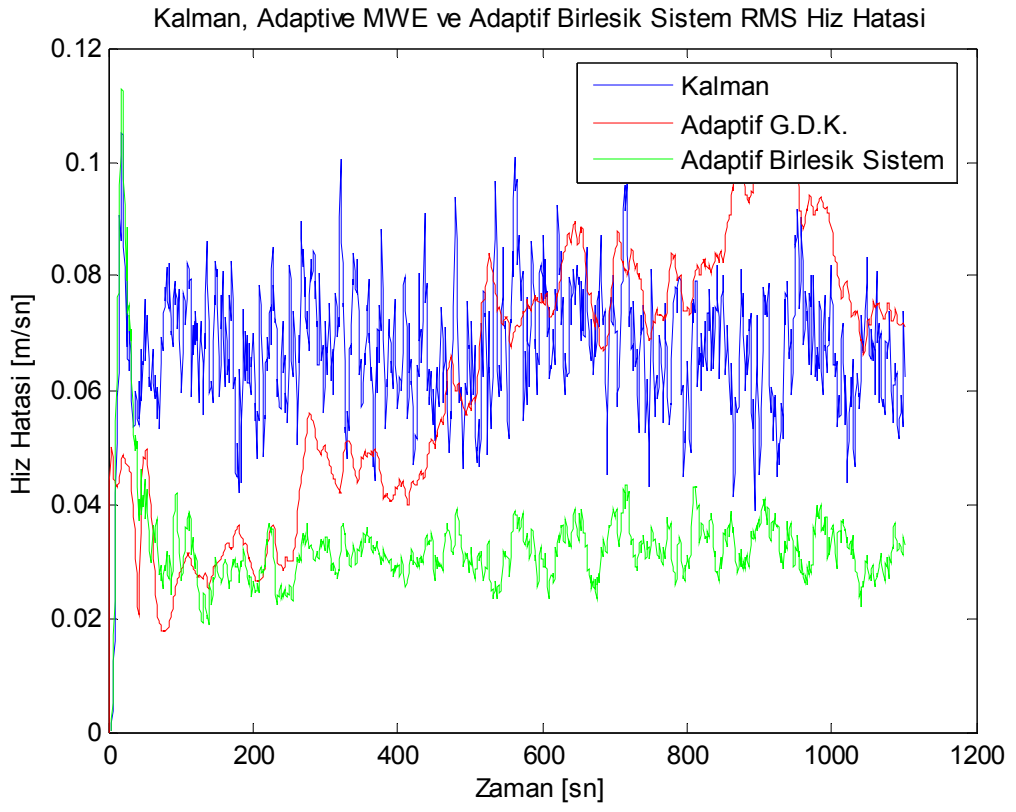
Bu değerlendirmede birleştirilmiş sistem göz önünde bulundurulmamıştır. Bunun sebebi birleştirilmiş sistemin Geliştirilmiş Dalga Kestiricisinden daha kısa çalışma zamanına sahip olamayacağı gerçeğidir. Bu durumda, Geliştirilmiş Dalga Kestiricisi için geçerli olan sistem gereksinimlerinden daha fazlası birleştirilmiş sistem için geçerlidir.

İkinci yeni yöntem olarak önerilen adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi için iki tur zamanı arasında tandem olarak çalışan bir yapı kurulmuştur. Seyrüsefer sisteminin ürettiği kovaryansa göre normalize inovasyon kareleri değeri belirli bir eşik değeri aralığında bulunduğu küçük tur zamanı ile çalışan (150 saniye) geliştirilmiş dalga kestiricisi, normalize inovasyon kareleri değeri eşik değerini aştığında yüksek tur zamanı (300 saniye) ile çalışmaktadır. Bu eşik değeri,  $0.5 \leq NIS \leq 1.5$  'dir. Şekil 4.10–4.12'da bu şekilde çalışan bir adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin, düşük kaliteli bir ölçüm birimi için RMS pozisyon, hız ve açı kestirim hataları görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere geliştirilmiş dalga kestiricisinin düşük kaliteli ölçüm birimi için ortaya koyduğu zamanla artan hata eğilimi adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ile ortadan kaldırılmıştır. Şekil 4.13–4.15'da orta kaliteli bir ölçüm birimi için RMS pozisyon, hız ve açı kestirim hataları görülmektedir. Yine adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi artan hata eğiliminin önüne geçtiği grafiklerden görülmektedir. Şekil 4.16–4.18'de yüksek kaliteli bir ölçüm birimi için RMS pozisyon, hız ve açı kestirim hataları görülmektedir. Diğer iki grafik setinden farklı olarak, yüksek kalitede ölçüm birimi için adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi Kalman filtresine oranla daha kötü kestirimler üretmektedir.

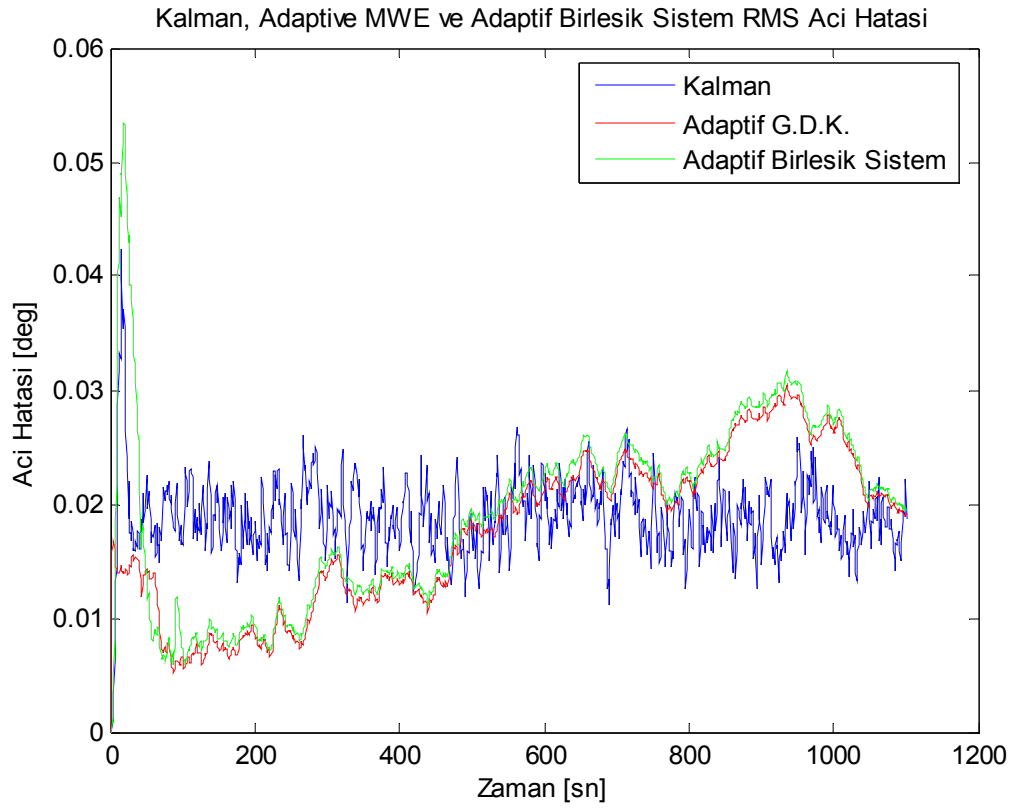
Şekil 4.10-4.18'de, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin yanında adaptif birleştirilmiş sistem sonuçları da verilmektedir. Adaptif birleştirilmiş sistem, Kalman filtresi ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin kestirimlerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur.



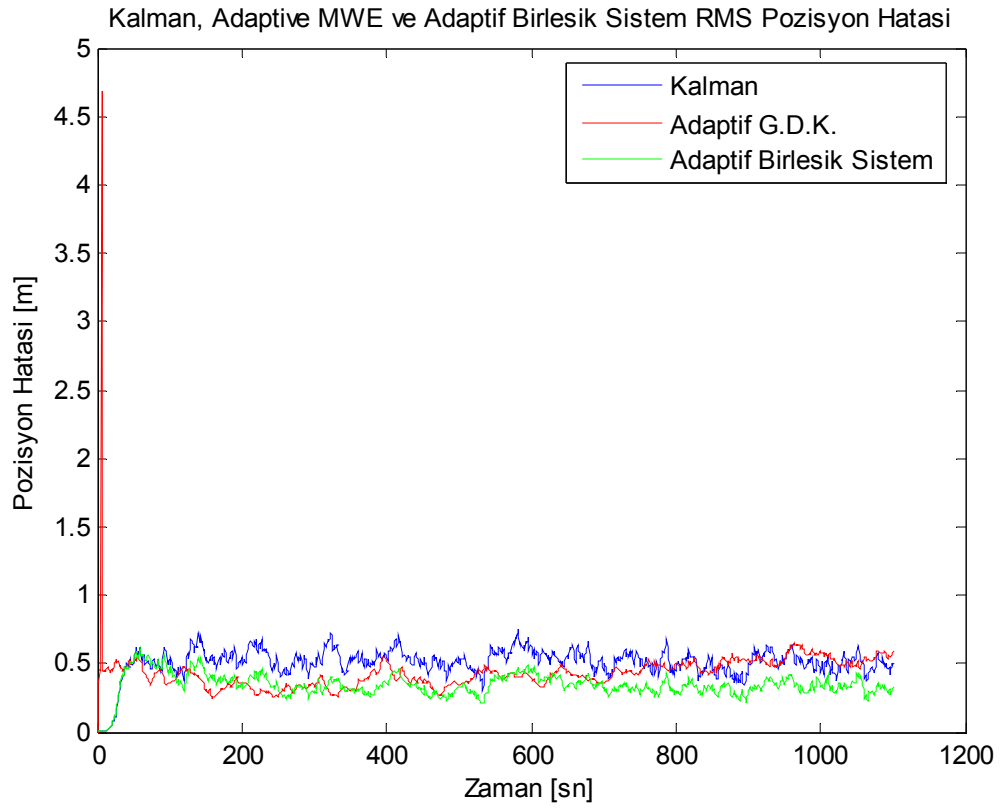
Şekil 4.10 Düşük kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için pozisyon kestirim hataları



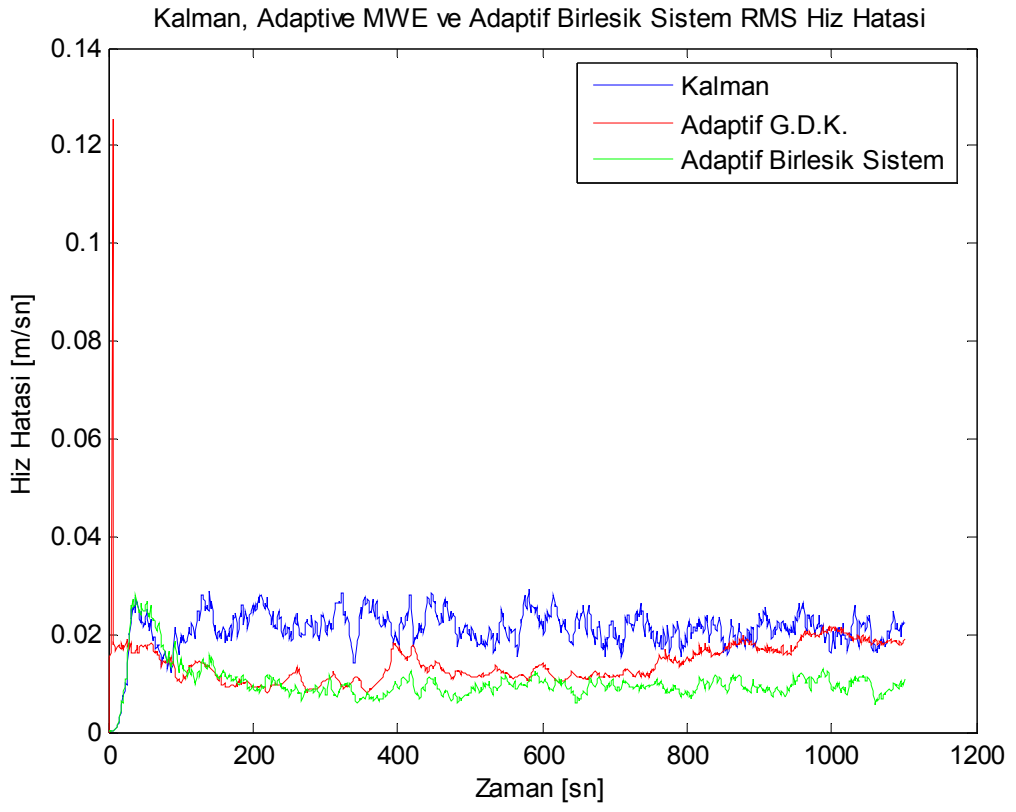
Şekil 4.11 Düşük kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için hız kestirim hataları



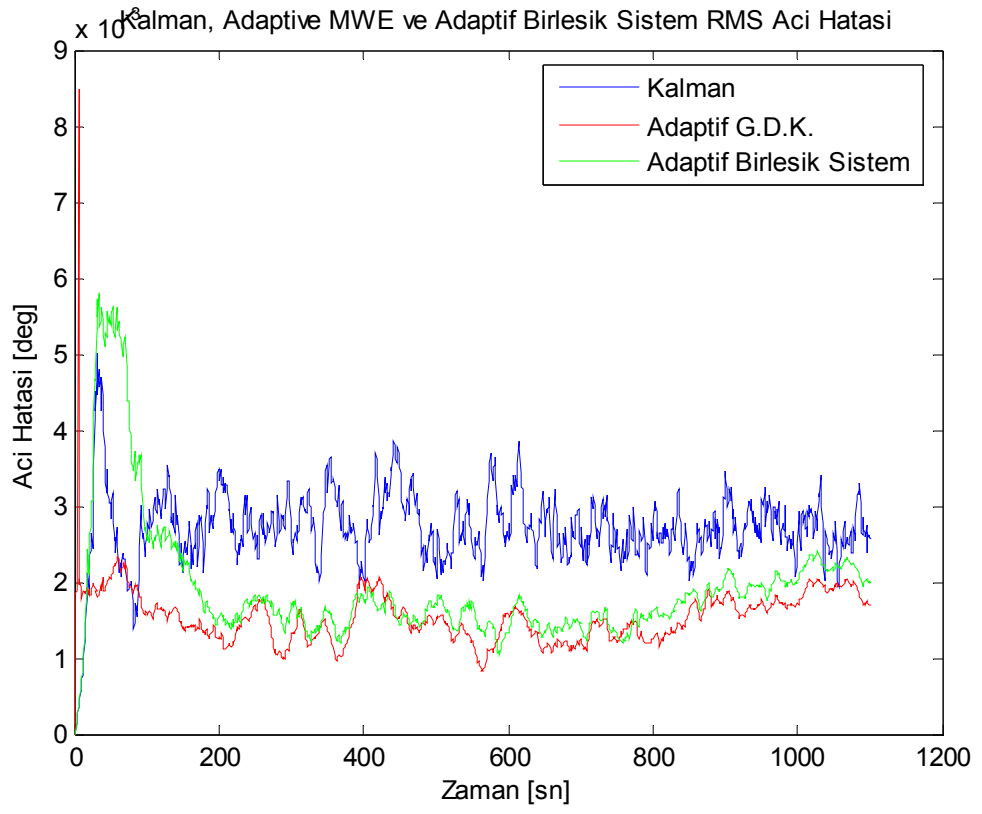
Şekil 4.12 Düşük kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için açı kestirim hataları



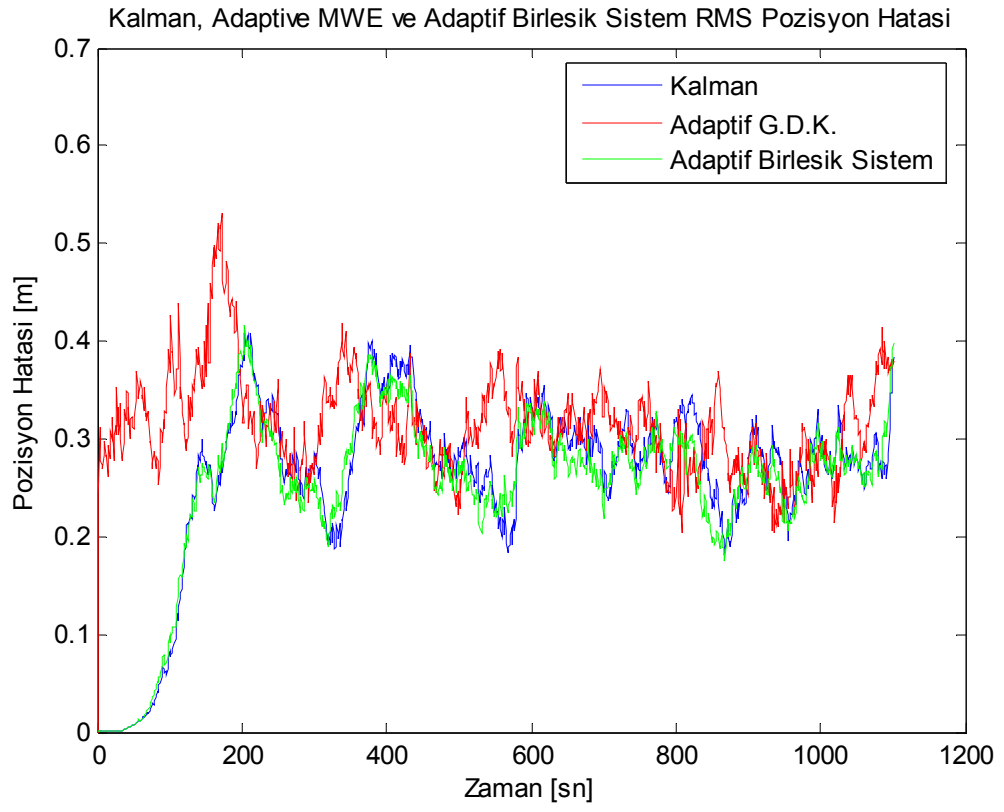
Şekil 4.13 Orta kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için pozisyon kestirim hataları



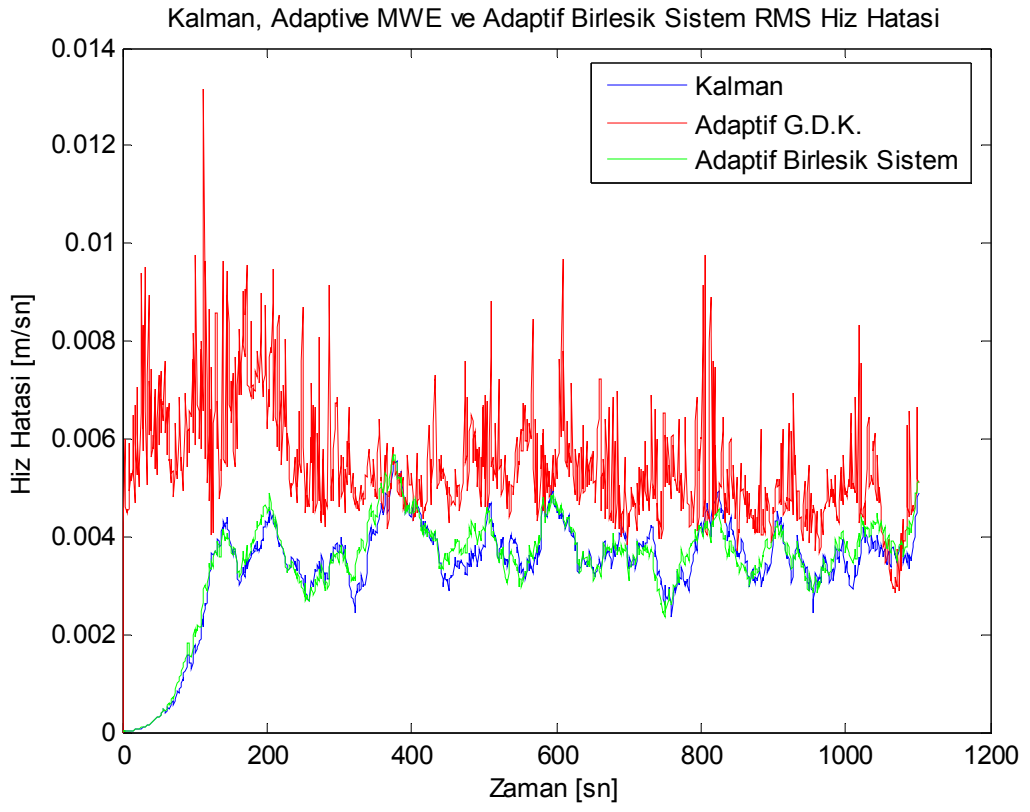
Şekil 4.14 Orta kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için hız kestirim hataları



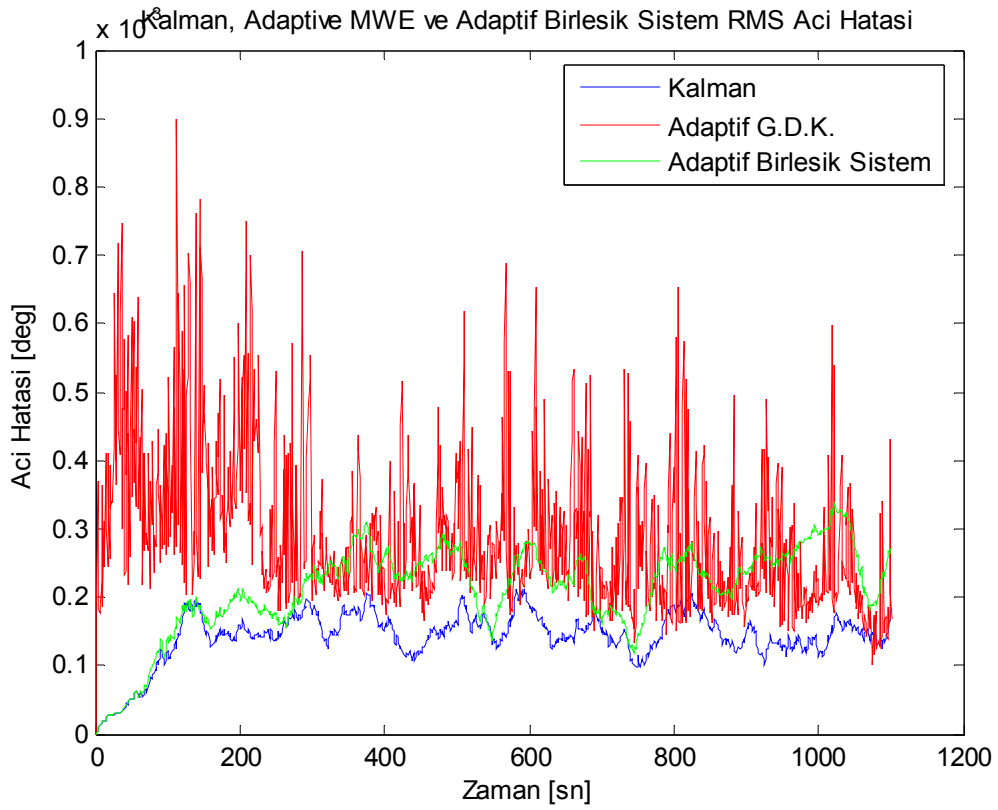
Şekil 4.15 Orta kalitede ölçüm birimi için kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için açı kestirim hataları



Şekil 4.16 Yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için pozisyon kestirim hataları



Şekil 4.17 Yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için hız kestirim hataları



Şekil 4.18 Yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman kiltresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem için açı kestirim hataları

Çizelge 4.18’de düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimi ihtiva eden seyrüsefer sistemleri için adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistemin kestirim hataları verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere yüksek kalitede ölçüm birimi kullanan seyrüsefer sistemleri dışında, adaptif yaklaşımlar Kalman filtresine oranla performans açısından daha verimlidir. Adaptif yaklaşımlarda düşük kalitede ölçüm birimi için pozisyonda %11.3, hızda %6.69 ve açıda %6.88 oranında performans iyileştirmesi sağlamıştır. Orta kalitede ölçüm birimi için pozisyonda %15.43, hızda %33.53 ve açıda %44.44 oranında performans iyileştirmesi sağlamıştır. Ancak yüksek kalitede ölçüm birimi göz önünde bulundurulduğunda adaptif yaklaşımlar, Kalman filtresine göre pozisyonda %21.21, hızda %60.53 ve açıda %103.6 oranında performans açısından kötüdür.

Çizelge 4.18 Düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimi ihtiva eden seyrüsefer sistemleri için Kalman filtresi, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistemin RMS pozisyon, hız ve açı kestirimi hataları

	Düşük Kalitede Ölçüm Birimi			Orta Kalitede Ölçüm Birimi			Yüksek kalitede Ölçüm Birimi		
	Kalman Filtresi	Adaptif G.D.K.	Adaptif B. S.	Kalman Filtresi	Adaptif G.D.K.	Adaptif B. S.	Kalman Filtresi	Adaptif G.D.K.	Adaptif B. S.
P.	0,75321	0,6681	0,49955	0,51047	0,43169	0,34466	0,2597	0,31478	0,25164
H.	0,06704	0,062554	0,032553	0,021074	0,014007	0,010049	0,0033998	0,0054577	0,0034776
A.	0,0189	0,0176	0,0191	0,0027	0,0015	0,0019	0,0001431	0,00029135	0,00021256

Birleştirilmiş sistemin adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ile kullanılmasıyla birlikte, hem performans açısından hem de işlem yükü açısından iyileştirme sağlanmıştır. Düşük kalitede ölçüm birimi için adaptif birleştirilmiş sistem ile Kalman filtresine göre pozisyonda %33.68, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre pozisyonda %25.23 oranında performans iyileştirmesi sağlanmıştır. Hızda ise Kalman filtresine göre %51.44 ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %47.96 oranında iyileştirme görülmüştür. Ancak açıda Kalman filtresine göre %1.06 ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %8.52 oranında kötü performans görülmüştür. Orta kalitede ölçüm birimi için adaptif birleştirilmiş sistem ile Kalman filtresine göre pozisyonda %32.48, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre pozisyonda %20.16 oranında performans iyileştirmesi sağlanmıştır. Hızda ise Kalman filtresine göre %52.32 ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %28.26 oranında iyileştirme görülmüştür. Ancak açıda Kalman filtresine göre %29.63 iyileştirme sağlanırken adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %26.67 oranında kötü performans görülmüştür. Yüksek kalitede ölçüm birimi için adaptif birleştirilmiş sistem ile Kalman filtresine göre pozisyonda %3.1, adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre pozisyonda %20.06 oranında performans iyileştirmesi sağlanmıştır. Hızda ise Kalman filtresine göre %2.29 kötü performans verirken ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %36.28 oranında iyileştirme görülmüştür. Açıda ise Kalman filtresine göre %48.54 oranında kötü performans gözlenirken ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisine göre %27.04 oranında daha iyi performans görülmüştür.

Çizelge 4.19-21’de düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimine sahip seyrüsefer sistemleri için denenen yöntemlerin karşılaştırması verilmiştir. Karşılaştırma yapılırken geliştirilmiş dalga kestiricisi ve birleştirilmiş sistem için tur zamanı 300 saniye olarak alınmıştır. Adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinde ise tur zamanı 300 saniye ile 150 saniye arasında tandem olarak çalışmaktadır. Düşük ve orta kalitede ölçüm birimi için pozisyon ve hız kestiriminde performans açısından en iyi yöntemin birleştirilmiş sistem olduğu görülmektedir. Açık kestirimlerinde ise performans açısından en iyi yöntem adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisidir. Yüksek kalitede ölçüm birimi için pozisyon ve hız kestiriminde performans açısından en iyi yöntemin birleştirilmiş sistem olduğu görülmektedir. Açık kestirimlerinde ise performans açısından en iyi yöntem Kalman filtresidir.

Çizelge 4.19 Düşük kalitede ölçüm birimi için tüm yöntemlerin karşılaştırılması

	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş D.K. (300sn Tur Zamanı)	Adaptif G.D.K.	Birleştirilmiş Sistem (300sn Tur Zamanı)	Adaptif Birleştirilmiş Sistem
Pozisyon (m)	1.9694	0,75321	0,66716	0,6681	0,47309	0,49955
Hız (m/s)	-	0,06704	0,062732	0,062554	0,031816	0,032553
Açı (derece)	-	0,0189	0,017756	0,0176	0,019456	0,0191

Çizelge 4.20 Orta kalitede ölçüm birimi için tüm yöntemlerin karşılaştırılması

	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş D.K. (300sn Tur Zamanı)	Adaptif G.D.K.	Birleştirilmiş Sistem (300sn Tur Zamanı)	Adaptif Birleştirilmiş Sistem
Pozisyon (m)	1.9794	0,51047	0,43344	0,43169	0,34504	0,34466
Hız (m/s)	-	0,021074	0,014383	0,014007	0,012636	0,010049
Açı (derece)	-	0,0027	0,0016161	0,0015	0,0020066	0,0019

Çizelge 4.21 Yüksek kalitede ölçüm birimi için tüm yöntemlerin karşılaştırılması

	Ölçüm Hatası	Kalman Filtresi	Geliştirilmiş D.K. (300sn Tur Zamanı)	Adaptif G.D.K.	Birleştirilmiş Sistem (300sn Tur Zamanı)	Adaptif Birleştirilmiş Sistem
Pozisyon (m)	1.9835	0,2597	0,29075	0,31478	0,22106	0,25164
Hız (m/s)	-	0,0033998	0,0044966	0,0054577	0,002332	0,0034776
Açı (derece)	-	0,0001431	0,00017849	0,00029135	0,00016736	0,00021256

Son olarak Çizelge 4.22, 4.23 ve 4.25’de Kalman filtresi, geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin işlem yükü verilmiştir.

Çizelge 4.22 Geliştirilmiş dalga kestiricisi simülasyon zamanları

Tur Zamanı	Fonksiyona çağrı	Toplam Süre(sn)
50	1100	6.905
100	1100	13.020
150	1100	19.361
200	1100	26.106
250	1100	33.411
300	1100	39.335
350	1100	45.434
400	1100	52.396

Çizelge 4.23 Kalman filtresi simülasyon zamanları

Tur Zamanı	Fonkiyona çağrı	Toplam Süre(sn)
-	1100	0.126

Çizelge 4.6’de geliştirilmiş dalga kestiricisinin Kalman filtresine oranla performans iyileştirmesinin 300sn’lik tur zamanı için pozisyonunda %15.18, hızda %31.82 ve açıda

%41.61, 150sn'lik tur zamanı için pozisyonda %0.39, hızda %23.53 ve açıda %47.20 olduğu görülmektedir. Çizelge 4.22'de 150sn'lik tur zamanı için geliştirilmiş dalga kestircisinin toplam simülasyon zamanı 19.361sn iken 300sn'lik tur zamanı için toplam simülasyon zamanı 39.335sn'dir. 300sn ile 150 saniye arasında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestircisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmesi, pozisyonda %15.53, hızda %33.60 ve açıda %45.81'dir. Bununla birlikte 300sn ile 150 saniye arasında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestircisi için toplam simülasyon zamanı 30.139sn'dir. Görüldüğü üzere; 300sn ile 150 saniye arasında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestircisi, 300 saniyelik tur zamanıyla çalışan geliştirilmiş dalga kestircisinin simülasyon zamanından toplamda 9.196sn daha kısa sürede aynı performansı yakalamaktadır. Çizelge 4.24'de farklı tur zamanlarında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestircisi için pozisyon, hız ve açı hataları verilmektedir. Çizelge 4.25'de ise bu kestircilere ait toplam simülasyon zamanları verilmektedir.

Çizelge 4.24 Adaptif geliştirilmiş dalga kestircisi için pozisyon, hız ve açı hataları

	400sn – 200sn	300sn – 150sn	200sn – 100sn
Pozisyon(m)	0,41136	0,43169	0,44558
Hız(m/s)	0,012738	0,014007	0,014371
Açı(derece)	0.0014	0,0015	0.0016

Çizelge 4.25 Adaptif geliştirilmiş dalga kestircisi simülasyon zamanları

Tur Zamanı	Fonkiyona çağrı	Toplam Süre(sn)
200-100	1100	23.265
300-150	1100	30.139
400-200	1100	45.326

Geliştirilmiş dalga kestircisinin Kalman filtresine oranla performans iyileştirmesinin 400sn'lik tur zamanı için pozisyonda %5.06, hızda %25.38 ve açıda %39.16, 200sn'lik

tur zamanı için pozisyonda %11.18, hızda %33.59 ve açıda %47.20 olduğu görülmektedir. Çizelge 4.22'de 200sn'lik tur zamanı için geliştirilmiş dalga kestiricisinin toplam simülasyon zamanı 26.106sn iken 400sn'lik tur zamanı için toplam simülasyon zamanı 52.396sn'dir. 400sn ile 200 saniye arasında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin, Kalman filtresine göre performans iyileştirmesi, pozisyonda %19.15, hızda %39.23 ve açıda %48.43'dir. Bununla birlikte 400sn ile 200 saniye arasında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi için toplam simülasyon zamanı 45.326sn'dir. Görüldüğü üzere; 400sn ile 200 saniye arasında tandem olarak çalışan adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi, 400 saniyelik tur zamanıyla çalışan geliştirilmiş dalga kestiricisinin simülasyon zamanından toplamda 7.07sn daha kısa sürede aynı performansı yakalamaktadır. Burada göze çarpan bir başka durum, 400sn'lik tur zamanının performansı iyileştirmesinin 200sn'lik tur zamanının performansı iyileştirmesinden kötü olmasıdır. Yüksek tur zamanında her ne kadar kuvvetli gözlenebilir durumların yakınsaması için süre yeterli olsa da kestirici gürültüyü modellerken sisteme yüksek oranda hata eklemektedir. Ancak adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanını adaptif olarak ayarlamasının bu durumu dengelediği görülmüştür. Böylelikle, kestirici tandem çalıştığı tur zamanları içinde geliştirilmiş dalga kestiricisi performanslarından en iyisinin performansını sağladığı gözlenmiştir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde kullanılan yöntemlerin incelendiği tez çalışmasında ortaya konan araştırma bulguları bu bölümde incelenmiştir. İncelenen yöntemler, kestirim performansları ve işlem yükü açısından iki ana başlık altında verilmiştir.

### 5.1 Kestirim Performansları

Tez çalışmasında, seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde halen kullanılan Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi ile yeni önerilen bütünleştirme filtreleri, düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimleri göz önünde bulundurularak kestirim performansları açısından incelenmiştir.

Günümüzde, seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde Kalman filtresi etkin olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi, seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesine, Kalman filtresinin getirdiği çözümlerdir. Bununla birlikte son zamanlarda önerilen geliştirilmiş dalga kestiricisi, Kalman filtresine alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Tez çalışmasında, düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimi için Kalman filtresi ve gelişmiş dalga kestiricisi karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar ortaya konulmuştur. Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin, literatürde verilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüş ve tümleşik seyrüsefer sistemlerinin bu iki yöntemle bütünleştirilmesi başarılmıştır. Düşük ve orta kalitede ölçüm birimleri için geliştirilmiş dalga kestiricisinin performansının, Kalman filtresine oranla daha iyi olduğu gözlenmiştir. Yüksek kalitede ölçüm birimi için ise Kalman filtresinin performansının daha iyi olduğu gözlenmiştir. Geliştirilmiş dalga kestiricisinin, hata artışının yüksek olduğu durumlarda yetersiz kaldığı, Kalman filtresinin ise bu tip manevralarda başarılı olduğu gözlenmiştir.

Yeni bir yöntem olarak önerilen birleştirilmiş sistem düşük ve orta kalitede ölçüm birimine sahip seyrüsefer sistemleri göz önünde bulundurulduğunda, kuvvetli gözlenebilir durum olan pozisyon, hız kestirimlerinde performans açısından Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisinin önüne geçtiği görülmüştür. Ancak önerilen

yeni yöntemin, açı kestirimleri için geliştirilmiş dalga kestiricisinden daha iyi performansta olmadığı gözlenmiştir. Yöntemin, açı kestirim performansı açısından Kalman filtresi ile karşılaştırılması göz önünde bulundurulduğunda, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimlerinde birleştirilmiş sistemin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Adaptif yaklaşımlar başlığı altında, yeni önerilen adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisi ve adaptif birleştirilmiş sistem incelenmiştir. Düşük, orta ve yüksek kalitede ölçüm birimleri için, seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesi, adaptif yaklaşımlarla başarılmıştır. Düşük ve orta kalitede ölçüm birimleri için, kuvvetli gözlenebilir durumların kestirimlerinde, birleştirilmiş sistemin adaptif yaklaşımlardan daha iyi performansta olduğu görülmüştür. Ancak, zayıf gözlenebilir durum olan açı kestirimlerinde, yeni önerilen metod olan adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin, karşılaştırılan tüm diğer yöntemlere oranla en iyi sonucu verdiği gözlenmiştir. Yüksek kalitede ölçüm birimi ihtiva eden seyrüsefer sistemlerinde ise, pozisyon ve hız durumları için en iyi performansı veren kestiricinin birleştirilmiş sistem olduğu görülmüştür. Zayıf gözlenebilir durum olan açının kestirimleri için ise en iyi performansı veren kestiricinin Kalman filtresi olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra geliştirilmiş dalga kestiricisinin hata artışının yüksek olduğu durumlara karşı yetersizliği, önerilen adaptif yaklaşımlar ile başarıyla giderilmiştir.

## **5.2 İşlem Yüğü**

Seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde hali hazırda kullanılan Kalman filtresi ve geliştirilmiş dalga kestiricisi işlem yükleri açısından karşılaştırıldı. Geliştirilmiş dalga kestiricisi için bu çalışmada denenmiş en düşük tur zamanında, kestiricinin, Kalman filtresine göre yaklaşık tur zamanı katında yavaş çalıştığı görülmüştür. Geliştirilmiş dalga kestiricisinin tur zamanı artışı ile doğru orantılı olarak, kestiricinin işlem yükünün arttığı gözlenmiştir. Seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesinde hali hazırda kullanılan filtreler ile yeni önerilen yöntemler göz önüne alındığında Kalman filtresinin işlem yükü açısından en verimli kestirici olduğu görülmüştür. İncelenen yöntemler

arasında, işlem yükü açısından en verimsiz yöntemin birleştirilmiş sistem olduğu görülmüştür.

Seyrüsefer sistemlerinin bütünleştirilmesi için önerilen yeni bir yöntem olan adaptif geliştirilmiş dalga kestiricisinin, sistemin işlem yükünü, geliştirilmiş dalga kestiricisine göre azalttığı gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Bar – Shalom, Y., Li, X.R. and Kirubarajan, T. 2001. Estimation with Application to Tracking and Navigation. Wiley – Interscience Publication,
- Britting, K.R. 1971. Inertial Navigation Systems Analysis. Wiley – Interscience Publication,
- Chung, D., Lee, J.G., Park, C.G. and Park, H.W. 1996. Strapdown INS Error Model for Multiposition Alignment. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol 32 No 4, pp 1362–1366
- Dezert, J. and Bar-Shalom, Y. 1993. Joint Probabilistic Data Association for Autonomous Navigation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol 29 No 4, pp 1275–1285
- Fossen, T. I. and Vik, B. 2001. A Nonlinear Observer for Integration of GPS and Inertial Navigation Systems, Norwegian University of Science and Technology
- Gelb, A. 1974. Applied Optimal Estimation. MIT Press
- Ignagni, M. B. 1990. Optimal Strapdown Attitude Integration Algorithms. Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol 13 No 2, pp 363–369
- Ignagni, M. B. 1996. Efficient Class of Optimized Coning Compensation Algorithms. Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol 19 No 2, pp 424–429
- Jordan, S. K., Moonan, P. J. and Weiss, J.D. 1981. State-Space Models of Gravity Disturbance Gradients. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol AES–17 No 5, pp 610–618
- Kalman R. E. 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Journal of Basic Engineering, Vol 82, No 1, pp 35 – 46
- Kalman R. E. and Bucy, R. S. 1961. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. Journal of Basic Engineering, Vol 83, No 3, pp 95–108
- Li, X. R., Zhu, Y. and Han, C. 2000. Unified Optimal Linear Estimation Fusion Part I: Unified Models and Fusion Rules. ISIF, pp 10–17
- Li, X. R. and Wang, J. 2000. Unified Optimal Linear Estimation Fusion Part II: Discussion and Examples. ISIF, pp 18–25
- Li, X. R., Zhang, K., Zhao, J. and Zhu, Y. 2002. Optimal Linear Estimation Fusion Part IV: Relationships. ISIF, pp 497–504
- Lin C. 1991. Modern Navigation, Guidance, and Control Processing. Prentice-Hall Publication,

- Miller, R. B. 1983. A New Strapdown Attitude Algorithm. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol 6 No 4, pp 287–291
- Parkinson, B. W. and Spilker, J. J. 1996. *Global Positioning System: Theory and Applications*. AIAA Publication,
- Salychev, O. S., Ray, J. K. and Cannon M. E. 1999. The Modified Wave Estimator as an Alternative to a Kalman Filter for Real-Time GPS/GLONASS-INS Integration. *Journal of Geodesy*, 73, pp 568–576
- Savage, P. G. 1998. Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part1: Attitude Algorithms. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol 21 No 1, pp 19–28
- Savage, P. G. 1998. Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part2: Velocity and Position Algorithms. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol 21 No 2, pp 208–221
- Schweppe, F. C. 1973. *Uncertain Dynamic Systems*. Prentice-Hall Publication,
- Vershinin, Y. A. 2002. A Data Fusion Algorithm for Multisensor Systems. ISIF, pp 341–345

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yetkin ERSOY

Doğum Yeri : Bursa

Doğum Tarihi : 04-10-1980

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurumu ve Yılı)

Lise : Ahmet Hamdi Gökbayrak Anadolu Öğretmen Lisesi – 1998

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik  
Mühendisliği Bölümü – 2002

### Çalıştığı Kurum / Kurumlar ve Yıl

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik  
Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi 2004-2005

Aydın Yazılım ve Elektronik Sanayi A.Ş., Yazılım Mühendisi 2005 - ...