

**YAZILIM TABANLI
GPS ALMAÇLARININ İNCELENMESİ**

**AN INVESTIGATION OF
SOFTWARE BASED GPS RECEIVERS**

TAHSİN ZUBAROĞLU

Yrd. Doç. Dr. YAKUP ÖZKAZANÇ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak hazırlanmıştır

2013

TAHSİN ZUBAROĞLU'nun hazırladığı “**Yazılım Tabanlı GPS Almaçlarının İncelenmesi**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

(Doç. Dr., Cenk Toker)

Danışman

(Yrd. Doç. Dr., Yakup Özkazanç)

Üye

(Doç. Dr., Emre Aktaş)

Üye

(Doç. Dr., Murat Efe)

Üye

(Yrd. Doç. Dr., A. Semih Bingöl)

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

__/__/2013

Tahsin ZUBAROĞLU

ÖZET

YAZILIM TABANLI GPS ALMAÇLARININ İNCELENMESİ

TAHSİN ZUBAROĞLU

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. YAKUP ÖZKAZANÇ

Temmuz 2013, 105 sayfa

Bu çalışma kapsamında, yazılım tabanlı GPS alıcılarının incelenmesi amacıyla GPS sisteminin genel çalışma mantığı, sinyal yapıları ve GPS alıcı bileşenleri araştırılmıştır. GPS alıcısının her bileşeni için kullanılacak yapılar incelenmiştir. MATLAB ortamı kullanılarak yazılım tabanlı GPS alıcısının bileşenleri modellenmiş ve performansları değerlendirilmiştir. Toplanan gerçek GPS sinyalleri kullanılarak hazırlanan modeller ile alıcı konumu hesaplanmıştır. Sinyal yakalama için FFT yöntemi ile geciktirme ve çarpma yöntemi modellenmiş ve bu iki yöntemin performansları karşılaştırılmıştır. FFT yönteminin geciktirme ve çarpma yöntemine göre daha çok zaman isteyen bir yöntem olmasına rağmen daha başarılı olduğu görülmüştür. Sinyal takibi, taşıyıcı takibi için kullanılan Costas döngüsü ile kod takibi için kullanılan erken-geç takip döngüsünün uygun bir şekilde birleştirilmesiyle yapılmıştır. Bu döngülerde kullanılan filtrelerin bant genişliği ve sönüm oranı da uygun seçilerek, başarılı bir takip döngüsü modellenmiştir. Takip döngüsü sonuçlarından, GPS sinyalindeki navigasyon mesajı çözümlenmiş ve her uydu için sözde mesafe hesaplanmıştır. Bu bilgiler en küçük kareler yönteminin yardımıyla alıcı konumunun hesaplanmasında kullanılmıştır. Hesaplanan alıcı konum hatalarının beklenen düzeyde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: GPS, yazılımsal GPS alıcıları, sinyal yakalama, taşıyıcı takip döngüsü, kod takip döngüsü, konum hesaplama.

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF SOFTWARE BASED GPS RECEIVERS

TAHSİN ZUBAROĞLU

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics
Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. YAKUP ÖZKAZANÇ

JULY 2013, 105 pages

This study aims to investigate software based GPS receivers. In order to investigate software based GPS receivers, GPS system concepts, GPS signal structure and GPS receiver structure are studied. Alternative implementation structures are analyzed for each GPS receiver part. MATLAB models are implemented for each GPS receiver part and their performances are evaluated. These software implemented models are used with real recorded GPS signals to determine the receiver position. For acquisition, two methods are modeled and tested: FFT method and the delay and multiply approach. Test results showed that FFT method has a better performance but requires longer time for execution. The tracking contains two parts: code tracking and carrier frequency tracking. Carrier frequency tracking has been implemented by a kind of PLL named Costas Loop and code tracking has been implemented by a kind of DLL named early-late tracking loop. The tracking loop has been successfully implemented with appropriate bandwidth and damping ratios. The navigation message has been decoded and pseudoranges have been calculated using tracking results. Receiver position has been determined via the least-square method.

Keywords: GPS, software based GPS receiver, acquisition, carrier frequency tracking, code tracking, positioning.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın sonuca ulaşmasında katkıları ve yol göstericiliğinden dolayı tez danışmanı Yrd. Doç. Dr. Yakup Özkazanç'a teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bilgilerini benden esirgemeyen ve sorularıma sabırla cevap veren Niyazi Burak Seymen, Alper Öztürk ve Yiğiter Yüksel'e, tez yazımı esnasında deneyimleriyle bana yol gösteren Şaban İhsan Yalçinkaya, Serkan Zobar ve Berk Osunluk'a ve benim için sürekli bir ağabey olan Serkan Avgören'e teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca, evdeki işleri tek başına yapmaya çalışan ev arkadaşım ve kardeşim Alaettin Zubaroglu'na teşekkür ederim.

Son olarak, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda olan annem Azize Zubaroglu, babam Suphi Zubaroglu'na ve bütün aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
SÖZLÜK.....	ix
1 GİRİŞ.....	1
2 KÜRESEL KONUMLANDIRMA SİSTEMİ (KKS – GPS).....	4
2.1 KKS'nin Tarihi	4
2.2 GPS Genel Bilgiler	4
2.3 GPS Bölümleri.....	6
2.3.1 Uzay Bölümü	7
2.3.2 Kontrol Bölümü	8
2.3.3 Kullanıcı Bölümü.....	9
2.4 GPS Servisleri.....	10
2.4.1 Hassas Konumlandırma Servisi (PPS)	10
2.4.2 Standart Konumlandırma Servisi (SPS).....	11
2.5 GPS Çalışma Prensipleri.....	11
2.6 GPS Hata Kaynakları	12
2.6.1 Uydu Geometrisi	12
2.6.2 Mesafe Ölçüm Hataları	13
2.7 GPS Sinyal Yapısı.....	16
2.7.1 GPS Sinyali Özellikleri	16
2.7.2 C/A Kod Özellikleri.....	20
2.7.3 Navigasyon Bilgisi.....	22

3	GPS ALICI BİLEŞENLERİ	24
3.1	GPS Anteni	24
3.2	Sinyal Hazırlama (Front-End).....	25
3.3	Sinyal Yakalama (Acquisition).....	27
3.3.1	Geleneksel Yöntem	28
3.3.2	FFT Yöntemi.....	28
3.3.3	Geciktirme ve Çarpma Yöntemi.....	29
3.4	Sinyal Takibi (Tracking).....	30
3.4.1	Geleneksel Yöntem	32
3.4.2	Blok Ayarlamalı Senkronize Edilmiş Sinyal (BASS) Yöntemi.....	33
3.5	Konum Hesaplama.....	36
4	YAZILIM TABANLI ALICI UYGULAMASI.....	37
4.1	Sinyal Toplama ve Hazırlama	37
4.2	Sinyal Yakalama (Acquisition).....	40
4.2.1	FFT Yöntemi ile Sinyal Yakalama.....	41
4.2.2	Geciktirme ve Çarpma Yöntemi ile Sinyal Yakalama.....	49
4.2.3	Hızlı Açılma (Warm Start)	54
4.3	Sinyal Takibi (Tracking).....	62
4.3.1	Taşıyıcı Frekans Takibi.....	62
4.3.2	PRN Kod Takibi	70
4.3.3	Birleştirilmiş Takip Döngüsü	74
4.4	Konum Hesaplama.....	80
4.4.1	Navigasyon Mesajının Çözümlemesi.....	81
4.4.2	Uyduların Konumlarının Hesaplanması	84
4.4.3	Sözde Mesafe (Pseudorange) Kestirimi	85
4.4.4	Alıcı Konumunun Hesaplanması.....	88

4.4.5	Hesaplanan Konumun Doğruluğu	93
4.4.6	Konum Hesaplama Sonuçları	94
5	SONUÇ.....	100
	KAYNAKLAR.....	102
	ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Işık hızı
$\dot{\Omega}_{ie}$	Dünya dönü hızı
μ	Yerçekimi sabiti
σ	Varyans
ζ	Sönüm oranı

Kısaltmalar

A/S	Anti Spoofing
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADC	Analog to Digital Converter
ANS	Ataletsel Navigasyon Sistemi
BASS	Block Adjustment of Synchronizing Signal
BPF	Band Pass Filter
C/A	Clear Acquisition - Coarse Acquisition -Clear/Access
CDMA	Code Division Multiple Access
DFT	Discrete Fourier Transform
DLL	Delay Lock Loop
DOP	Dilution of Precision
ECEF	Earth-Center, Earth-Fixed
FLL	Frequency Locked Loop

GMT	Greenwich Mean Time
GPS	Global Positioning System
HOW	Handover word
I	In-phase
KKS	Küresel Konumlandırma Sistemi
NCO	Numerically Controlled Oscillator
OCS	Operational Control System
P code	Precise/ Protected Code
PLL	Phase Locked Loop
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise
PSD	Power Spectral Density
Q	Quadrature phase
RHCP	Right-Handed Circularly Polarized
SA	Selective Availability
SPS	Standard Positioning Service
TLM	Telemetry
US DOD	ABD Savunma Bakanlığı
UTC	Coordinated Universal Time
UTM	Universal Transverse Mercator
VCO	Voltage Controlled Oscillator

SÖZLÜK

İNGİLİZCE

TÜRKÇE

Amplifier	Yükselteç
Analog to Digital Converter	Analog-Sayısal çevrici
Autocorrelation	Özilinti
Bandpass sampling (Undersampling)	Bant-geçiren örnekleme
Bilinear	Çiftdoğrusal
Biphase modulation	İkili faz modülasyonu
Block Adjustmen of Synchronizing Signal	Blok ayarlamalı senkronize edilmiş sinyal
Coherent	Evreuyumlu
Cold start	Yavaş açılma
Covariance matrix	Ortak değişinti matrisi
Crosscorelation	Çapraz ilinti
Damping ratio	Sönüm oranı
Deeply coupled	Derin bağlaşımlı
Delay Lock Loop	Gecikme Kilitleme Döngüsü
Demodulator	Kipçözücü
Dilution of Precision	Doğruluğun seyrelmesi
Discriminator	Ayrıtaç, diskriminatör
Early gate	Erken kapı
Early-late tracking loop	Erken-geç takip döngüsü

İNGİLİZCE

Frequency Locked Loop

Front-End Module

Gain

In-phase

Integrate and dump

Iteration

Late gate

Least-squares method

Local Oscillator

Loosely coupled

Mean Anomaly

Modulation

Multipath

Navigation

Noise figure

Noncoherent

Numerically Controlled Oscillator

Optimization

Parity

Phase Locked Loop

TÜRKÇE

Frekans Kenetleme Döngüsü

Sinyal toplama ve hazırlama cihazı

Kazanç

Eşevreli

Topla ve boşalt

Özyineleme

Geç kapı

En küçük kareler yöntemi

Yerel Salıngaç

Gevşek bağlaşımlı

Ortalama anomali

Kiplenim

Yansıma, çokyolluluk

Navigasyon, Seyrüsefer, Yöngüdümlü,

Gürültü katsayısı

Evreuyumsuz

Nümerik Kontrollü Osilatör

Eniyileme, ençoklama

Eşlik

Evre Kenetleme Döngüsü

İNGİLİZCE

Precise Positioning Service

Prompt gate

Pseudo Random Noise

Pseudorange

Quadrature phase

Right-Handed Circularly Polarized

Selective Availability

Standard Positioning Service

Subframe

Tightly coupled

Voltage Controlled Oscillator

Warm start

TÜRKÇE

Hassas Konumlandırma Servisi

Eş-zaman kapısı

Sözde Rastlantısal Gürültü

Sözde Mesafe

Dikevrelî

Sağ-el polarizasyonlu

Seçimli Erişim

Standart Konumlandırma Servisi

Alt çerçeve

Sıkı bağlaşımlı

Voltaj Kontrollü Osilatör

Hızlı açılma

1 GİRİŞ

İlkel insan mağarasından çıktığından beri şu soruları sormuştur: “Şu an neredeyim?” ve “Gideceğim yere hangi yoldan gidebilirim?”. İnsanlar, tarih boyunca bu soruların cevaplarını bulmak için birçok navigasyon (yöngüdüm, seyrüsefer) yöntemi geliştirmiştir [1]. Radyo sinyallerinin geliştirilmesiyle, bu sinyallerin navigasyon probleminin çözülmesinde kullanılabileceği anlaşılmıştır. ABD Milli Savunma Bakanlığı'nın desteğiyle yapılan çalışmalar sonucunda, 1973 yılında yeni bir navigasyon yöntemi planı geliştirilmiştir. Bu plan sonucunda, 1995 yılında GPS (Global Positioning System) sistemi devreye alınmıştır [2].

GPS, dünya üzerinde konum bulmak için kullanılan, her türlü hava koşulunda 24 saat kesintisiz; konum, hız ve zaman bilgisi sağlayan gelişmiş bir radyo navigasyon sistemidir [1].

GPS, ABD savunma bakanlığı tarafından askeri bir sistem olarak tasarlanmasına rağmen; askeri uygulamalara ek olarak birçok sivil uygulamada da kullanılmaktadır. Jeodezik ve kadastral ölçümlerin yanı sıra, hava, deniz, kara araçlarında ve günümüzde iyice büyüyen ve kalabalıklaşan şehirlerde, insanlar yönlerini bulmak için GPS sisteminden yararlanmaktadır [3]. Günümüzde; birçok askeri platform ve sistemin yanı sıra araçların çoğunda, tabletlerde, cep telefonlarında ve benzeri birçok cihazda GPS alıcısı bulunmaktadır.

GPS alıcıları, işlem yükünün fazla olması sebebiyle çoğunlukla donanımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, günümüzde işlemci teknolojilerinin gelişmesi ve işlem hızlarının oldukça artması, GPS alıcılarının yazılım tabanlı olarak uygulanmasına da olanak sağlamaya başlamıştır. GPS alıcılarının bulunduğu cihazların neredeyse tamamında bir işlemci bulunmasına rağmen, GPS alıcıları ayrı bir donanım olarak kullanılmaktadır. Bu da hem daha karmaşık bir donanım oluşmasına hem de güç tüketiminin artmasına sebep olmaktadır.

GPS, Ataletsel Navigasyon Sistemlerinin (ANS) desteklenmesi ve güçlendirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. GPS ile ANS birleştirilmesinde donanımsal bir GPS alıcısı kullanıldığında; GPS alıcısından ANS sistemine sadece pozisyon ve hız bilgileri saniyede birkaç defa düzeyinde beslenebilmektedir. Bu tür yapılar gevşek bağlantılı (loosely coupled) olarak tanımlanmaktadır. Yazılım tabanlı GPS alıcısı

kullanıldığında ise, ANS'nin pozisyon hesaplamaları kullanılarak GPS alıcısının takip döngüsüne de geri besleme yapılabilir. Bu tür yapılar sıkı bağlaşımlı (tightly coupled) olarak tanımlanır. Hatta yazılım tabanlı GPS alıcısının sinyal takip döngüsünde bulunan taşıyıcı frekans ve kod kayıklıkları da ANS Kalman filtresi içinde modellenerek çok daha güçlü bir yapı oluşturulabilir. Bu tür yapılar derin bağlaşımlı (deeply coupled) olarak tanımlanır. Gevşek bağlaşımlı bir yapıda, GPS'ten ANS'ye sağlanan destek saniyede birkaç defayı geçemezken; derin bağlaşımlı yapılarda bu destek teorik olarak saniyede 1000 defaya kadar sağlanabilir. Bu sebeple, özellikle yüksek hızlı uygulamalarda ve elektronik karıştırma altında derin bağlaşımlı yapılar çok daha iyi sonuç verecektir [4; 5].

James BAO ve Yen TSUI yazmış oldukları kitapta [6], GPS alıcılarının yapılarını incelemiş ve yazılım tabanlı GPS alıcılarında kullanılabilecek yaklaşımları anlatmışlardır.

Kai BORRE, Dennis M. AKOS, Nikolaj BERTELSON, Peter RINDER ve Soren Holdt JENSEN'den oluşan bir ekip, GPS'in L1 frekansını kullanarak konum hesaplaması yapan yazılım tabanlı bir GPS alıcısı modeli oluşturmuşlardır. Bu modeli, yazdıkları bir kitapta [7] anlatmışlardır. Bu GPS alıcısı modelini MATLAB tabanlı olarak uygulamışlardır. Hazırlamış oldukları MATLAB tabanlı GPS alıcısı, toplanan gerçek GPS sinyallerini işleyerek 3 boyutlu konum hesaplaması yapabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, yazılım tabanlı GPS alıcıları incelenmiş, yukarıda verilen kitaplar [6; 7] ve diğer kaynaklarda bulunan bazı yaklaşımlar ve yöntemler Kai BORRE ve ekibinin [7] hazırlamış olduğu MATLAB tabanlı GPS alıcı kodlarının da yardımıyla modellenmiş ve test edilmiştir. Modellenen yöntemlerde, kullanılan bütün yaklaşımlar ve kullanım sebepleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Yazılım tabanlı GPS alıcılarının incelenmesini amaçlayan bu tez, şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'de küresel konumlandırma sistemlerinin tarihçesinden başlanarak GPS ile ilgili genel bilgiler, çalışma mantığı, hata kaynakları ve GPS sinyalinin özellikleri anlatılmıştır. Bölüm 3'te GPS alıcılarını oluşturan bileşenler ve bu bileşenler için kullanılabilecek yöntemler hakkında genel bilgi verilmiştir. Bölüm 4'te bu tez çalışmasında incelemeleri yapılan, modelleri hazırlanan ve test edilen yazılım tabanlı GPS alıcısı bileşenleri detaylı bir şekilde anlatılmış; kullanılan

yöntemlerin ve yaklaşımların formülleri, blok şemaları ve akış şemaları verilmiştir. Test sonuçları, tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur. Tez kısa bir Sonuç bölümüyle son bulmaktadır.

2 KÜRESEL KONUMLANDIRMA SİSTEMİ (KKS – GPS)

2.1 KKS'nin Tarihi

Navigasyon, bir aracı veya insanı bir yerden başka bir yere ulaştırmak için nesnenin yerini, hızını ve yönünü belirleme bilimidir. İnsanlar binlerce yıldır, buldukları yeri ve yönlerini bulabilmek için birçok navigasyon yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemlerin başında yıldızları kullanarak konum belirlemek gelir. Radyo sinyallerinin geliştirilmesiyle yeni bir navigasyon yöntemi doğmuştur. İlk başlarda, tek noktalı radyo işareti olarak tanımlanabilen; VHF çok yönlü radyo (VOR – VHF Omnidirectional Radio), uzun mesafe radyo navigasyonu (LOREN – Long Range Radio Navigation) ve OMEGA gibi sistemler geliştirilmiştir. Uyduların da geliştirilmesiyle, daha az hatayla konum bilgisi hesaplayabilen radyo navigasyon yöntemleri mümkün hale gelmiştir [2].

ABD Milli Savunma Bakanlığı'nın desteğiyle yapılan çalışmalar sonucunda, 1973 yılında yeni bir navigasyon yöntemi planı geliştirilmiştir. NAVSTAR (Navigation Satellite Timing And Ranging) denilen bir grup yapay uydudan oluşan sistem, radyo sinyalleriyle konum hesaplama temeline dayanmaktadır [2].

Bu sistemin kurulması ve faaliyete geçirilmesi yirmi yıldan daha uzun bir zaman almış ve GPS (Global Positioning System) 1995 yılında bütün fonksiyonlarıyla çalışır duruma gelmiştir. Bu sistem sayesinde şu anda dünyanın her yerinde oldukça ucuz alıcılar kullanılarak çok hassas 3 boyutlu konum, zaman ve hız bilgisine ücretsiz olarak erişilebilmektedir [2].

2.2 GPS Genel Bilgiler

GPS bir uydu radyo navigasyon ve zaman yayımlama sistemidir. ABD Savunma Bakanlığı (US DOD) tarafından geliştirilen, işletilen ve kontrol edilen bir sistemdir. Bir uydu ağı tarafından yayımlanan kodlanmış sinyallerle dünya üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatlarını belirlemeyi mümkün kılar.

GPS sistemi; dünya üzerindeki her noktada, her türlü hava koşulunda, kesintisiz olarak, yüksek doğrulukta navigasyon bilgisi sağlamayı hedeflemektedir. Kullanıcı sistem sayesinde 3 boyutlu konum, hız ve zaman bilgilerine ulaşabilir.

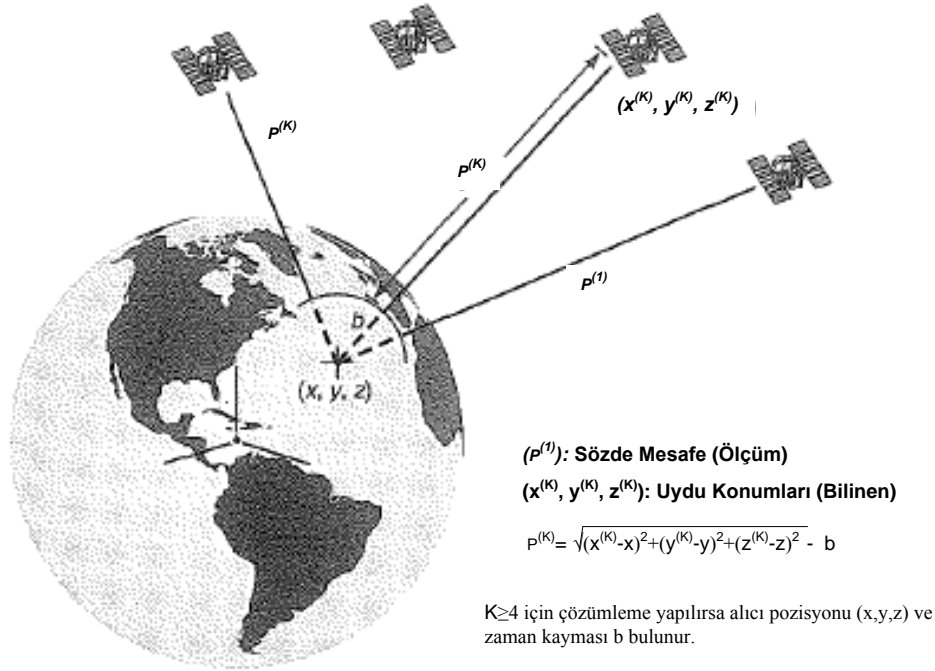
GPS Sistemi nominal olarak 6 yörüngesel düzlemde 4'er tane olmak üzere yerleştirilmiş 24 uydudan oluşur.

GPS alıcısı tarafından kullanılan konum bulma yöntemi, geometrik bir ilkeye dayanır. Bir noktanın konumu, konumu bilinen 3 noktaya olan uzaklıkları biliniyorsa hesaplanabilir. GPS uyduları kendi konumlarını hesaplamayı sağlayan sinyalleri sürekli yayımlamaktadırlar. Alıcı bu sinyalleri alıp çözümleyerek hem uydunun konumunu belirleyebilir hem de sinyalin alıcıya ulaşma süresini kestirebilir. Bu sayede hem uyduların konumları hem de alıcı ile uydular arasındaki uzaklıklar elde edilir ve bu bilgiler çözümlenerek alıcı konumu hesaplanır. Alıcı ile uydular arasında hesaplanan bu uzaklığa sözde mesafe (pseudorange) denir. Bu mesafeye sözde mesafe denmesinin sebebi ölçüm üzerinde var olan zamanlama belirsizlikleridir.

GPS uydularından yayımlanan sinyal L1 (1575.42 MHz) ve L2 (1227.6 MHz) frekanslarında bulunan iki bileşenden oluşur. Bütün uydular aynı L1 ve L2 frekansında yayım yaparlar. Ancak her uydunun sinyali o uyduya özgü olan sözde rastlantısal gürültü (PRN - Pseudo Random Noise) koduyla modüle edilmiştir. Her uydunun PRN kodu diğerlerinden bağımsız (ilintisiz) ve eşsiz olduğundan uydu sinyalleri birbirinden CDMA (Code Division Multiple Access) tekniği ile ayırt edilebilmektedir [3].

GPS uydusu tarafından gönderilen navigasyon ve zaman bilgileri kullanılarak uydunun gönderme anında geçerli olan konumu bulunabilir. Aynı zamanda PRN kodları kullanılarak sinyalin uydudan alıcıya ulaşmaya kadar ortamda geçirdiği süre de bulunabilir. Bu işlem için alıcıda uydula eş zamanlı çok hassas bir saat bulunması gerekmektedir. Ancak bu tür saatler çok maliyetli ve karmaşık olduklarından GPS alıcılarında kullanılmazlar. Bu sebeple her zaman GPS uydularıyla alıcı arasında bir zaman farkı vardır ve bu da 3 boyutlu konum dışında dördüncü bir bilinmeyen olarak hesaba katılmaktadır. Bu dört bilinmeyen bulunabilmesi için en az 4 uyduya olan mesafe bilinmelidir. Şekil 2-1'de GPS sistemi görülmektedir.

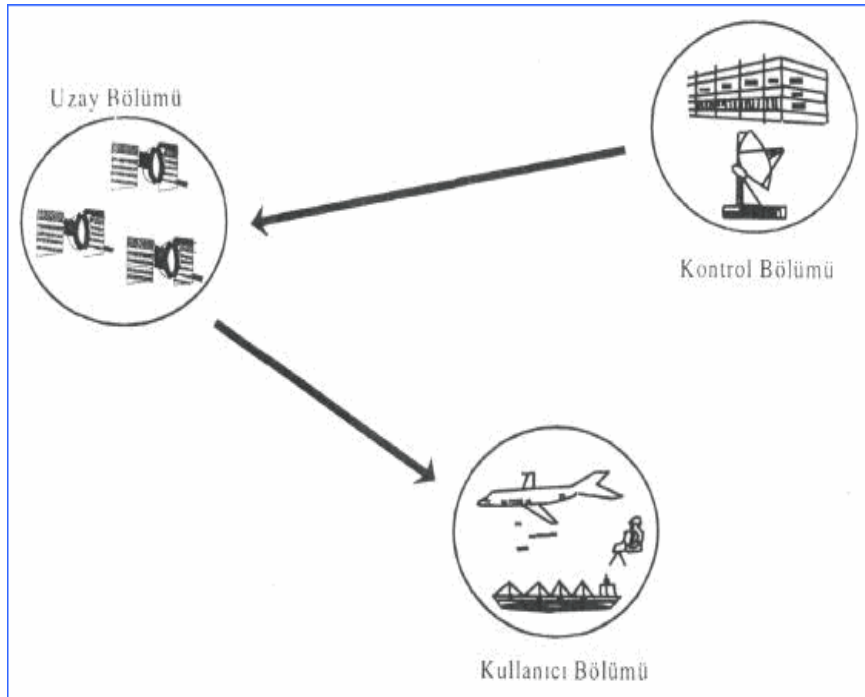
GPS alıcıları pasif cihazlardır. Bu sebeple GPS sistemi aynı anda sınırsız sayıda kullanıcıya hizmet verebilir.



Şekil 2-1 GPS Sistemi

2.3 GPS Bölümleri

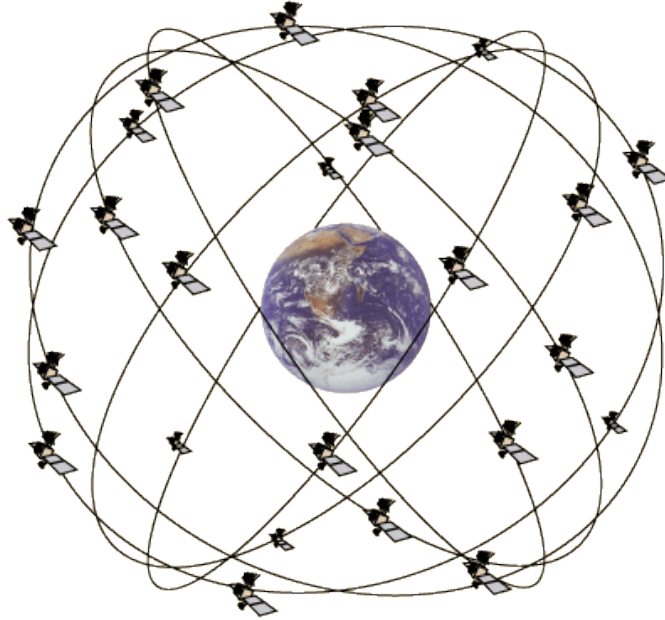
GPS sistemi; uzay bölümü, kontrol bölümü ve kullanıcı bölümü olmak üzere üç alt bölümden oluşmaktadır. GPS'in bölümleri Şekil 2-2'de gösterilmiştir.



Şekil 2-2 GPS'in Bölümleri

2.3.1 Uzay Bölümü

Uzay bölümü, ekvatorla 55 derecelik eğim yapan 6 yörünge düzlemi üzerinde 21 esas ve 3 yedek olmak üzere toplam 24 uydudan oluşması planlanmıştır [8]. Ancak, Aralık 2012 tarihinde yörüngeye yerleştirilmiş 32 adet GPS uydusu bulunmaktadır [9]. Yedek uydular, esas uydulardan birinde sorun olması halinde devreye giren uydulardır. Şekil 2-3'te GPS uydularının dağılımı resmedilmiştir.



Şekil 2-3 GPS Uzay Bölümü

Her GPS uydusu; senkronize zaman sinyallerini, tüm diğer uydulara ait konum bilgilerini, yörünge parametrelerine ilişkin bilgileri iki taşıyıcı frekanstan (L1 ve L2) yayımlar ve kontrol bölümü tarafından gönderilen bilgileri alır [8].

Uydular yeryüzünden yaklaşık 20 200 km (yer merkezinden 26 500 km) uzaklıkta olup 11 saat 58 dakikada bir tam devir yaparlar. Yeryüzünde her hangi bir yer ve zamanda gözlenebilecek en az uydu sayısı dördtür ve her bir uydu 5 saat ufuk hattı üzerinde kalır. Çoğunlukla görülebilen uydu sayısı 6 – 8 arasındadır [10]. Türkiye bölgesinde enleme göre değişmekle birlikte gözlenebilen en çok uydu sayısı 10'dur [3].

GPS Sisteminde, altı farklı tip GPS uydusu mevcut olup bunlar; Block I, Block II, Block IIA, Block IIR, Block IIF ve Block III uydularıdır. Block I uydu sinyalleri sivil kullanıma tamamen açıkken, Block II uyduları askeri güvenlik gerekçesiyle

“Seçimli Erişim” (SA - Selective Availability) ve “Aldatmaya Karşı Koyma” (A/S - Anti Spoofing) özellikleri ile donatılmış ve böylece sivil kullanıcılara kısıtlamalar getirilmiştir. Block IIR/Block IIR-M (R:Replenishment / Replacement, M:Modified) uyduları Block II uydularının yerini almak üzere üretilmiş olup ortalama ömürleri yaklaşık 10 yıldır. Bu uyduların en önemli özelliği, saatlerinin atomik (hydrogen masers) olmasıdır. Block IIR uyduları kontrol bölümünün desteği olmaksızın kullanıcılara 180 günlük navigasyon olanağı sağlama özelliğine sahiptir. Ayrıca, C/A kodun L2 frekansı üzerinden de yayınlanması uygulamasına 2003 yılından itibaren Block IIR-M uydularından başlanılmıştır [3].

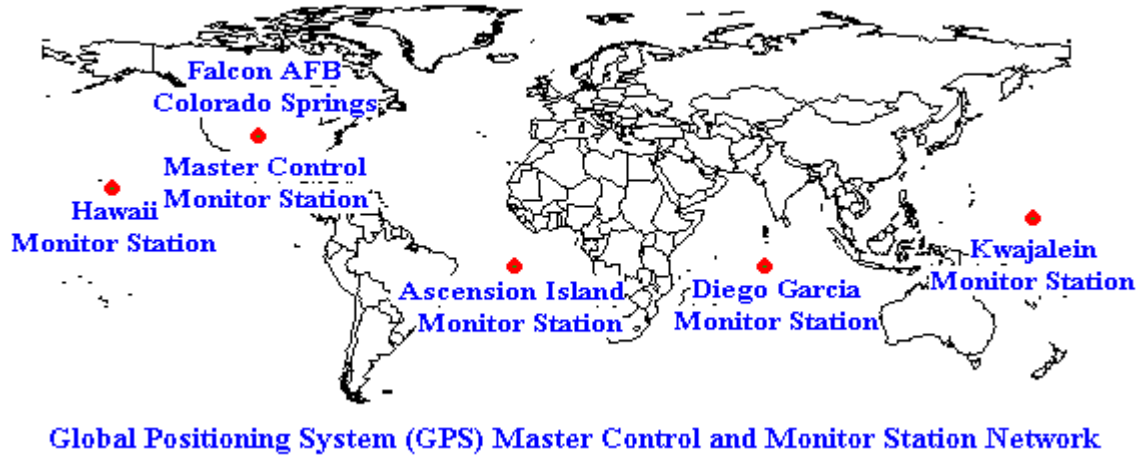
GPS uydularını tanımlamada PRN kod numaraları kullanılmaktadır. Her uydunun kendine özgü bir PRN numarası vardır ve alıcı, sinyalin hangi uydudan geldiğini bu PRN kodu sayesinde anlar.

2.3.2 Kontrol Bölümü

Ana kontrol istasyonu, yer antenleri ve izleme istasyonlarını içeren İşletim Kontrol Sisteminden (OCS - Operational Control System) meydana gelmektedir. Tüm GPS uyduları dünya üzerinde uygun dağılmış, çok hassas saatlerle donatılmış, konumu iyi bilinen 6 sabit izleme istasyonundan (Hawaii, Colorado Springs, Cape Canaveral, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein) izlenmektedir. Bu istasyonlardan Colorado Springs hem ana kontrol hem de izleme istasyonu; Hawaii, Ascension, Diego Garcia, Cape Canaveral ve Kwajalein ise sadece izleme istasyonlarıdır [3]. GPS Kontrol istasyonlarının coğrafi konumları Şekil 2-4'te görülmektedir.

GPS Kontrol Bölümü'nün temel görevleri şu şekildedir [10]:

- Uydu yörüngelerinin takip edilmesi
- Uydu hata durumlarının kontrol edilmesi ve sorunlarının çözülmesi
- GPS zamanının hassas olarak koordine edilmesi
- Uydu efemeris bilgilerinin ve saat düzeltmelerinin hesaplanması ve uydulara gönderilmesi
- Uydulara Navigasyon mesajının yüklenmesi
- Uyduların yörüngede kalması için yapmaları gereken küçük manevraların kontrol edilmesi



Şekil 2-4 GPS Kontrol İstasyonları

Ana kontrol istasyonu, tüm sistemin kontrolünden, her bir uydu için uydu efemeris bilgilerinin ve saat düzeltmelerinin hesabından sorumludur. Diğer 5 istasyon ise izleme istasyonu olarak görev yapmakta ve uydu efemerislerinin belirlenebilmesi için gerekli verileri toplamaktadır. Ayrıca Ascension, Diego Garcia, Cape Canaveral ve Kwajalein istasyonlarında efemeris bilgilerini ve saat düzeltmelerini uydulara yüklemek amacıyla yer antenleri de bulunmaktadır. Efemeris parametrelerinin GPS uydu yörüngelerine olan uyumu 4-6 saat kadar geçerli olup, bu süreden sonra bozulma zamanla orantılı olarak artmaktadır [2; 3].

Uydulara yüklenen Navigasyon Mesajı bilgileri uydu (Block) modeline bağlı olarak en az 14 günlük, en fazla 210 günlük bir süreyi kapsamaktadır [3].

2.3.3 Kullanıcı Bölümü

GPS çok farklı amaçlar için kullanılabilen bir sistem olup, GPS alıcısı barındıran her sistem bir kullanıcıdır. GPS'in kullanım alanları çok genel olarak iki ana başlık altında toplanabilir [3]:

1. Askeri Kullanım Alanları;
 - Askeri platformların navigasyonu
 - Arama – Kurtarma
 - Hedef bulma

- Füzelerin güdümü
 - ANS sistemlerinin desteklenmesi
2. Sivil Kullanım Alanları:
- Kara, deniz ve hava araçlarının navigasyonu
 - Jeodezik ve jeodinamik amaçlı ölçümler
 - Kadastral ölçümler
 - Kinematik GPS destekli fotogrametrik çalışmalar

2.4 GPS Servisleri

GPS tarafından iki ayrı hizmet sunulmaktadır: Hassas Konumlandırma Servisi (PPS - Precise Positioning Service) ve Standart Konumlandırma Servisi (SPS - Standard Positioning Service). SPS sivil kullanıma açıkken, PPS sadece askeri kullanım içindir [8].

2.4.1 Hassas Konumlandırma Servisi (PPS)

Sadece yetkili kişilerce kullanılabilen bir konum, hız ve zaman servsidir. Askeri kullanım amaçlı olarak planlanmıştır. Kimlerin kullanabileceği ABD Savunma Bakanlığı (US DOD) tarafından belirlenir.

PPS servisi, yatayda 22 metre dikeyde ise 27.7 metreden daha iyi bir konum hassasiyeti ve 200 nanosaniyeden daha iyi zaman doğruluğu sağlayacak şekilde tasarlanmıştır [8; 11].

PPS servisinde sinyaller P kodu (Precise Code) kullanılarak modüle edilir. Bu kod 10.23 MHz frekansında ve 200 gün uzunluğundadır. Bant genişliğinin yüksek olması hassasiyeti arttırmaktadır. PPS servisinin kandırılmaya karşı güçlendirilmesi ve izinsiz kullanıcıların servisi kullanmasının engellenmesi amacıyla P kodu Y kodu ile kriptolanmaktadır. Bu kriptolanmış kod P/Y ya da P(Y) şeklinde gösterilebilmektedir [2]. ABD Savunma Bakanlığı tarafından dağıtılan kripto anahtarı olmadan bu servisten yararlanmak mümkün değildir.

2.4.2 Standart Konumlandırma Servisi (SPS)

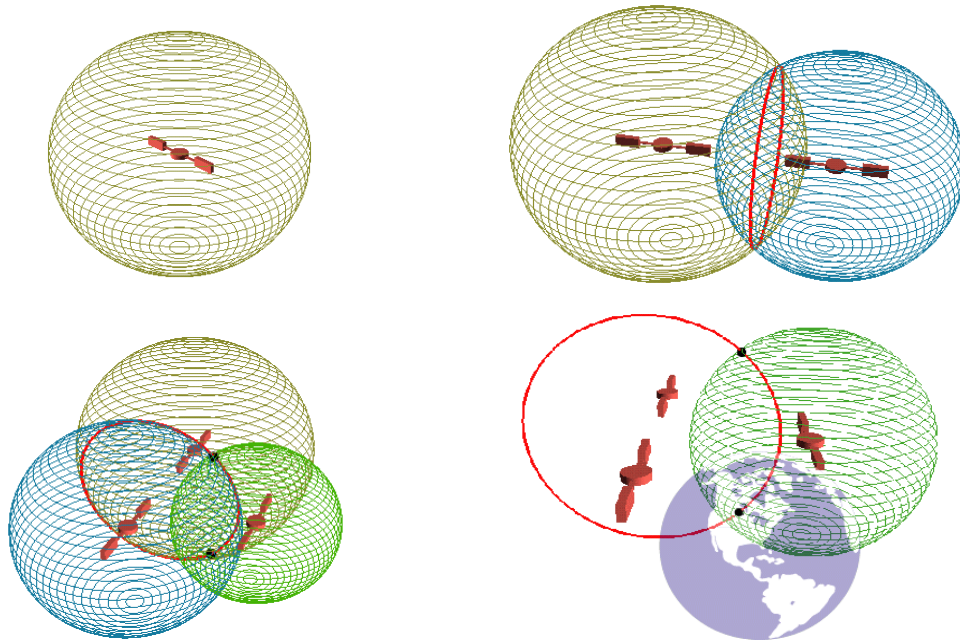
SPS servisi bütün kullanıcılara açık olup, kullanımında herhangi bir kısıtlama yoktur.

SPS servisi, yatayda 100 metre dikeyde ise 156 metreden daha iyi bir konum hassasiyeti ve 340 nanosaniyeden daha iyi zaman doğruluğu sağlayabilmektedir [8].

SPS servisinde sinyaller C/A kod (Clear Acquisition - Coarse Acquisition Code) kullanılarak modüle edilir. C/A kısa, sözde rastlantısal gürültü (PRN) kodlarıdır. 1023 bitten oluşur ve 1 milisaniye uzunluğundadır. 1.023 Mbps bit değişimi hızına sahiptirler. Bu kodlara herhangi bir kriptolama işlemi uygulanmamıştır [11].

2.5 GPS Çalışma Prensibi

GPS'in temeli geometrik bir ilkeye dayanır: "Bir noktanın konumu, eğer noktanın konumu bilinen üç objeye olan mesafesi biliniyorsa hesaplanabilir". Özetle; bir objeye olan uzaklık biliniyorsa; nokta, merkezi o obje olan bir kürenin üzerindedir. İki objeye olan uzaklık biliniyorsa; nokta, iki kürenin kesişimi olan bir çemberin üzerindedir. Üçüncü bir objeye olan uzaklık da biliniyorsa, üç kürenin kesişimi olan iki noktanın birindedir. Ancak bu noktaların sadece bir tanesi dünya üzerinde olabilecek bir noktadır. Şekil 2-5'te GPS'in çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2-5 GPS'in Çalışma Prensibi

GPS uydularından gelen sinyaller çözümlenerek, sinyallerin uydudan gönderilme zamanı bulunabilir. Sinyalin alıcıya ulaşma anı da bilinirse, sinyalin uydudan çıkıp alıcıya ulaşınca kadar geçen süre belirlenebilir. Bu süre ışık hızıyla çarpılarak, uydu ile alıcı arasındaki mesafe hesaplanmış olur. Görülen 3 uydu ile mesafe bilgisi bu şekilde hesaplanabilir. Ancak burada bütün GPS uyduları birbiri ile eş zamanlı olmasına rağmen alıcı, uydularla eş zamanlı olmayabilir. Bu sebeple hesaplanan mesafeler, bu zaman farkı ile orantılı olarak hatalı olacaktır. GPS uydularının birbiriyle eş zamanlı olması sebebiyle bu hata bütün uydu mesafeleri için aynı olacaktır.

Alıcı konumunun üç boyutlu olarak bulunabilmesi için üç uyduya ihtiyaç vardır. Alıcı ile GPS uyduları arasındaki zaman farkından kaynaklı hata da bir bilinmeyen olarak hesaplamalara gireceğinden konum bilgisi hesaplamaları için en az 4 uyduya ihtiyaç duyulmaktadır.

Alıcının 3 boyutlu konum (x_a, y_a, z_a) , her bir uydunun konumu (x_i, y_i, z_i) ve alıcı ile uyduların eşzamanlı olmamasından kaynaklı mesafe hatası b olarak gösterilirse; (2.1), (2.2), (2.3) ve (2.4) numaralı denklemler çözümlenerek alıcı konumu hesaplanabilir. ρ_i alıcı ile her uydu arasındaki sözde mesafedir.

$$\rho_1 = \sqrt{(x_a - x_1)^2 + (y_a - y_1)^2 + (z_a - z_1)^2} - b \quad (2.1)$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_a - x_2)^2 + (y_a - y_2)^2 + (z_a - z_2)^2} - b \quad (2.2)$$

$$\rho_3 = \sqrt{(x_a - x_3)^2 + (y_a - y_3)^2 + (z_a - z_3)^2} - b \quad (2.3)$$

$$\rho_4 = \sqrt{(x_a - x_4)^2 + (y_a - y_4)^2 + (z_a - z_4)^2} - b \quad (2.4)$$

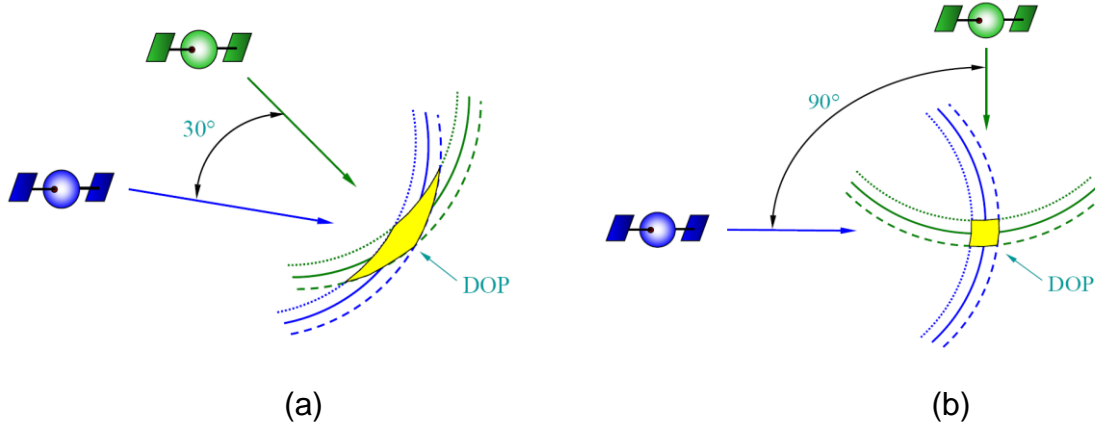
2.6 GPS Hata Kaynakları

GPS sisteminin performansını etkileyen faktörler iki grupta incelenebilir: uydu geometrisi ve mesafe ölçüm hataları. Hesaplanan pozisyonun hatası bu iki hatanın kombinasyonudur [2].

2.6.1 Uydu Geometrisi

Bir GPS alıcısı tarafından görülen ve kullanılan GPS uydularının birbirlerine ve alıcıya göre konumları hesaplanan konumun doğruluğunu etkilemektedir. Her bir

uydu ile hesaplanan sözde mesafeler, bir miktar hatayla hesaplanabildikleri için bir belirsizlik alanı oluştururlar. Bu belirsizliğe doğruluğun seyrelmesi (DOP – Dilution of Precision) denmektedir. Bu belirsizlik alanı uydu geometrisine göre değişmektedir. Şekil 2-6'da uydu geometrilerinin sebep olabileceği belirsizlik alanları gösterilmektedir. Şekil 2-6-a'da uydular birbirine yakın olduğunda belirsizliğin arttığı, Şekil 2-6-b'de ise uydular birbirinden uzak ve aralarında 90°'lik açı olduğunda belirsizliğin azaldığı görülmektedir [12].



Şekil 2-6 (a) Kötü uydu geometrisi, (b) iyi uydu geometrisi

2.6.2 Mesafe Ölçüm Hataları

Bu hatalar GPS ile konum belirlemede temel kavram olan uydu-alıcı mesafesinin (sözde mesafe) belirlenmesinde etkili olan hatalardır. Bu hata kaynakları temel olarak şu şekilde sıralanabilir [2]:

- Uydu efemeris hataları
- Uydu saati hataları
- İyonosferik etki
- Troposferik etki
- Sinyal yansıma (Multipath) etkisi
- Alıcı gürültüsü ve çözünürlüğü

Uydu efemeris hataları: GPS navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan uydu konum bilgilerinin doğruluğunun düşük olmasından kaynaklanır. Bu hata uydu konumlarının kestiriminin bir sonucu olduğundan, bu hatanın büyüklüğü kontrol

bölümü tarafından uydulara yapılan en son yükleme zamanından uzaklaştıkça artacaktır [3].

Uydu saati hataları: GPS ile konum belirlemenin temelini zaman ölçümü oluşturduğundan konum belirlemede en büyük hata kaynağını uydu saati hataları oluşturmaktadır. Ancak, GPS uydularında kararlılığı yüksek saatlerin kullanılmasıyla beraber, uydu-alıcı mesafe ölçümündeki hataların temel kaynağını uydu ve alıcı saatlerinin GPS zamanına göre yeterli doğrulukta eşzamanlı yapılamaması oluşturmaktadır. Uydu saati hatası kontrol bölümü tarafından sürekli izlenmekte ve saat düzeltmeleri günlük olarak navigasyon mesajının bir bölümü olarak yüklenmektedir [3].

İyonosferik etki: İyonosferde atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı, elektromanyetik dalgaların yayılma hızını değiştirmeye yetecek kadar çoktur. İyonlaşma ve serbest elektron yoğunluğu doğrudan güneş ışımaya bağlıdır. Buradan iyonosferik etkinin gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir. Örneğin, gece süresince olan ortalama iyonosferik etki 10 nanosaniye (~3 metre) iken gündüz 50 nanosaniye (~15 metre) kadardır [3].

İyonosfer radyo dalgalarını dağıtıcı (dispersive) bir özelliğe sahip olup, bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına bağlı olarak değişim gösterir. Bu sebeple bu iyonosferik etkinin düzeltilmesi için çift frekanslı alıcılar (L1 ve L2) kullanılabilir. Tek frekanslı alıcıların bu düzeltmeleri yapabilmeleri için navigasyon mesajında mevsimlik iyonosferik model katsayıları yayınlanmaktadır. Ancak, bu modeller kullanılarak iyonosferik etkilerin ancak yaklaşık %50'si giderilebilmektedir [3].

Troposferik etki: İyonosferin aksine troposfer tabakası elektrik yüklü olmadığından yaklaşık 30 GHz'in altındaki radyo frekansları için dağıtıcı özelliğe sahip değildir. Troposfer elektromanyetik dalgaların hızını ve yönünü değiştirir. Bu etki elektromanyetik dalganın yavaşlamasına ve eğilmesine neden olur. Her iki etki, uydu ile alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca ortam kırılma indisinin değişimine bağlı olarak dalganın gecikmesine sebep olur. Yükseliş açısı çok düşük olan (çok yatayda bulunan) uyduların sinyalleri troposferik etkiye çok fazla maruz kalacağından, uydu sinyali yüksekliğin açısı 15 derecenin altında kalan uydular hesaplamaya katılmaz [2].

Troposferik etkinin düzeltilmesi için ortam koşulları (sıcaklık, nem, basınç) ve uydu açısına bağlı modeller kullanılmaktadır. Çoğunlukla ortam koşul değerleri olarak yüksekliğe bağlı sabit değerler kullanılmaktadır.

Sinyal yansıma (Multipath) etkisi: Bu etki GPS sinyalinin uydudan alıcıya birden fazla yoldan gelmesi sonucu oluşur. Bu etki tamamen GPS alıcı antenin bulunduğu çevreye bağlıdır. Sinyal; uydudan alıcıya direk gelmesinin yanında, civardaki binalar, dağlar ve ağaçlar gibi çevresel faktörlerden de yansıyarak alıcıya gelir. Bu sinyal yansıma etkisi, herhangi bir önlem alınmadığında, P kodunda 15 metre C/A kodunda ise 150 metreye kadar hataya sebep olabilir.

Sinyal yansıma etkisinden kurtulmak için sinyalin polarizasyonu kullanılmaktadır. GPS sinyali sağ-el polarizasyonuna (RHCP - Right-Handed Circularly Polarized) sahiptir. Ancak yansıyan sinyallerin polarizasyonları değişir. Bu sebeple sadece RHCP sinyalleri alabilen antenler kullanılarak bu etki azaltılabilir [13].

Çizelge 2-1'de GPS hata kaynaklarının sözde mesafe hesaplaması üzerindeki hata miktarları verilmiştir.

Çizelge 2-1: GPS Sözde Mesafe Hata Bütçesi [14]

Kısım	Hata Kaynağı	Hata Katkısı (m, %95)	
		P-Code	C/A-Code
Uzay	Frekans Standard Kararlılığı	6.5	6.5
	D-Band Gecikme Değişimi	1.0	1.0
	Uydu ivmesindeki belirsizlik	2.0	2.0
	Diğer	1.0	1.0
Kontrol	Efemeris Tahmini ve Model Uygulanması	8.2	8.2
	Diğer	1.8	1.8
Kullanıcı	İyonosferik Gecikme Modelleme Hatası	4.5	9.8 – 19.6
	Troposferik Gecikme Modelleme Hatası	3.9	3.9
	Alıcı Gürültüsü ve Çözünürlüğü	2.9	2.9
	Multipath	2.4	2.4
	Diğer	1.0	1.0
Toplam Sistem Hatası (m, %95)		13.0	15.7 - 23.1

2.7 GPS Sinyal Yapısı

GPS sinyalleri 3 farklı bileşenden oluşmaktadır: taşıyıcı sinyal, uydulara özgü PRN kodlar (C/A ve P kod) ve navigasyon bilgisi. Bu bölümde alt başlıklar halinde bu bileşenlerle ilgili bilgiler verilecektir.

2.7.1 GPS Sinyali Özellikleri

GPS sisteminde, elektromanyetik dalgalar kullanılarak uydulardan kullanıcılara veri akışı sağlanmaktadır. Her GPS uydusu konum belirleme amaçlı olarak iki temel frekansa sahip olup bunlar L1 ve L2'dir. L1 ve L2 frekansları 10.23 MHz olan temel frekansın 154 ve 120 tam katları alınarak elde edilmiştir [3].

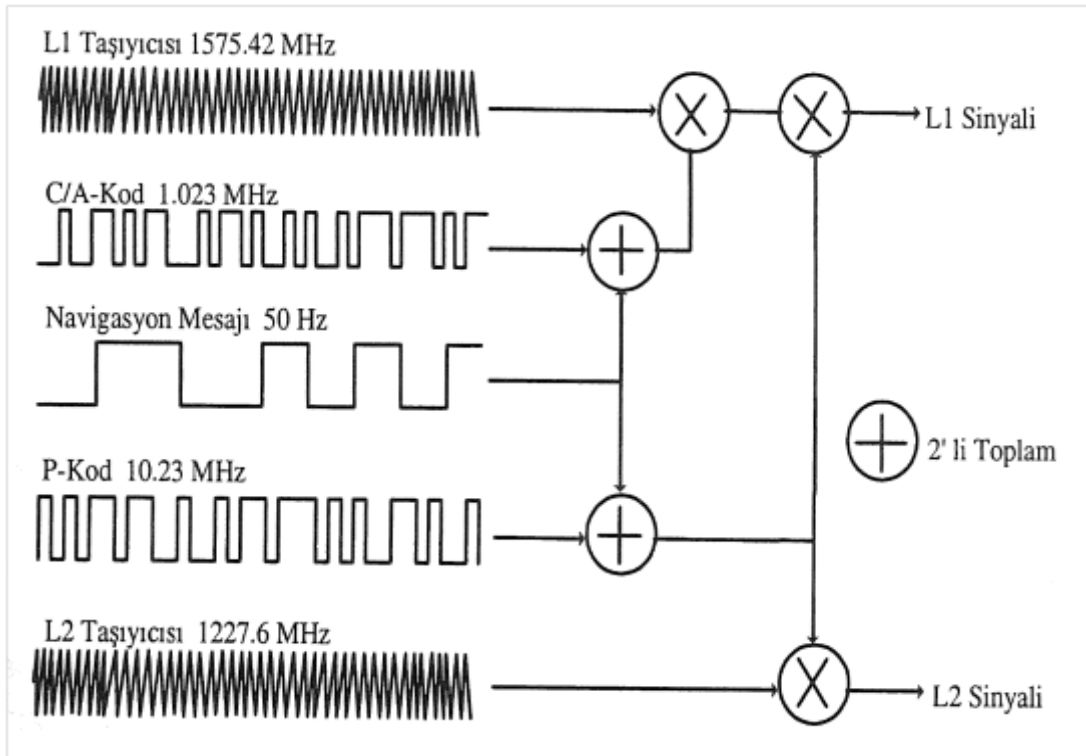
$$f_0 = 10.23 \text{ MHz} \quad (2.5)$$

$$f_{L1} = 154f_0 = 1575.42 \text{ MHz} \quad (2.6)$$

$$f_{L2} = 120f_0 = 1227.60 \text{ MHz} \quad (2.7)$$

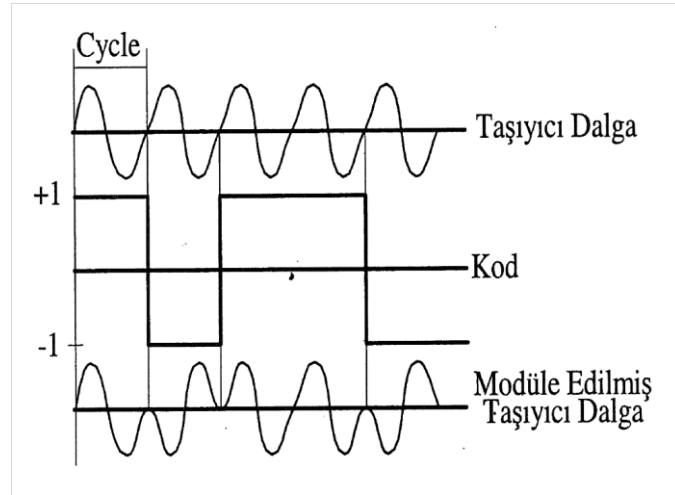
L1 Ve L2 taşıyıcı frekansları, uydu saat düzeltmeleri, yörünge parametreleri gibi bilgilerin yeryüzündeki alıcıya ulaştırılabilmesi amacıyla kodlarla ve navigasyon mesajı verileriyle modüle edilmiştir. Bu modülasyon işlemi her bir uyduya kendine özgü bir PRN kod numarası verilmiştir. Tüm uyduların aynı taşıyıcı frekansta veri yayını yapmasına karşın; uydu sinyalleri, PRN kod modülasyonu tekniği sayesinde birbirleriyle karışmamaktadır. Her uydunun PRN kodu diğerlerinden bağımsız (ilintisiz) ve eşsiz olduğundan uydu sinyalleri birbirinden CDMA tekniği ile ayırt edilebilmektedir [3; 15].

L1 taşıyıcı frekansı üzerinde iki PRN kodu ve Navigasyon Mesajı verileri modüle edilmiştir. Bu PRN kodlar, C/A kod ve P kod olarak isimlendirilmektedir. L2 taşıyıcı frekansı ise yalnızca tek bir PRN kodu (P Kod) ve navigasyon mesajı verileri ile modüle edilmiştir. Şekil 2-7'den de görülebileceği gibi L1 taşıyıcı frekansı üzerinde C/A kod, P kod ve navigasyon mesaj bilgileri, L2 taşıyıcı üzerinde ise P kod ve navigasyon mesajı bilgileri bulunmaktadır [3; 15].



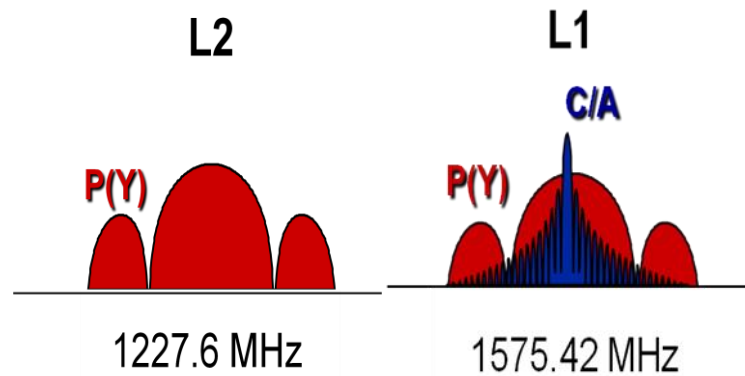
Şekil 2-7 GPS Uydu Sinyali [3]

C/A ve P kod durumları +1 ve -1'li ifadelerin karşılığı olan 0 ve 1'li (binary) değerlerle gösterilmektedir. Bu her bir 0 ya da 1'e "çip" (chip) adı verilmektedir. Bunlar hiç bir şekilde veri taşımadığı için "bit" yerine "çip" adı kullanılmıştır. Normal durumdaki taşıyıcı fazı 0 olup bunun 180 derece kaydırılması ile 1 elde edilmektedir. Başka bir deyişle, kodun durumunda her değişiklik oluşunda taşıyıcı dalgada 180 derece faz kayması oluşturularak ikili faz modülasyonu (biphase modulation) gerçekleştirilmektedir. Şekil 2-8'de ikili faz modülasyonu ile modüle edilmiş taşıyıcı sinyal görülmektedir [3; 15].



Şekil 2-8 İkili Faz (Biphase) Modülasyon [3]

Şekil 2-9'da GPS sinyallerine ait güç izge yoğunlukları (PSD – Power Spectral Density) verilmiştir. Sivil kullanıcılar tarafından kullanılan C/A kod 2.046 Mhz'lik (null-to-null) bant genişliğine sahipken askeri kullanıcıların kullandığı P kod 20.46 Mhz'lik (null-to-null) bant genişliğine sahiptir.



Şekil 2-9 GPS Sinyali Güç İzge Yoğunluğu

P ve C/A kodları birbirleriyle 90° faz farkı (quadrature) olacak şekilde L1 sinyali üzerinde taşınmaktadır. Denklem (2.8)'de k uydusundan yayımlanan sinyallerin matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$s^k = \sqrt{2P_C}(C^k(t) \oplus D^k(t)) \cos(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL1}}(P^k(t) \oplus D^k(t)) \sin(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL2}}(P^k(t) \oplus D^k(t)) \sin(2\pi f_{L2}t) \quad (2.8)$$

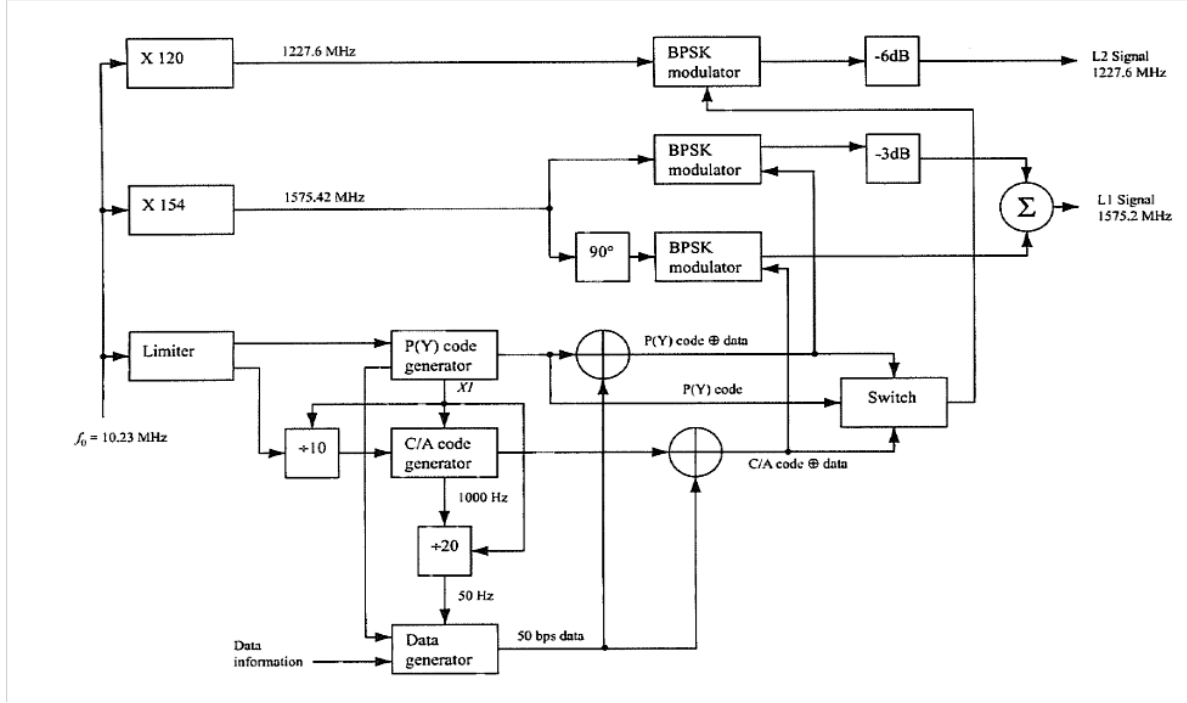
P_C , P_{PL1} ve P_{PL2} sırasıyla C/A ve P kodlu sinyallerin güçlerini, C^k ve P^k k uydusuna ait C/A ve P kod dizilimlerini, D^k navigasyon mesajını ve f_{L1} ve f_{L2} de L1 ve L2 sinyallerine ait taşıyıcı frekansı göstermektedir.

Çizelge 2-2'de yeryüzünde konuşlu bir alıcının girişinde GPS sinyallerinin güç değerleri verilmiştir. Şu ana kadar L2 sinyalinde C/A kodun varlığından bahsedilmemiş olsa da 2003 yılından itibaren GPS sistemine dahil edilen uydularda L2 sinyalinde de C/A kod mevcuttur.

Çizelge 2-2: GPS Sinyal güçleri (yeryüzünde) [6]

	P	C/A
L1	-133 dBm	-130 dBm
L2	-136 dBm	-136 dBm

Şekil 2-10'da uydularda GPS sinyallerinin üretiminin her aşaması bloklar halinde gösterilmiştir [7].

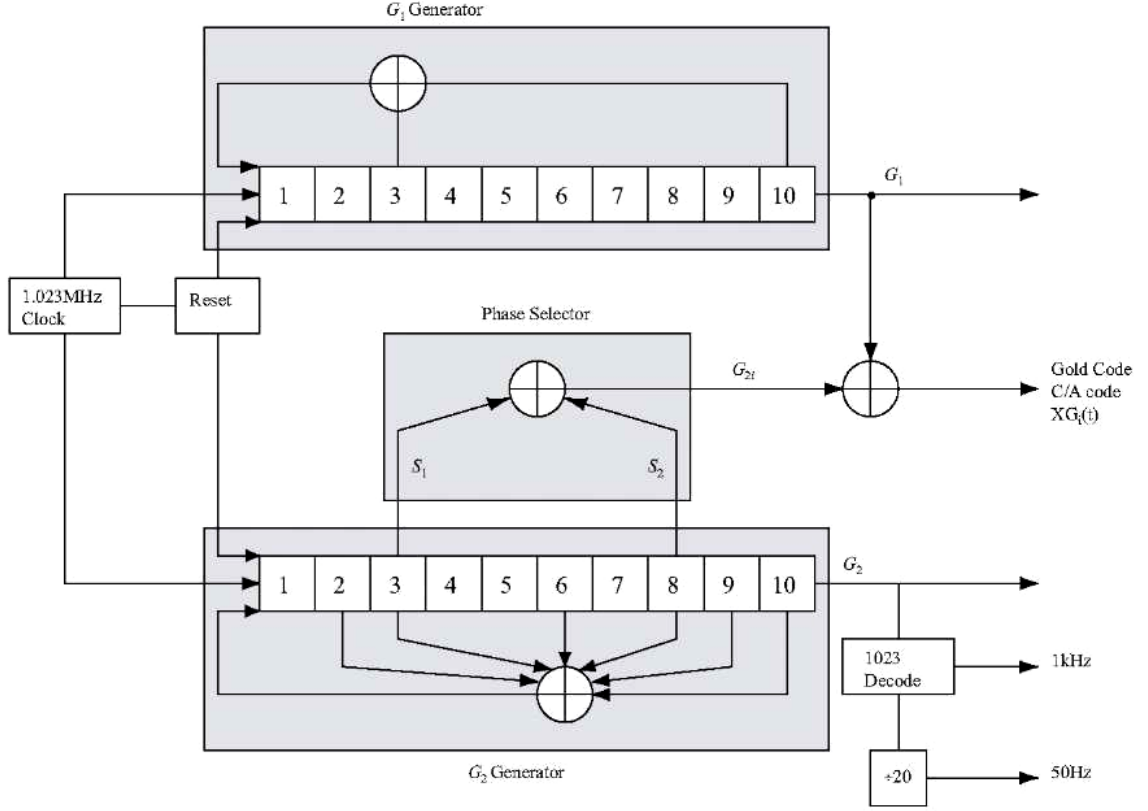


Şekil 2-10 Uydularda GPS sinyallerinin üretilmesi [7]

2.7.2 C/A Kod Özellikleri

C/A kod 1023 bitlik bir sözde rastlantısal gürültüdür (PRN). 1.023 MHz bit tekrarlama frekansına sahiptir ve 1 milisaniye uzunluğundadır. Bu bitler herhangi bir bilgi içermediği için “çip” olarak isimlendirilirler. C/A kod her 1 milisaniyede kendini tekrar etmektedir. C/A kodun “null to null” bant genişliği 2.046 Mhz’dir.

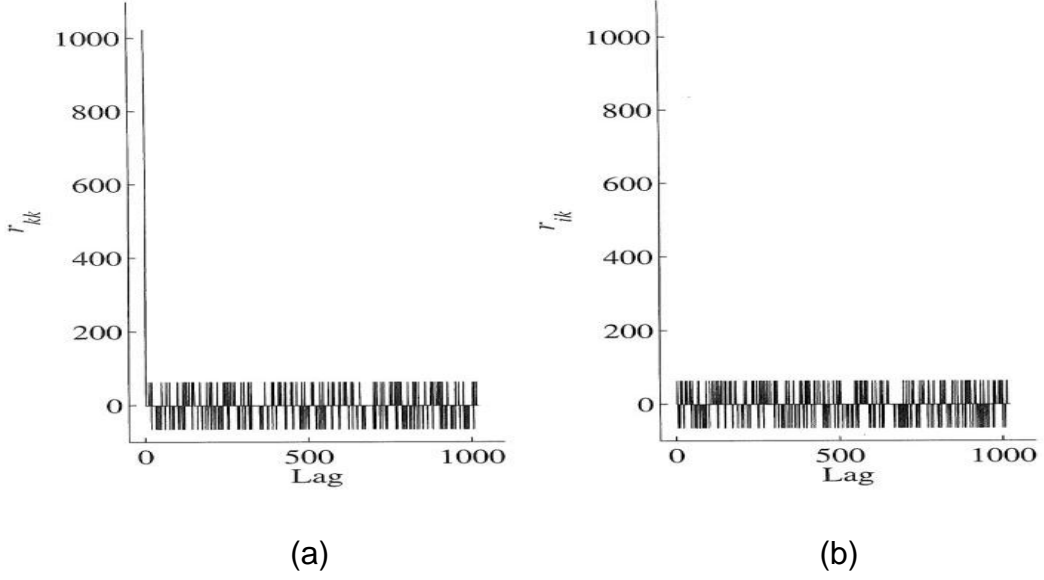
C/A kodlar Gold kodlar olarak bilinen ailenin üyeleridir. C/A kodlar G1 ve G2 olarak bilinen iki 1023 bit’lik dizinin çarpımından oluşurlar. G1 ve G2, 10 aşamalı lineer kayan yazmaç (shift register) üretilirler. Bu kayan yazmaçlar 1.023 MHz büyüklüğündeki bir saat sinyali ile sürülürler. Bu işlemlerin blok olarak gösterildiği bir C/A kod üretici şeması Şekil 2-11’de verilmiştir. Her kod dizisi rastgele olarak dağılmış 512 “bir” ve 511 “sıfır”dan oluşur [6].



Şekil 2-11 C/A kod üreticisi [7]

Her bir uydunun kendine özgü bir C/A kodu vardır. Bütün uydular için G_1 aynı iken G_2 'yi oluşturan S_1 ve S_2 her uyu için farklı hücrelerden alınmaktadır. Başka bir deyişle S_1 ve S_2 'nin pozisyonları uyu kimliğini belirlemektedir [6].

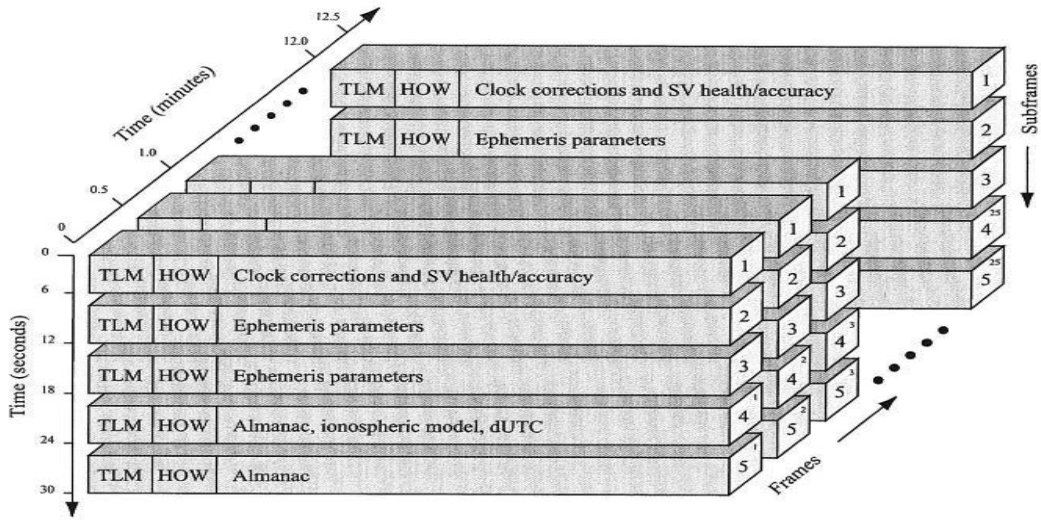
C/A kodların çapraz ilintileri (crosscorrelation) ve tam olarak üst üste oturmaları dışındaki özilintileri (autocorrelation) çok düşüktür. Yani farklı uydulara ait C/A kodlar birbirinden bağımsızdır. Şekil 2-12-a'da bir uyduya ait C/A kodunun özilintisi, Şekil 2-12-b'de ise iki farklı uyduya ait C/A kodların çapraz ilinti grafikleri verilmiştir [7]. Grafiklerden de görüldüğü gibi özilinti değeri sadece kayıklık sıfır iken 1023 diğer bütün kayıklık değerlerinde ise çok daha küçük (sadece 63, -1 veya -65 değerlerini alır) değerlerdedir. İki farklı uydunun çapraz ilintisi ise bütün kayıklıklarda çok küçük değerler olan 63, -1 veya -65 değerlerini almıştır. Bu değerler C/A kodun üretilme yönteminden kaynaklanmaktadır [6].



Şekil 2-12 (a) Aynı uydu C/A kodunun özilinti grafiği ve (b) farklı iki uyduya ait C/A kodların çapraz ilinti grafiği [7]

2.7.3 Navigasyon Bilgisi

Navigasyon bilgisi, L1 ve L2 sinyalleriyle 50 bit/saniye hızında taşınır. Şekil 2-13'te navigasyon bilgi mesajı yapısı görülmektedir.



Şekil 2-13 GPS Navigasyon Bilgi Mesajı Yapısı [7]

Navigasyon bilgi mesajı, 300 bitlik 5 alt çerçeveden (subframe) oluşan 1500 bitlik çerçevelerden oluşur. Her alt çerçeve 30 bitlik 10 sözcükten oluşur. Birinci, ikinci ve üçüncü alt çerçeveler her çerçevede tekrarlanır. Dördüncü ve beşinci alt

çerçevelerin ise 25 farklı çeşidi (aynı yapıdadırlar fakat farklı bilgiler içerirler) vardır. Bu alt çerçevelerin bilgileri 25 çerçeve ile tamamlanır. 50 bit/saniye'lik bilgi gelme hızı ile her alt çerçeve 6 saniye, her çerçeve 30 saniye ve tam bir navigasyon bilgi mesajı da 12.5 dakika sürer [7].

Her alt çerçeve Telemetry (TLM) denilen sözcük ile başlar. Her TLM sözcüğü 30 bitten oluşur ve 6 saniyede bir gelir. TLM sözcüğü bir başlıkla başlar, 16 bitlik ayrılmış bir kısımla devam eder ve 6 eşlik (parity) bitiyle sonlanır. TLM başlık bitleri her alt çerçevenin başlangıcını gösterdiği için pozisyon hesaplamalarında önemlidir [16].

Her alt çerçevenin ikinci sözcüğü Handover (HOW) şeklinde tanımlanır. HOW kelimesinin ilk 17 biti hafta zamanının (Time of Week) kırpılmış bir versiyonunu içerir. Sonrasında kandırılmaya karşı bazı bitler vardır. Sonraki 3 bit alt çerçevenin numarasını içerir. Böylece 5 alt çerçeveden hangisinin okunduğu anlaşılır. Son olarak eşlik bitleri yer alır [7; 16]

TLM ve HOW sözcüklerinden sonra her alt çerçevede 8 sözcük daha bulunur. Bu 8 sözcük 5 alt çerçevenin her birinde farklı bilgiler içerir.

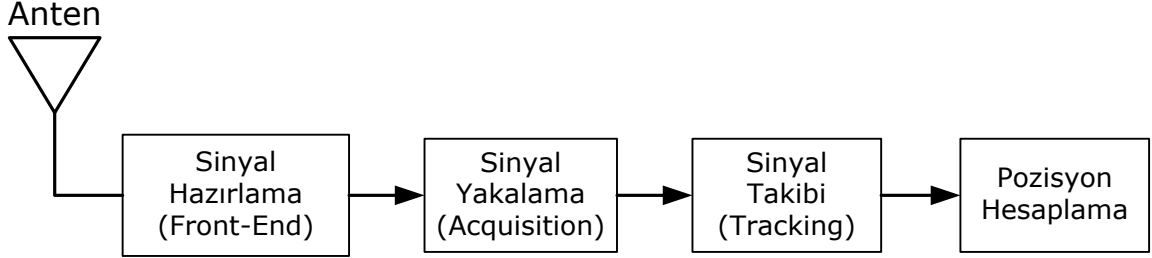
İlk alt çerçevede uydu saat düzeltmesi ve sağlık bilgileri bulunur. Bu bilgiler kullanılarak sinyalin uydudan çıkış zamanı hesaplanır ve bilgilerin güvenilir olup olmadığına karar verilir [5; 7; 16].

İkinci ve üçüncü alt çerçevelerde efemeris bilgisi bulunur. Efemeris, uyduların yörüngelerinin hesaplanması için gerekli olan bilgileri içerir. Efemeris ve zaman bilgileri kullanılarak, uydunun sinyali gönderdiği andaki konumu hassas olarak hesaplanabilir. Bu alt çerçevelerde, her uydu sadece kendisine ait efemeris bilgisini gönderir [5; 7; 16].

Dördüncü ve beşinci alt çerçeveler 25 çerçevenin her birinde farklı bilgiler içerir ve 12.5 dakikada bir kendini tekrar eder. Bu 25 çerçevedeki bilgiler bir araya gelince almanak bilgisi ile beraber iyonosferik model parametreleri ve UTC (uluslararası zaman) hesaplama bilgilerini içerir. Almanak, bütün uydular için düşük doğrulukta efemeris ve saat bilgilerini içerir. Bütün uydular aynı almanak bilgisini gönderirler [7].

3 GPS ALICI BİLEŞENLERİ

GPS alıcıları; uydudan gelen sinyalleri toplayan anten, sinyalleri işlenebilecek hale getiren bir sinyal hazırlama katı, sinyallerin yakalandığı, takip edildiği ve nihayetinde konum hesaplamalarının yapıldığı kısımlardan oluşmaktadır. Şekil 3-1'de bir GPS yapısı bloklar halinde gösterilmiştir.



Şekil 3-1 GPS Alıcı Yapısı

3.1 GPS Anteni

Bir GPS alıcısının performansı, alıcıya ulaşan sinyalin gücüne, kayıpsız olmasına ve istenmeyen sinyallerden arınmış olmasına bağlıdır. Bu gibi özellikler iyi bir GPS anteni ile sağlanabilir.

GPS antenleri, GPS sinyalleri için uygun frekanstaki ve bant genişliğindeki sinyalleri alıp bunun dışındaki sinyalleri baskılayabilmelidir.

GPS sinyalleri sağ-el polarizasyonuna (RHCP - Right-Handed Circularly Polarized) sahip yapıdadır ancak başka bir yapıdan yansıdıkları zaman (multipath) bu polarizasyon değişir. Bu sebeple GPS antenleri yansıyan sinyalleri almamak için sadece sağ-el polarizasyonuna uyumlu olarak tasarlanabilirler [2].

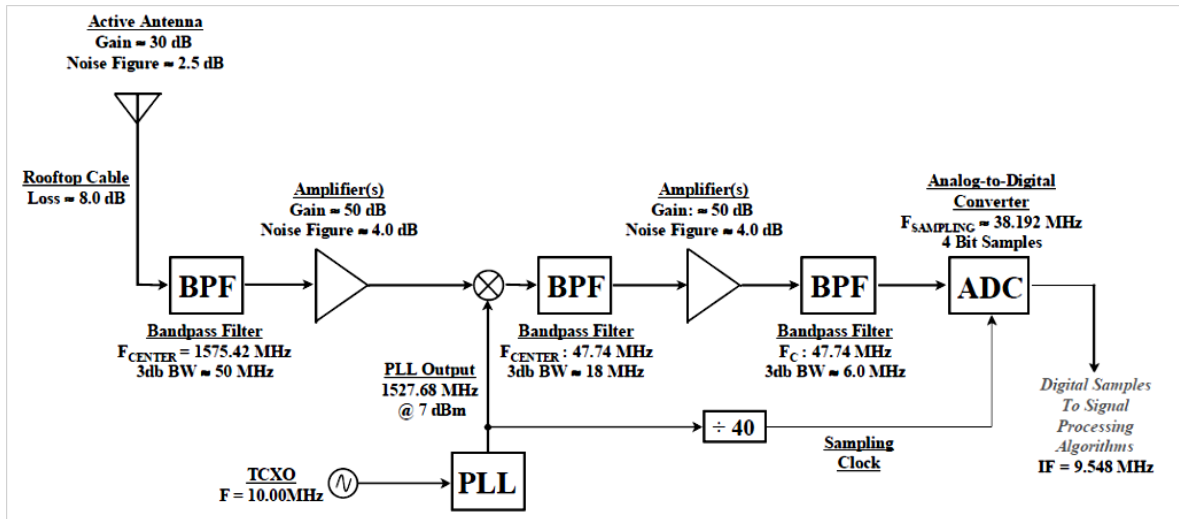
GPS antenlerinin bazıları yeryüzünden gelen istenmeyen sinyallerden kurtulmak için sadece belli bir açının (yer ile 10° - 20°) üzerinden gelen sinyalleri alacak yapıdadırlar. Bu açının altında gelen sinyaller ya iyonosferde çok fazla kırılmış ya da yeryüzünden yansımış sinyallerdir [7]. Bu işlem antende yapılamadığı zaman yazılım ile de yapılabilir.

Bütün bu özelliklerin dışında GPS antenleri kazançlarına göre aktif ve pasif olmak üzere iki çeşittir. Pasif antenler aldığı sinyale herhangi bir kazanç katmadan iletirken, aktif antenler sinyalleri güçlendirirler. GPS anteni ile alıcı arasında birkaç

metreden fazla mesafe olduğu durumlarda, kablodan kaynaklı kayıpları telafi edebilmek için aktif anten kullanılmalıdır. Ancak, aktif antenler pasif antenlerin aksine çalışmak için güç beslemesine ihtiyaç duyarlar.

3.2 Sinyal Hazırlama (Front-End)

Anten ile alınan GPS sinyalinin, GPS alıcısı tarafından işlenebilmesi için güçlendirilip, frekansının düşürülmesi gerekmektedir. Şekil 3-2'de GPS L1 sinyalini antenden alarak 9.548 MHz ara frekansına indiren ve 4 bitlik sayısal veriye çeviren örnek bir devre gösterilmektedir [7].



Şekil 3-2 GPS Sinyal Hazırlama Şeması

Sinyal hazırlama devresinin ilk bileşeni bir bant-geçiren filtredir (BPF).

Filtreler, sadece belli frekanstaki sinyalleri geçirip diğer frekansları baskılayan birimlerdir. Filtrelerin bu devredeki görevi, alınan sinyalde GPS için anlamlı olan frekansları geçirip, istenmeyen frekansları baskılamaktır. Şekil 3-2'de verilen devre GPS'in L1 frekansını alıcıya ileten bir devre olduğundan ilk bant-geçiren filtrenin merkez frekansı 1575.42 MHz ve bandı da 50 MHz olarak seçilmiştir [7; 17].

Yükselteçler (Amplifiers), sinyalin genliğini yükselten bileşenlerdir. İdeal bir yükselteç sadece sinyalin genliğini yükseltir ve diğer özelliklerini değiştirmez. Ancak, pratikte bütün yükselteçler sinyallere bir miktar gürültü katarlar. Bir yükselteç üç parametre ile tanımlanabilir [7; 17]:

1. *Kazanç (gain)*, çoğunlukla dB cinsinden ifade edilir.
2. *Belirlenmiş frekans bandı*, her frekansı aynı oranda yükseltmezler.

3. *Gürültü katsayısı (noise figure)*, sinyale kattığı gürültü miktarıdır. Çoğunlukla dB olarak ifade edilir.

Yerel Osilatörün (Local Oscillator) temel görevi 1575.42 MHz frekansındaki L1 sinyalini daha düşük bir ara frekansa indirmektir. Bu sayede GPS sinyali işlenmesi daha kolay bir bölgeye taşınmış olmaktadır. Bu işlem trigonometrik bir temele dayanmaktadır. Frekansları ω_1 ve ω_2 olan iki sinüzoidal sinyal çarpıldığında denklem (3.1)'de görüldüğü gibi, frekansları $(\omega_1 - \omega_2)$ ve $(\omega_1 + \omega_2)$ olan iki sinyalin toplamı oluşur.

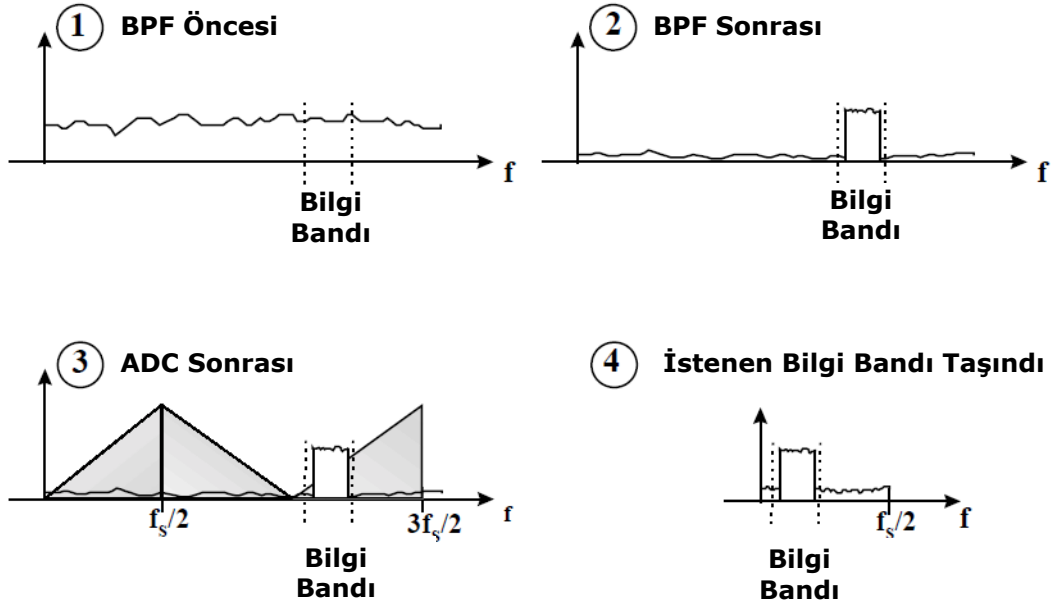
$$\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t) + \frac{1}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2)t) \quad (3.1)$$

Şekil 3-2'de sinyal 47.74 MHz'lik ara frekansa indirilmiştir. ω_1 L1 sinyalinin frekansı (1575.42 MHz) olarak kabul edilirse; yerel osilatör frekansı, ω_2 (1575.42 -47.74) MHz = 1527.68 MHz olarak seçilmiştir [7].

Bu aşamadan sonra kullanılan bant-geçiren filtrenin amacı, yüksek frekans bileşenli sinyali baskılayıp sadece istenen ara frekanstaki sinyali geçirmektir.

GPS sinyalinin ara frekansa indirilmesinin diğer bir sebebi de L1 bandı için gerekli olan 2-8 MHz'lik banda inebilmektir. Üretilen filtrelerin çoğunluğunun, merkez frekansının bandına oranı 50'den küçüktür. Bu sebeple 1575.42 MHz merkez frekanslı bir bant-geçiren filtrenin sahip olabileceği en düşük bant (1575.42 / 50 = 31.5) MHz'dir. Bu sebeple önce ara bir frekansa indirilir ve sonra da rahatlıkla istenen bantta filtrelenir [7].

Analog-Sayısal Çevrici (ADC), sinyalin sayısal ortama geçirilerek yazılım tarafından işlenmesine olanak sağladığı için yazılım tabanlı GPS alıcıları için önemli bir bileşendir. Şekil 3-2'deki devrede 47.74 MHz frekansındaki sinyal daha düşük olan 38.192 MHz örnekleme frekansında sayısala çevrilmiş ve sonuçta 9.548 MHz'lik ara frekansa indirilmiştir. Bu yöntem bant-geçiren örnekleme (Bandpass sampling, undersampling) denmektedir. Bu yöntemle, dar bantlı bir sinyal, kasıtlı olarak örtüşme (aliasing) sağlanarak daha düşük frekansla örneklenir ve başka bir ara frekansa taşınmış olur [18; 19]. Şekil 3-3'te bant-geçiren örnekleme frekans bandında gösterilmiştir.



Şekil 3-3 Bant-Geçiren Örnekleme

3.3 Sinyal Yakalama (Acquisition)

Alıcıya ulaşan sinyalde, 1575.42 MHz merkez frekanslı ve 2.046 MHz (sinyal yakalama cihazına göre değişebilir) bantlı bütün sinyaller iç içe geçmiş durumdadır. Sinyal yakalama kısmında; bu sinyalde, hangi uyduların sinyallerinin var olduğu ve bu sinyallerin hangi taşıyıcı frekansta ve PRN kod kayıklığında geldiği bulunur. Sinyal yakalama kısmı, her uydu için taşıyıcı frekansın ve kod kayıklığının arandığı iki boyutlu bir arama yöntemi olarak da tanımlanabilir. Bu aramalarda PRN kodun daha önceki bölümlerde anlatılan ilinti özelliği kullanılmaktadır.

Sinyaller, her uydudan 1575.42 MHz taşıyıcı frekansı ile yayımlanıyor olsa da uydu ve alıcının hareketinden kaynaklanan Doppler kayması sonucunda, alıcıya ulaşan sinyallerin frekansında bir miktar değişim olur. Dünya üzerinde hareket eden en hızlı aracın GPS sinyali üzerinde oluşturabileceği Doppler kayması 10 kHz'dir [7]. Bu sebeple frekans kayması ± 10 kHz'lik bir bant içinde yapılmalıdır. Sinyalin doğru olarak çözümlenebilmesi için taşıyıcı frekansın hassas olarak bulunması gerekir.

Sinyalin alıcıya ulaştığı anda, 1023 çip uzunluğundaki PRN kodun neresinde olduğu, hem sinyalin doğru çözümlenebilmesi hem de alıcı ile uydu arasındaki sözde mesafenin doğru hesaplanabilmesi için önemlidir.

Sinyal yakalama için üç yöntemden söz edilmektedir. Bu yöntemler; geleneksel yöntem, FFT yöntemi, geciktirme ve çarpma yöntemi (Delay and Multiply Method) şeklindedir. Geleneksel yöntemde sinyal yakalama, donanımsal olarak zaman alanında yapılmaktadır. FFT metodu geleneksel yöntemdeki hesaplamaların hızlandırılmış halidir bu sebeple yazılım tabanlı alıcılarda kullanımı tercih edilir [20]. Geciktirme ve çarpma yöntemi FFT yöntemine göre daha hızlıdır ancak zayıf sinyallerde kötü bir performans sağlar. Bu iki metod arasında hız ve hassasiyet ödünleşimi vardır [6; 21].

3.3.1 Geleneksel Yöntem

Bu yöntem, zaman alanında sinyallerin kaydırılarak, her uydunun PRN kodlarıyla ilintilerine bakma esasına dayanmaktadır. Sadece toplama ve çarpma işlemlerine ihtiyaç duyulduğundan uygulanması çok basittir ve bu sebeple donanımsal alıcılarda tercih edilir. Her ne kadar işlemler basit olsa da, bütün uydular için zaman bölgesinde böyle bir arama yapmak oldukça zaman almaktadır. Bu sebeple yazılım tabanlı alıcılarda kullanımı tercih edilmemektedir. Uygun frekansla çözümlenmiş x sinyali ile ilgili uydunun PRN kodu y 'nin n kadar kayık durumu arasındaki ilinti z , şu şekilde bulunur [7; 20]:

$$z(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) y(m+n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(-m) y(m-n) \quad (3.2)$$

3.3.2 FFT Yöntemi

FFT alma yönteminde, geleneksel yöntemde zaman alanında yapılan ilinti alma işlemi, her iki sinyalin Fourier dönüşümü alınarak frekans alanında yapılır. N uzunluğundaki $x(n)$ ve $y(n)$ sinyallerinin Fourier dönüşümleri şu şekilde yapılır [7]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad ve \quad Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.3)$$

Zaman alanında tek bir kayıklık değeri için, denklem (3.2)'deki şekilde yapılan ilinti alma işlemi, frekans alanında bütün kayıklık değerleri için şu şekilde yapılır [7]:

$$\begin{aligned}
 Z(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(-m) y(m-n) e^{-j2\pi kn/N} \\
 &= \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{j2\pi km/N} \sum_{n=0}^{N-1} y(m+n) e^{-j2\pi k(m+n)/N} = X^*(k)Y(k) \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

Denklem (3.4)'te, (*) karmaşık eşlenik anlamına gelmektedir.

Frekans alanında elde edilen $Z(k)$, ters Fourier dönüşümü ile zaman alanına çevrilir ve bütün kayıklık değerleri için ilinti sonuçları bir defada bulunmuş olur.

FFT yöntemi ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler, blok ve akış şemaları ile test sonuçları bölüm 4.2.1'de verilecektir.

3.3.3 Geciktirme ve Çarpma Yöntemi

Bu yöntemin temel amacı GPS sinyali üzerindeki frekans bilgisini yok edip PRN kodunun başlangıç yerini bulmaktır. PRN kodunun kayıklığı bulunduğundan sonra, sinyal çözümlenerek FFT'si alınır ve frekans bilgisine ulaşılır. GPS sinyali $s(t)$ olarak kabul edilirse, geciktirme ve çarpma yöntemi şu şekilde anlatılabilir:

$$s(t) = C_s(t) e^{j2\pi ft} \quad (3.5)$$

$C_s(t)$, s uydusuna ait C/A PRN kodunu göstermektedir. Bu sinyalin geciktirilmiş hali şu şekilde gösterilebilir:

$$s(t - \tau) = C_s(t - \tau) e^{j2\pi f(t - \tau)} \quad (3.6)$$

τ : gecikme miktarı. $s(t)$ ve geciktirilmiş hali $s(t - \tau)$ 'nin karmaşık eşleniği ile çarpımı:

$$s(t)s(t - \tau)^* = C_s(t) C_s(t - \tau)^* e^{j2\pi ft} e^{-j2\pi f(t - \tau)} \equiv C_n(t) e^{j2\pi f\tau} \quad (3.7)$$

$$C_n(t) \equiv C_s(t)C_s(t - \tau)^* \quad (3.8)$$

$C_n(t)$, bir PRN kodun ve geciktirilmiş halinin çarpımından oluşan yeni bir PRN kod olarak kabul edilebilir. Bu yeni kod da diğer PRN kodlarıyla aynı özilinti ve çapraz ilinti özelliklerini taşımaktadır ve kod kayıklığı da sinyalin PRN kodunun kayıklığı ile aynıdır. Bu yeni kodun kayıklığı bulunarak sinyalin kayıklığı bulunabilir. Denklem

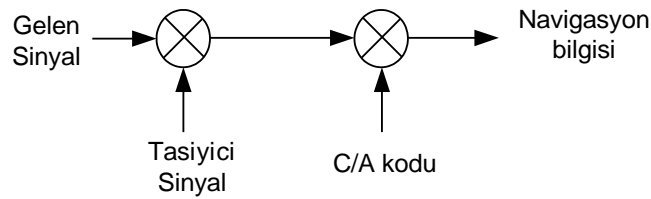
(3.7)'de verilen yeni sinyalin herhangi bir frekans bileşeni olmadığından bu sinyal için Doppler kayıklığı bandında bir arama yapmaya gerek yoktur. Bu sebeple tek yapılması gereken kod kayıklığını aramaktır. Kod kayıklığı, aynı şekilde her uydunun PRN kodunun, τ kadar kaydırılmış haliyle çarpılıp bu yeni sinyal ile ilintisine bakılarak bulunabilir [6].

Bu yöntemin problemi, gürültülü olan iki sinyalin çarpılmasıyla gürültü seviyesinin yükselmesi ve sinyalin yakalanmasının daha da zorlaşmasıdır. Bu problemin azaltılması için, 1 milisaniyelik sinyal yerine en az 5 milisaniyelik sinyal kullanılması gerekmektedir [6].

Geciktirme ve çarpma yöntemi ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler, blok ve akış şemaları ile test sonuçları bölüm 4.2.2'de verilecektir.

3.4 Sinyal Takibi (Tracking)

Uyduların yakalanması işlemi esnasında her uydudan gelen sinyalin taşıyıcı frekansı ve PRN (C/A) kod kayıklığı kabaca bulunur. Takip işleminin amacı bu bilgileri daha hassas bir şekilde bulmak, takip etmek ve sinyaldeki navigasyon bilgisini çözümlenektir (ve her uydu ile olan sözde mesafeler için bir kestirim yapılmasına olanak sağlamaktır). Bu çözümlenemin temel yapısı Şekil 3-4'te gösterilmiştir [7].



Şekil 3-4 Çözümleneme yapısı

f_{L1} ve f_{L2} GPS'ten gelen L1 ve L2 sinyallerinin taşıyıcı frekansları olsun. Bu sinyallerin güçleri C/A kod için P_C , P kod için de P_{PL1} ve P_{PL2} şeklinde yazılabilir. k uydusu için C/A kod dizilimini $C^k(t)$, P(Y) kod için dizilimi $P^k(t)$ ve navigasyon kodu dizilimini de $D^k(t)$ olarak gösterecek olursak. GPS sinyali şu şekilde gösterilebilir [7]:

$$s^k(t) = \sqrt{2P_C}C^k(t)D^k(t)\cos(2\pi f_{L1}t) + \sqrt{2P_{PL1}}P^k(t)D^k(t)\sin(2\pi f_{L1}t) \\ + \sqrt{2P_{PL2}}P^k(t)D^k(t)\sin(2\pi f_{L2}t) \quad (3.9)$$

Bu sinyal (L1 bandı) ara frekansa indirildikten sonra aşağıdaki hale gelecektir:

$$s^k(t) = \sqrt{2P_C}C^k(t)D^k(t)\cos(\omega_{IF}t) + \sqrt{2P_{PL1}}P^k(t)D^k(t)\sin(\omega_{IF}t) \quad (3.10)$$

ω_{IF} sinyalin indirildiği ara frekanstır.

Bu sinyal bir A/D çevirici ile sayısal ortama aktarılmaktadır. Burada amaç C/A kodun sayısal ortama aktarılması olduğundan bant genişliği C/A kodun bant genişliğinden daha büyük olan bir A/D çevirici kullanılmaktadır. Ancak, kullanılan A/D çeviricinin bandı yeterince geniş olmadığından bandı geniş olan P koda ait bileşenler bozulmaktadır. Böylece sinyal aşağıdaki hali alacaktır [7]:

$$s^k(n) = C^k(n)D^k(n)\cos(\omega_{IF}n) + e(n) \quad (3.11)$$

Bu sinyalden navigasyon bilgisini (D^k) alabilmek için taşıyıcı sinyalin ve C/A kodun çözümlenmesi gerekmektedir. Şekil 3-4'te görülen ilk adım uygulanarak taşıyıcı sinyal ile çarpma sonucunda sinyal taşıyıcı sinyalden arındırılıp temel banda indirilebilir [7].

$$s^k(n) \cos(\omega_{IF}n) = C^k(n)D^k(n)\cos(\omega_{IF}n) \cos(\omega_{IF}n) \quad (3.12)$$

$$= \frac{1}{2} C^k(n)D^k(n) + \frac{1}{2} \cos(2\omega_{IF}n) C^k(n)D^k(n) \quad (3.13)$$

Oluşan sinyalin ilk bölümü navigasyon sinyalinin PRN kodu ile çarpılmış, ikinci kısmı ise taşıyıcı ara frekansın 2 katı ile modüle edilmiş halidir. Bu sinyal bir düşük geçirgenlikli filtreden geçirilerek ikinci kısım atılabilir. Düşük geçirgenlikli filtre çıkışı

$$\frac{1}{2} C^k(n)D^k(n) \quad (3.14)$$

olarak verilir [7].

Bir sonraki adım $C^k(n)$ kodundan kurtulmak olacaktır. Bu adım sinyalin üretilen kodla ilintilendirilmesiyle yapılabilir. Üretilen kod sinyaldeki kodun aynısı ise bu ilintinin sonucu navigasyon bilgisi olacaktır [7]:

$$\sum_{n=0}^{N-1} C^k(n)C^k(n)D^k(n) = N D^k(n) \quad (3.15)$$

N, sinyal takibi için kullanılan sinyal parçasındaki nokta sayısıdır.

Bu işlemlerin doğru şekilde yapılabilmesi için sinyalin içerdiği taşıyıcı frekans ve PRN kodunun aynısı ile çözümlenmesi gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için geri besleme hatlarına ihtiyaç vardır [7].

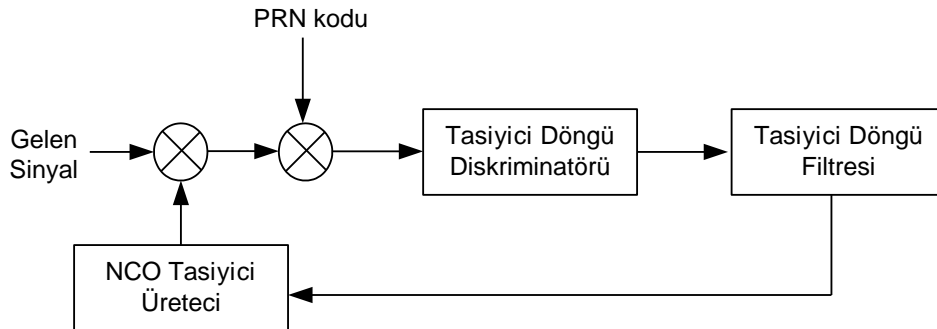
Sinyal takibi için iki yöntemden söz edilmektedir. Geleneksel yöntem ve Blok Ayarlamalı Senkronize Edilmiş Sinyal (BASS - Block Adjustment of Synchronizing Signal) [6].

3.4.1 Geleneksel Yöntem

Geleneksel sinyal takibi yönteminde, kod takibi için erken-geç takip döngüsü (early-late tracking loop) adında bir gecikme kilitleme döngüsü (DLL - Delay Lock Loop) kullanılır. DLL devresinde gelen sinyal, kodun 3 farklı fazındaki haliyle ilintilendirilir ve faz kayması bulunarak düzeltilir. Üretilen bu kodlar arasındaki faz farkları çoğunlukla $\pm\frac{1}{2}$ çip olarak seçilir [7].

Geleneksel yöntemde, taşıyıcı frekans takibi için evre kenetleme döngüsü (PLL - Phase Locked Loop) ya da frekans kenetleme döngüsü (FLL - Frequency Locked Loop) kullanılmalıdır [7].

Şekil 3-5'te temel bir evre kenetleme döngüsü görülmektedir. Bu devrede gelen sinyal taşıyıcı frekansından ve PRN kodundan arındırıldıktan sonra döngü ayırtıcısına (discriminator) girmektedir ve burada taşıyıcı sinyalin faz hatası bulunmaktadır. Ayırtıcının çıkışı faz hatasıdır ya da faz hatasının bir fonksiyonudur ve çoğunlukla bir filtreden geçirilerek taşıyıcı frekansı üreten numerik kontrollü osilatöre (NCO - Numerically Controlled Oscillator) geri besleme olarak verilir. Bu sayede gelen sinyalin taşıyıcı frekansı sürekli doğru olarak çözümlenebilir [7].



Şekil 3-5 Temel bir PLL devresi

Geleneksel yöntem ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler, blok ve akış şemaları ile test sonuçları bölüm 4.3'te verilecektir.

3.4.2 Blok Ayarlamalı Senkronize Edilmiş Sinyal (BASS) Yöntemi

Bu yöntemle ilgili, genel çalışma mantığını kapsayacak şekilde kısaca bilgi verilecektir [6; 22].

Bu yöntemde taşıyıcı frekans takibi DFT ile yapılmaktadır. Gelen sinyal $x(n)$ ise gelen sinyalin DFT'si $X(k)$ şu şekilde yazılabilir:

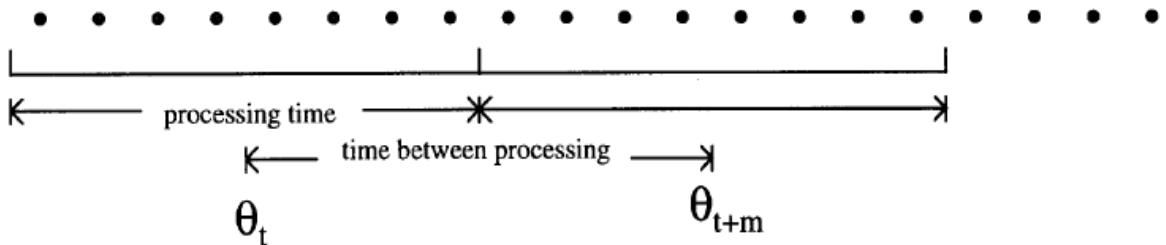
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi nk/N} \quad (3.16)$$

Burada k belirli bir frekansı, N ise sinyaldeki nokta sayısını göstermektedir. Gelen sinyal, $x(n)$ sinüsoidal bir sinyal ise, DFT'nin en büyük olduğu ($|X(k_i)|$) yer gelen sinyalin frekansını gösterecektir. DFT'nin bu noktadaki reel (Re) ve sanal (Im) bileşenleri sinyalin başlangıç anındaki fazı olan θ 'yi bulmak için kullanılabilir.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}[X(k_i)]}{\text{Re}[X(k_i)]}\right) \quad (3.17)$$

Bu işlemi sadece sinyalin frekansına eşit olan noktada yapmak yeterli olacaktır. İlk başlangıç frekansı sinyal yakalama kısmından alınarak takip başlatılabilir.

Bu yöntemde belli uzunluktaki bir parça sinyalin DFT'si alınarak başlangıç fazı bulunur, daha sonra bir sonraki sinyal parçasının DFT'si alınarak onun da başlangıç fazı bulunur ve bu iki faz arasındaki fark kullanılarak frekans değişimi düzeltilir. İki sinyal parçası arasındaki faz farkı Şekil 3-6'da görülmektedir.



Şekil 3-6 İki sinyal bloğu arasındaki faz farkı

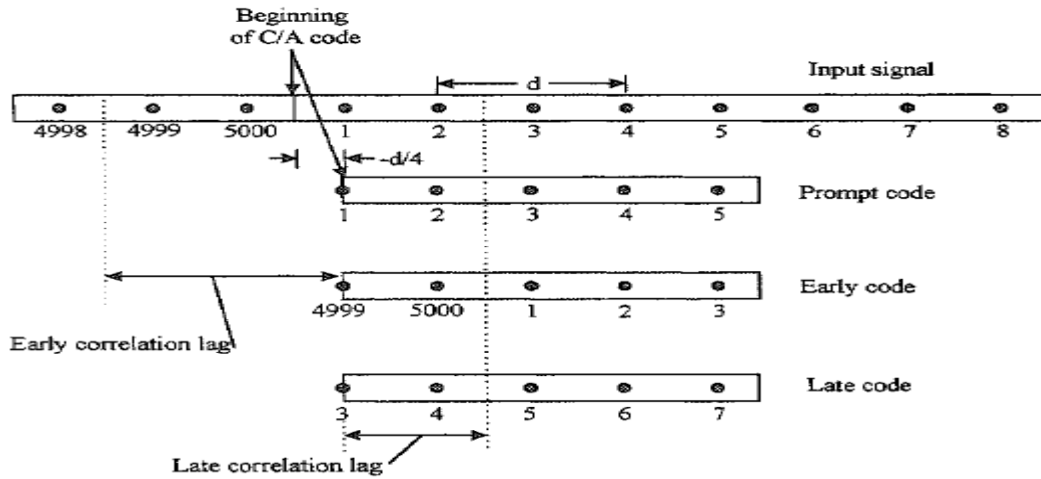
Aralarında m kadar zaman farkı olan iki sinyal parçasının faz açıları θ_n ve θ_{n+m} olarak kabul edilirse, bu m kadarki zamanda taşıyıcı frekans değişimi Δf şu şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta f = \frac{\delta\theta}{m} = \frac{\theta_{n+m} - \theta_n}{m} \quad (3.18)$$

Bu yöntemde sinyal uzunluğu m , kolaylık olması açısından çoğunlukla 1 ms olarak seçilmektedir.

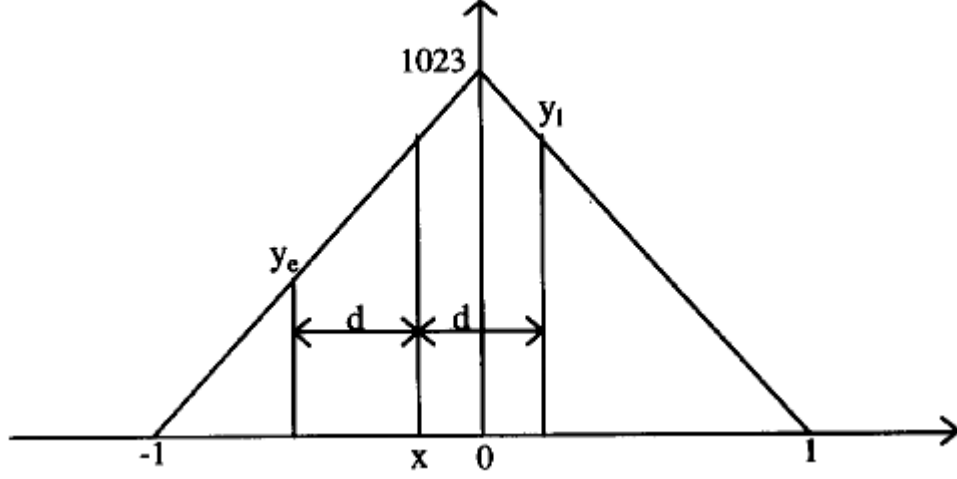
Bu aşamada, taşıyıcı frekansı takip edilen sinyalin PRN kodu da takip edilecektir. Bunun için takip edilecek uydunun kodu, hesaplanan taşıyıcı frekans ile kiplenir (modüle edilir). Daha sonra gelen sinyalle aynı fazda (prompt), bir miktar sağa kayık (early) ve bir miktar sola kayık (late) olacak şekilde 3 kod hazırlanır. Her uydunun için ilk kod kayıklığı, sinyal yakalama kısmından alınabilir.

Şekil 3-7’de gelen sinyal ve sinyalin kod takibi için üretilen, aynı fazdaki ve kayık fazdaki sinyaller verilmiştir. Üretilen bu üç kod ile gelen sinyalin ilintilerine bakılır ve kod kayıklığı için bir kestirim yapılır.



Şekil 3-7 Gelen sinyal ve kod takibi için üretilen sinyaller

Kodların tam uyuşması durumunda ilinti sonucu 1023 olacaktır. Şekil 3-8’de gelen sinyalin kod takibi için kullanılmakta olan “prompt”, “early” ve “late” kodlarla olan ilinti sonucu verilmiştir.



Şekil 3-8 “Prompt”, “early” ve “late” kodların gelen sinyal ile ilinti sonuçları

Kod kayıklığı x şu şekilde hesaplanabilir:

$$r_y = \frac{y_e}{y_l} \quad (3.19)$$

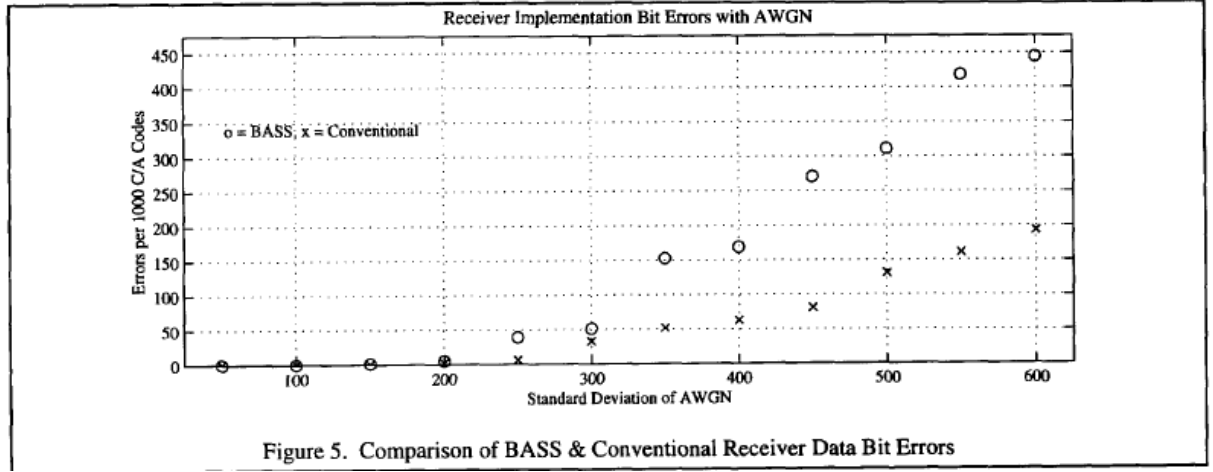
$$x + d > 0 \quad \text{ise} \quad x = \frac{-(1-d)(1-r_y)}{(1+r_y)} \quad (3.20)$$

$$x + d < 0 \quad \text{ise} \quad x = \frac{(1-r_y) - d(1+r_y)}{r_y - 1} \quad (3.21)$$

Burada r_y her 1 milisaniyede hesaplanır ancak gürültü sebebiyle en az 10 milisaniyede bir hesaplanan r_y 'lerin ortalaması alınır ve x hesaplanarak kayma miktarı düzeltilir.

Kaynak [22]'de verilen çalışmada yapılan testlerin sonuçlarına göre aynı sinyal kullanılarak geleneksel yöntemde 52,6 metrelik hata ile konum bulunabilmişken, BASS yönteminde bu hata 58 metre olarak bulunmuştur.

Aynı çalışmada bu yöntemlerin gürültü karşısındaki başarımını anlamak için GPS sinyaline çeşitli miktarlarda beyaz gürültü eklenerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucu Şekil 3-9'da görülmektedir. Gürültü miktarı arttıkça geleneksel yöntemin BASS yöntemine göre daha başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 3-9 Geleneksel ve BASS yöntemlerinin gürültü karşısındaki başarıları [22]

3.5 Konum Hesaplama

Konum hesaplaması GPS alıcılarının son işlemidir. Konum hesaplamaları için uydular ile olan sözde mesafe bilgileri, efemeris bilgileri kullanılarak bulunan uydu konumları ve zaman bilgilerine ihtiyaç vardır. Bu bilgiler ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak alıcı konumu hesaplanır.

Konum hesaplama algoritması 4.4 numaralı bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

4 YAZILIM TABANLI ALICI UYGULAMASI

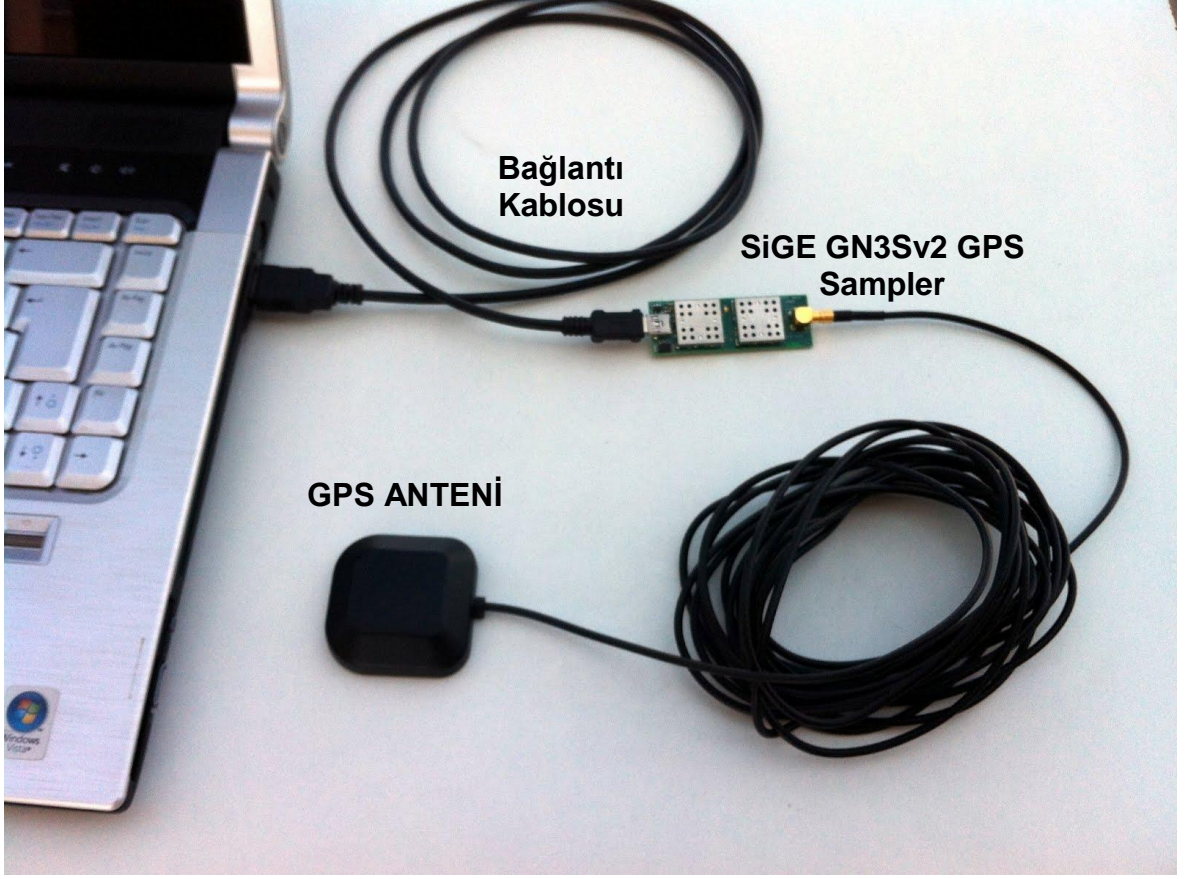
Bu bölümde, bölüm 3'te mimarisi verilen ve çalışma mantığı anlatılan yazılım tabanlı bir GPS alıcısı modellenecek ve test edilecektir. GPS sinyalleri uygun bir sinyal toplama ve hazırlama cihazı (front-end module) kullanılarak sayısal ortama aktarılacak ve sayısal ortamdaki bu GPS sinyallerine, MATLAB programı kullanılarak sırasıyla sinyal yakalama, sinyal takibi ve pozisyon hesaplama işlemleri uygulanarak alıcının konumu bulunacaktır.

4.1 Sinyal Toplama ve Hazırlama

GPS sinyallerinin MATLAB ortamında oluşturulacak sayısal tabanlı GPS alıcısı tarafından işlenebilmesi için düşük bir ara frekansa çekilmesi ve sayısal ortama aktarılması gerekmektedir. Bu amaçla “*SiGE GN3Sv2 GPS Sampler*” cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz SE4120L entegresi ile GPS anteninden alınan sinyalleri 1 bit eşvreli (*I*, in-phase) ve 1 bit dikevrelili (*Q*, quadrature phase) olarak sayısal ortama aktarmaktadır. GPS sinyali toplama cihazı uygun bir GPS antenine ihtiyaç duymaktadır. Cihaz, toplanan ve sayısala çevrilen sinyallerin kaydedilmesi için USB bağlantısı kullanılarak bilgisayara bağlanmaktadır. Şekil 4-1'de anten ve bilgisayar bağlantıları yapılmış bir GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı (*SiGE GN3Sv2 GPS Sampler*) görülmektedir. Bu cihazla toplanan GPS sinyali özellikleri Çizelge 4-1'de verilmiştir.

“*SiGE GN3Sv2 GPS Sampler*” cihazı Kasım 2011 tarihinde GPS anteni ve USB bağlantı kablosu ile beraber 514 \$ (Amerikan doları) maliyet ile tedarik edilmiştir.

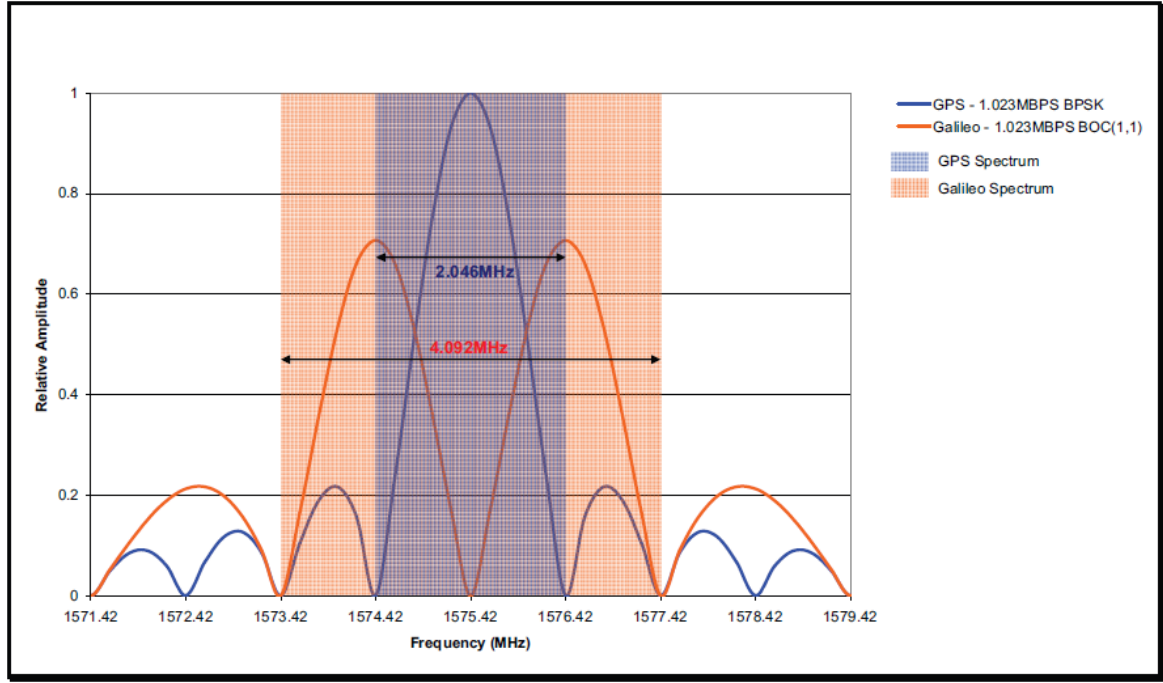
SiGE GN3Sv2 GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı 1575.42 MHz merkez frekansında taşınan GPS L1 ve Galileo sinyallerini toplayabilme özeliğine sahiptir. Bünyesindeki bant-geçiren filtre 2.2 MHz olarak ayarlanıp sadece 2.046 MHz bant genişliğine sahip GPS L1 sinyalini ya da 4.4 MHz olarak değiştirilerek hem GPS L1 sinyalini hem de Galileo sinyalini alabilmektedir. Şekil 4-2'de GPS L1 ve Galileo sinyallerine ait frekans izgeleri verilmiştir. Bu çalışmada sadece GPS L1 sinyali kullanılacağından bant-geçiren filtre 2.2 MHz'lik bant genişliğine ayarlanmıştır [23].



Şekil 4-1 Bağlantıları yapılmış bir GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı (SiGE GN3Sv2 GPS Sampler)

Çizelge 4-1: SiGE GN3Sv2 GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı ile toplanan GPS sinyali özellikleri [23]

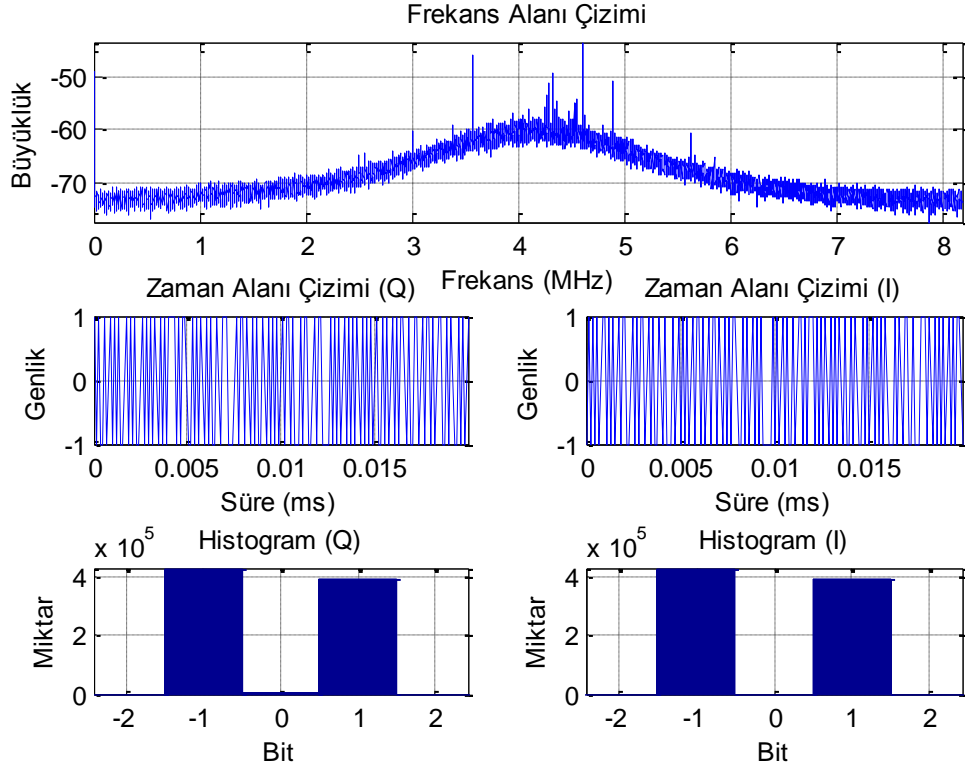
Özellik	Değer
Ara Frekans	4.092 MHz
Örnekleme Hızı	8.184 MHz
Sinyal Bilgisi	1 bit <i>I</i> / 1 bit <i>Q</i>
Sinyal Kazancı	18.5 dB
Gürültü Katsayısı	1.7 dB



Şekil 4-2 GPS L1 ve Galile sinyallerine ait frekans izgeleri [23]

SiGE GN3Sv2 GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı en fazla 37 saniyelik GPS sinyalini kaydedebilmektedir. GPS sinyali dışında herhangi bir bilgi kullanmayan bir GPS alıcısının pozisyon hesaplayabilmesi için 37 saniyelik sinyal yeterlidir. GPS alıcısı, pozisyon hesaplamaları için sinyalin uydudan çıkış zamanına ve uydu konumlarına ihtiyaç duyar. Uydu konumları navigasyon mesajı içindeki efemeris bilgisi kullanılarak hesaplanır. Şekil 2-13'te görülebileceği gibi uydu saati ve efemeris bilgileri, navigasyon mesajının ilk 3 alt çerçevesinde bulunur ve 30 saniyede bir kendini tekrar eder. Bu sebeple 37 saniyelik sinyal toplanarak saat ve efemeris bilgilerinin alınmış olduğu garanti edilir.

SiGE GN3Sv2 GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı ile kaydedilmiş gerçek GPS sinyaline ait özellikleri gösteren grafik Şekil 4-3'te görülmektedir. Şekilde sinyalin frekans izge grafiği ile eşvre ve dikevre kısımlarının zaman alanındaki grafiği ve bit yoğunlukları grafikleri verilmiştir.



Şekil 4-3 SiGE GN3Sv2 GPS sinyali toplama ve hazırlama cihazı ile toplanan gerçek GPS sinyalinin zaman ve frekans alanındaki gösterimi.

4.2 Sinyal Yakalama (Acquisition)

Bu bölümde, bölüm 3.3'te anlatılan sinyal yakalama yöntemlerinin uygulanması anlatılacak ve MATLAB modelleri oluşturularak performansları karşılaştırılacaktır. Geleneksel yöntem sayısal tabanlı alıcılar için uygun olmadığından ve performansı da FFT yöntemi ile aynı olacağından, sadece FFT yöntemi ile geciktirme ve çarpma yöntemi uygulamaları yapılacak ve performansları karşılaştırılacaktır.

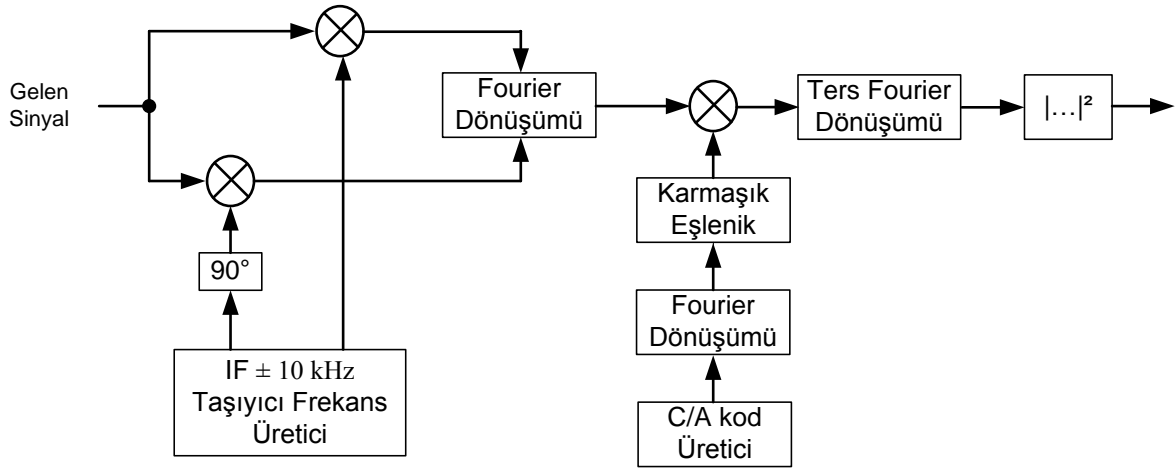
Daha önce de belirtildiği gibi sinyal yakalama işlemi, görülebilen uyduların belirlenip, bu uydulardan gelen sinyallerin frekansının ve kod kayıklığının bulunduğu bir arama işlemidir. Görülebilecek uyduların belirlenmesinde iki yol izlenebilir. Bunlar; hızlı açılma (*warm start*) ve yavaş açılma (*cold start*). Hızlı açılmada, bazı ön bilgiler kullanılarak o anda alıcının bulunduğu bölgede görülebilecek uydular belirlenir ve sadece bu uydular aranır. Yavaş açılmada ise GPS sistemine ait 32 uydu da aranır [7]. Bu bölümde öncelikle Yavaş açılma yolu

ile FFT ve geciktirme ve çarpma yöntemleri uygulanacak, daha sonra hızlı açılma yöntemi anlatılacak ve uygulaması yapılacaktır.

4.2.1 FFT Yöntemi ile Sinyal Yakalama

FFT yönteminde kod kayıklığının bulunması için kullanılan ilinti alma, sinyallerin FFT dönüşümleri alınıp çarpılmasıyla yapılmaktadır. Kullanılan sinyal hazırlama devresi 8.184 MHz örnekleme frekansına sahip olduğundan 1 milisaniye uzunluğundaki C/A kod 8184 bitten oluşmaktadır. Bu da 1023 çipten oluşan kodun her çipinin 8 bitten oluştuğunu göstermektedir.

FFT yönteminde bütün bir C/A kodun her kayıklık miktarı için (8184 olası kayıklık değeri) ilinti almak yerine, tek bir defada bütün kayıklık miktarları için ilinti bulunmuş olmaktadır. Şekil 4-4'te FFT yönteminin blok şeması verilmiştir [7; 21].



Şekil 4-4 FFT yöntemi ile sinyal yakalama blok şeması

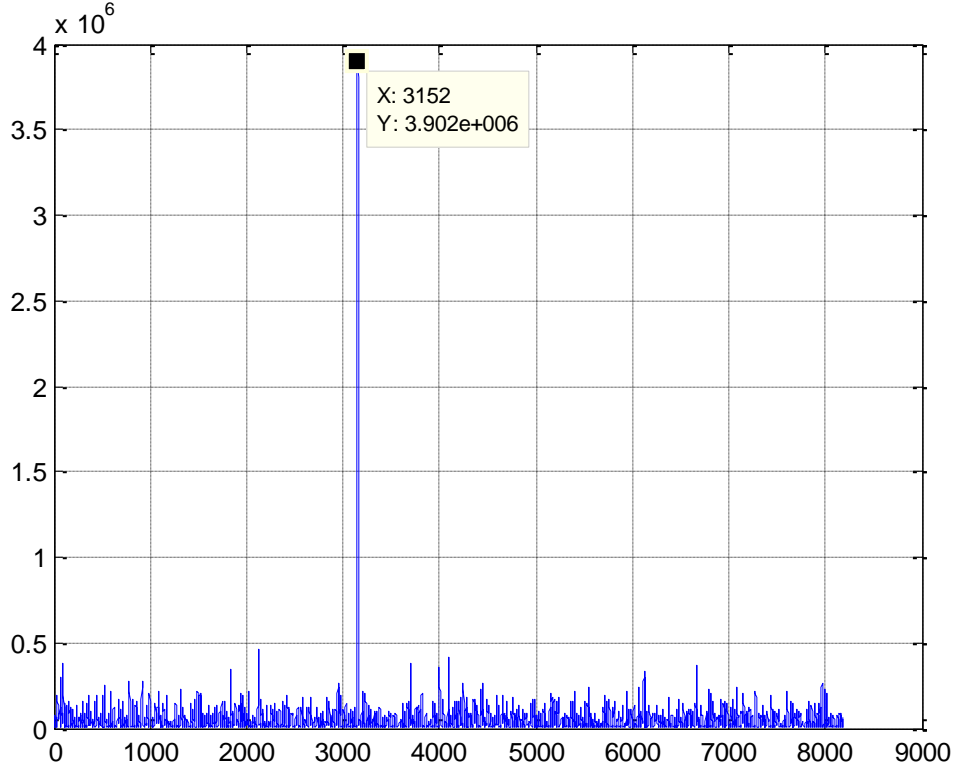
Şekil 4-4'te blok şeması verilen FFT yönteminde ilk aşama GPS sinyalini taşıyıcı sinyalden arındırmaktır. Bunun için GPS sinyalinin eşvreli ve dikevrelili bileşenleri, alıcı tarafından üretilen ara taşıyıcı frekans ve 90 derece kaydırılmış hali ile çarpılır. Sinyal hazırlama ve toplama katı tarafından sinyalin hangi ara frekansa indirildiği bilinmesine rağmen uydu ve alıcı hareketleri tarafından oluşan Doppler kaymasının büyüklüğü bilinmediğinden taşıyıcı frekansında da bir arama yapılmaktadır. Dünya üzerindeki en hızlı araçta oluşabilecek Doppler kayması ± 10 kHz bandı içinde kaldığından ara frekansın ± 10 kHz çevresinde 500 Hz aralıklarla taşıyıcı frekans oluşturulur ve bütün Doppler frekansı bandında arama yapılır.

Taşıyıcı frekanstan arındırılan eşevreli (I) ve dikevreli (Q) sinyaller birleştirilerek ($x(n) = I(n) + jQ(n)$) Fourier dönüşümleri alınır.

Her bir uydu için C/A kod üretilir, Fourier dönüşümlerinin ardından karmaşık eşlenikleri alınır.

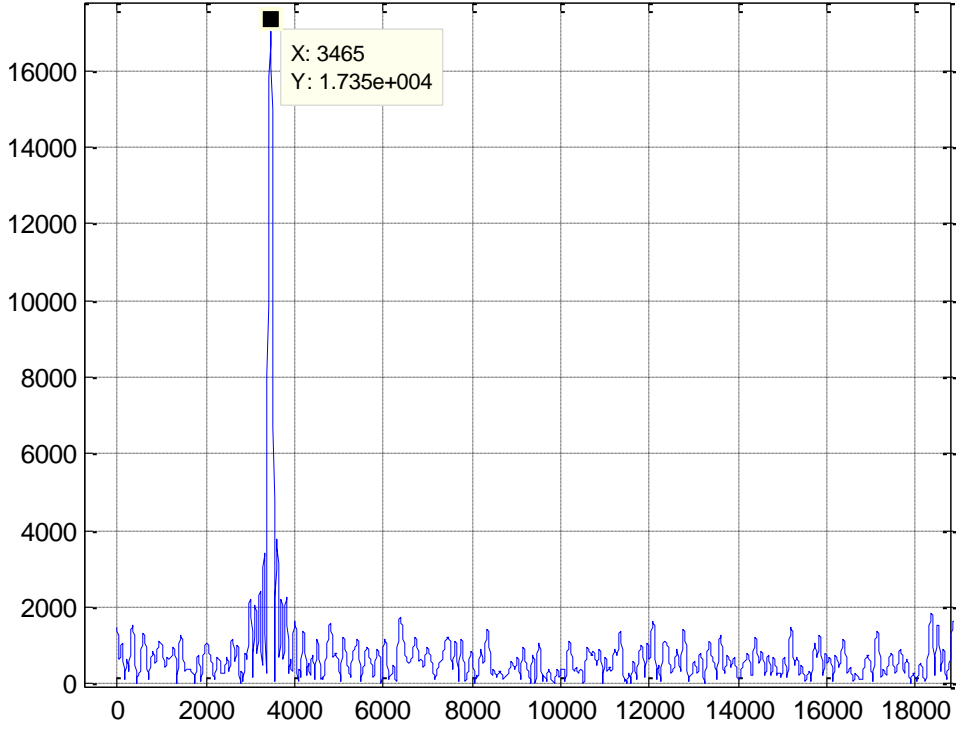
Fourier dönüşümleri alınmış GPS sinyali ile aranan uyduya ait C/A kod sinyali çarpılır ve ters Fourier dönüşümleri alınarak zaman alanına geri dönülür. Zaman alanına çevrilmiş olan sinyalin mutlak değeri çarpılan iki sinyalin ilinti sonucudur. Bu sinyalde değerin en büyük olduğu yer, ilintinin en büyük olduğu yerdir ve kod kayıklık miktarını verir. Bu ilinti sonucu ile bir sinyal-gürültü oranı hesaplanır. Bu sinyal gürültü oranı, önceden belirlenmiş olan eşik değerin üstündeyse o uydu yakalanmış olur.

Bütün uydular için bu arama şu şekilde yapılır; her uydunun C/A kodu için taşıyıcı frekans bütün Doppler bandında 500 Hz aralıklarla değiştirilerek ilinti sonuçları hesaplanır ve ilinti sonucunun en yüksek olduğu sonuç dikkate alınır. Böylece görülen uydular ve kod kayıklıkları bulunmuş olsa da halen Doppler frekans kayması tam olarak bulunmuş değildir. Şekil 4-5'te alınan GPS sinyali ile 25 numaralı uyduya ait C/A kodunun ilinti sonucu görülmektedir. 3152 bitlik kod kayıklığındaki ilinti sonucunda oluşan sinyal-gürültü oranı belirlenen eşik değerin üzerinde olduğundan hem 25 numaralı uydunun görüldüğüne karar verilmiş hem de kod kayıklığının 3152 bit kadar olduğu bulunmuş olur.



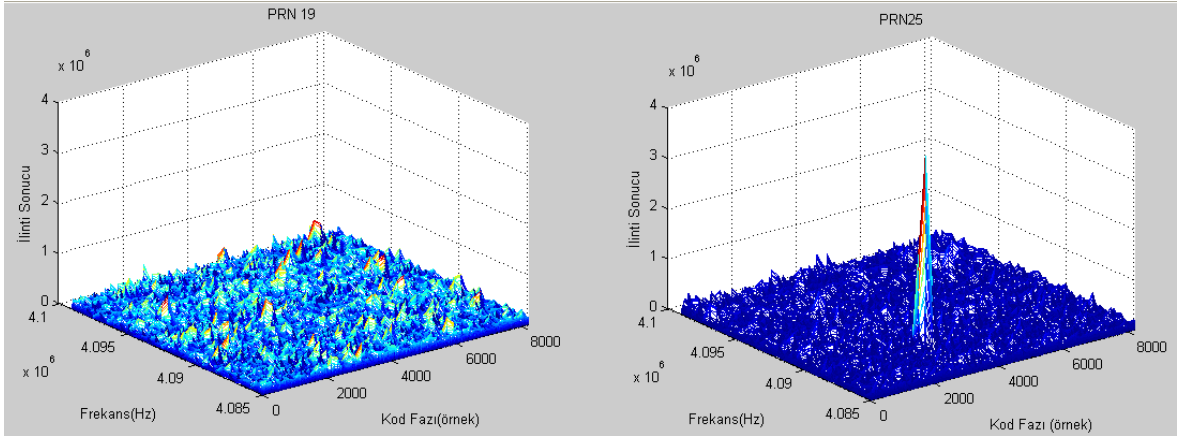
Şekil 4-5 Alınan GPS Sinyali ile 25 numaralı uyduya ait C/A kodunun ilinti sonucu.

Doppler frekans kaymasının tam olarak bulunması şu şekilde yapılır; 10 milisaniye uzunluğunda bir GPS sinyali alınır ve kod kayıklığı düzeltilmiş olan C/A kodu ile kip çözümü yapılır. Böylece sadece taşıyıcı frekansa sahip bir sinyal elde edilir ve bu sinyalin Fourier dönüşümü alınarak frekansı bulunmuş olur. GPS sinyali gürültülü bir sinyal olduğundan Doppler kaymasının daha rahat bulunabilmesi için uzun bir sinyal alınmalıdır, bu sebeple 10 milisaniyelik sinyal alınmıştır. Şekil 4-6'da daha önce kod kayıklığı bulunmuş olan 25 numaralı uydunun 10 milisaniyelik sinyalinin kodu çözümlendikten sonraki Fourier dönüşüm sonucu verilmektedir. Yatay eksendeki frekans değerleri ara frekans çıkarılarak çizdirildiğinden, Doppler kayma miktarını vermektedir. Şekilde 25 numaralı uydu için Doppler kaymasının 3465 Hz olarak bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4-6 C/A kodu çözümlenmiş GPS sinyalinin Fourier dönüşüm sonucu

Şekil 4-7 FFT yöntemi ile iki boyutlu arama sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4-7-a'da aranan 19 numaralı uydu görülemediğinden ilinti sonuçları belirlenen eşik değeri geçememiştir. Şekil 4-7-b'de ise aranan 25 numaralı uydu görüldüğünden, uygun kod kayıklığı ve taşıyıcı frekansta ilinti sonucu diğer noktalara göre çok yüksek bulunmuştur.



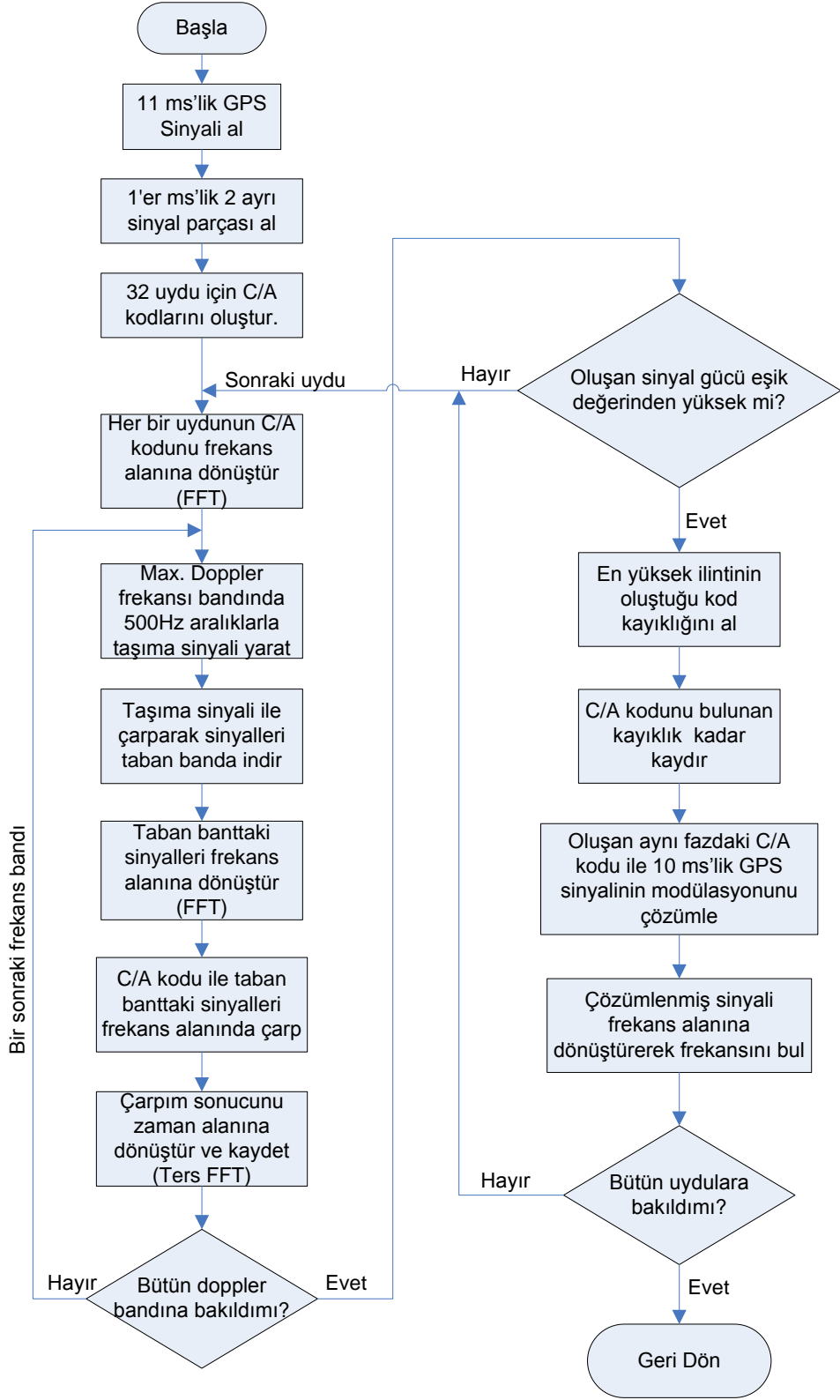
Şekil 4-7 FFT yöntemi ile iki boyutlu arama sonuçları. (a) yakalanmamış sinyal, (b) yakalanmış sinyal

GPS sinyalleri içinde C/A kodlarla kodlanmış olan navigasyon bitleri olduğundan; çoğunlukla tek 1 milisaniyelik sinyal parçası alınarak üretilen C/A kod ile ilintisine bakılmak yerine, peş peşe 2 tane 1 milisaniyelik sinyal parçası alınarak C/A kodun iki sinyal parçası ile olan ilintilerine ayrı ayrı bakılır. Tek bir parça alınması durumunda navigasyon bit değişimi bu parça içinde yer alabileceğinden, ilinti sonucu düşük bulunabilir. Bu da görülmekte olan bir uydunun yakalanamamasına sebep olur. Ancak peş peşe 2 ayrı sinyal parçası alındığında, birinde navigasyon bit değişimi olması durumunda öbüründe olmayacağı garanti edilmiş olur. İki ayrı ilinti sonucundan büyük olanı alınarak işlemlere devam edilir.

Bu bölümde nasıl yapıldığı anlatılan, FFT yöntemi ile sinyal yakalama işlemlerini gerçekleştiren yazılımsal kodun akış şeması Şekil 4-8'de verilmiştir. MATLAB tabanlı olarak hazırlanan bu yazılım, 2 farklı zamanda toplanan GPS sinyalleri ile test edilmiştir.

Çizelge 4-2'de iki farklı testte yakalanan uydular, taşıyıcı frekansları, Doppler frekans kaymaları ve kod kayıklık değerleri; sinyal-gürültü oranlarına göre sıralanmış bir şekilde verilmiştir. Şekil 4-9 ve Şekil 4-10'da test 1 ve test 2'de yakalanan uyduların sinyal-gürültü oranları görülmektedir. Bu testlerde sinyal-gürültü oranı eşik değeri 2.2 olarak seçilmiştir.

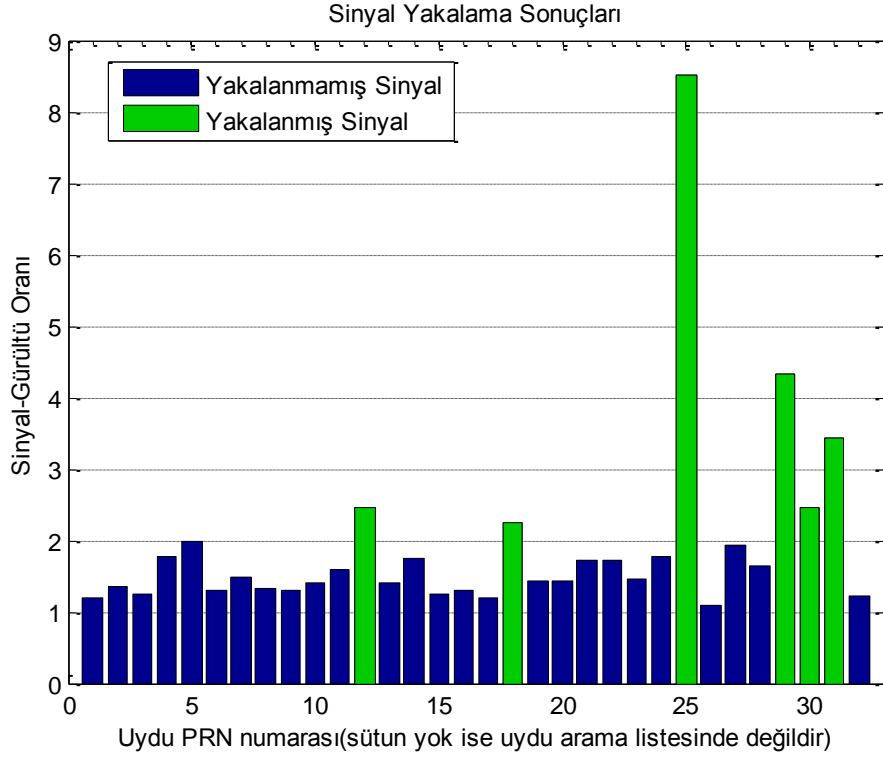
Sinyal-gürültü oranları en yüksek ilinti sonucunun karesi ile ikinci en yüksek ilinti sonucunun karesinin oranı olarak hesaplanmaktadır.



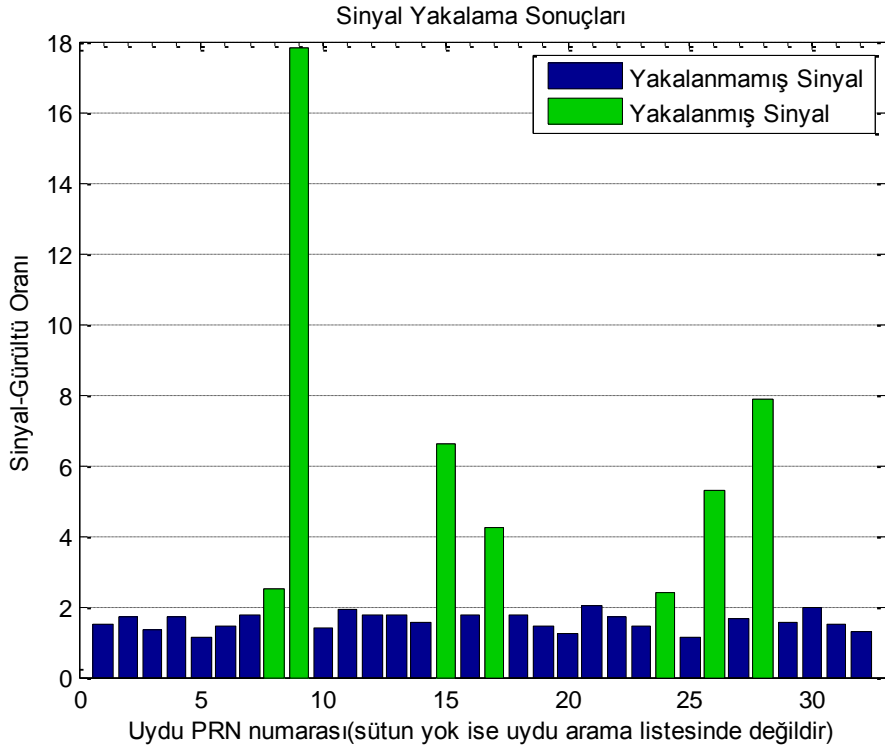
Şekil 4-8 FFT Yöntemi ile sinyal yakalama akış şeması

Çizelge 4-2: FFT Yöntemi ile sinyal yakalama testleri, yakalanan sinyal değerleri

Test Numarası	Yakalanan Uydu	Taşıyıcı Frekans(Hz)	Doppler Kayması(Hz)	Kod Kayıklığı
TEST-1	25	4.08853e+006	-3465	3152
	29	4.09083e+006	-1171	1268
	31	4.08964e+006	-2365	1288
	12	4.08802e+006	-3980	5773
	30	4.09125e+006	-749	5411
	18	4.09492e+006	2919	2182
TEST-2	9	4.09156e+006	-437	2548
	28	4.08951e+006	-2490	714
	15	4.09233e+006	328	5685
	26	4.08937e+006	-2630	3197
	17	4.09278e+006	780	5178
	8	4.08914e+006	-2864	500
	24	4.09454e+006	2537	3270



Şekil 4-9 FFT Yöntemi ile sinyal yakalama Test-1, uyduların sinyal-gürültü oranları



Şekil 4-10 FFT Yöntemi ile sinyal yakalama Test-2, uyduların sinyal-gürültü oranları

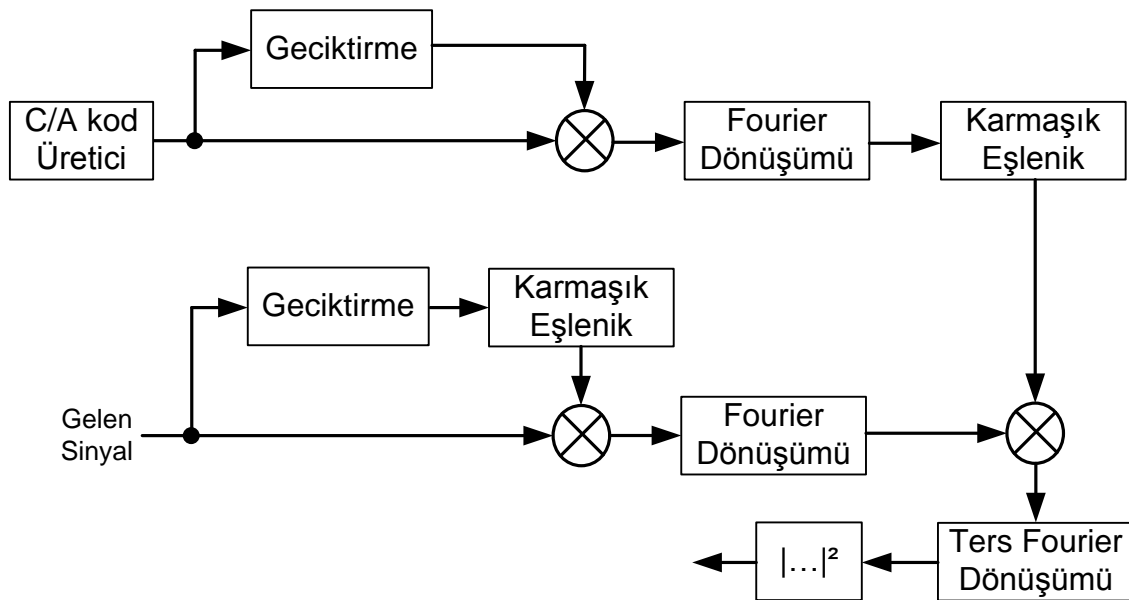
4.2.2 Geciktirme ve Çarpma Yöntemi ile Sinyal Yakalama

Bu tezin 3.3.3 numaralı bölümünde, geciktirme ve çarpma yöntemi ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Bu bilgilerden anlaşılacağı gibi, geciktirme ve çarpma yönteminde kod kayıklığını bulma işlemi FFT yöntemi ile aynı şekilde yapılmaktadır. Ancak, sinyal taşıyıcı frekansı için Doppler kayması bandı içinde bir arama yapılmamakta, alınan GPS sinyali bir miktar geciktirilmiş haliyle çarpılarak taşıyıcı frekanstan arındırılmaktadır [24].

FFT yönteminde, sinyal taşıyıcı frekanstan arındırılmak için ± 10 kHz'lik Doppler kayması bandında 500 Hz'lik aralıklarla, 41 farklı ihtimal denenmektedir. Geciktirme ve çarpma yönteminde ise bu işlem bir defada çözülmektedir. Bu sebeple geciktirme ve çarpma yöntemi FFT yöntemine göre daha hızlıdır.

Taşıyıcı frekanstan arındırılan sinyalin, C/A kodları ile ilintilerine bakılarak, o uydunun görülüp görülmediği belirlenmekte ve görülüyorsa da kod kayıklığı bulunmaktadır.

Şekil 4-11'de geciktirme ve çarpma yönteminin blok şeması verilmiştir.



Şekil 4-11 Geciktirme ve çarpma yöntemi blok şeması [24]

Şekilde görüldüğü gibi; önce, gelen sinyal bir miktar geciktirilmiş halinin karmaşık eşleniği ile çarpılarak taşıyıcı frekansından arındırılmakta, ancak bu çarpım sonucunda yeni bir C/A koduna sahip olmaktadır. Artık bu sinyalde oluşan yeni

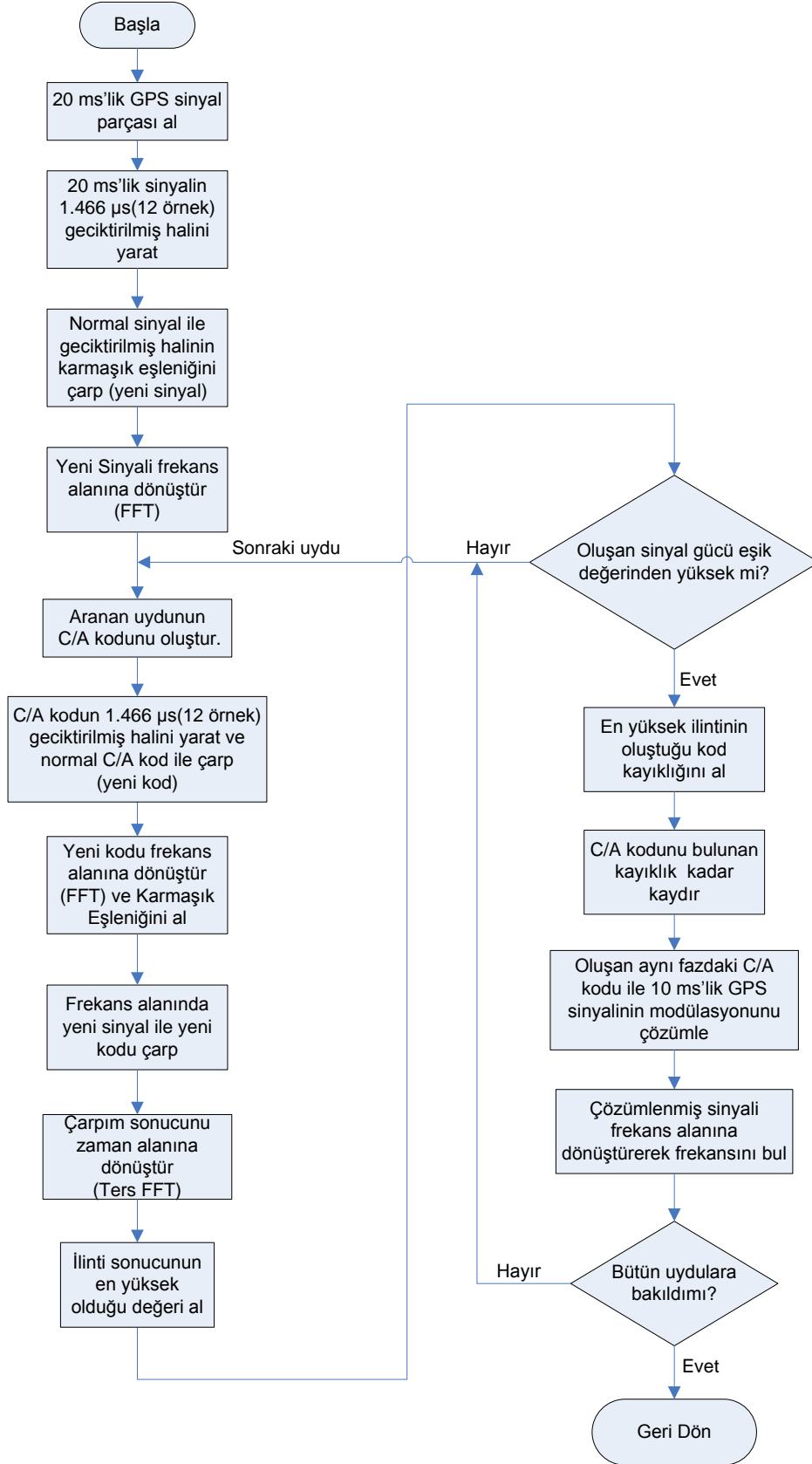
kodun aranması gerekmektedir. Bu sebeple her uydunun C/A kodu da sinyal ile aynı miktarda kaydırılır ve kendisi ile çarpılır. Bu aşamadan sonra oluşan yeni sinyal ve yeni kod arasındaki ilinti FFT yöntemi ile aynı şekilde bulunur. İlinti büyüklüğü belirlenen eşik değerinin üzerindeyse, ilintinin en yüksek olduğu kayıklık miktarı aranmakta olan uydunun kod kayıklığını verecektir.

Kod kayıklığı bulunan sinyalin Doppler frekans kayması FFT yöntemi ile aynı şekilde bulunur; 10 milisaniye uzunluğunda bir GPS sinyali alınır ve kod kayıklığı düzeltilmiş olan C/A kodu ile çözümlenir. Böylece sadece taşıyıcı frekansa sahip bir sinyal elde edilir ve bu sinyalin Fourier dönüşümü alınarak frekansı bulunmuş olur.

Geciktirme ve çarpma yöntemi FFT yöntemine göre hızlı bir yöntem olsa da; gürültülü bir sinyalin kendisi ile çarpılması sonucunda gürültü miktarı artar. Bu sebeple uyduların yakalanması daha zor olur. Bu sıkıntının azaltılması için 1 milisaniye yerine daha uzun bir sinyal ile işlem yapılmaktadır. Yapılan testler sonucunda, geciktirme ve çarpma yöntemi ile en iyi sinyal yakalama sonucunun 20 milisaniyelik sinyal ve 1.466 mikro saniyelik (12 örnek) gecikme miktarı ile elde edildiği görülmüştür.

Bu bölümde nasıl yapıldığı anlatılan, geciktirme ve çarpma yöntemi ile sinyal yakalama işlemlerini gerçekleştiren yazılımsal kodun akış şeması Şekil 4-12'de verilmiştir. MATLAB tabanlı olarak hazırlanan bu yazılım, 2 farklı zamanda toplanan ve FFT yönteminin testlerinde de kullanılan GPS sinyalleri ile test edilmiştir.

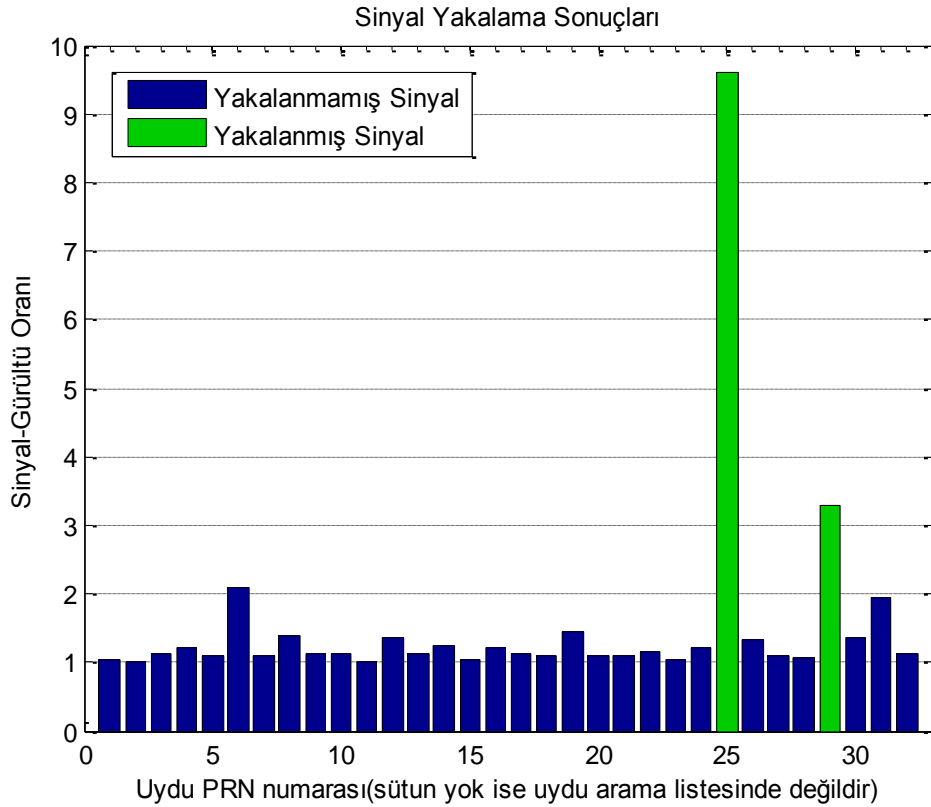
Çizelge 4-3'te iki farklı testte geciktirme ve çarpma yöntemi ile yakalanan uydular, taşıyıcı frekansları, Doppler frekans kaymaları ve kod kayıklık değerleri; sinyal-gürültü oranlarına göre sıralanmış bir şekilde verilmiştir. Şekil 4-13 ve Şekil 4-14'te test-1 ve test-2'de yakalanan uyduların sinyal-gürültü oranları görülmektedir. Bu testlerde sinyal-gürültü oranı eşik değeri FFT yönteminde olduğu gibi 2.2 olarak seçilmiştir.



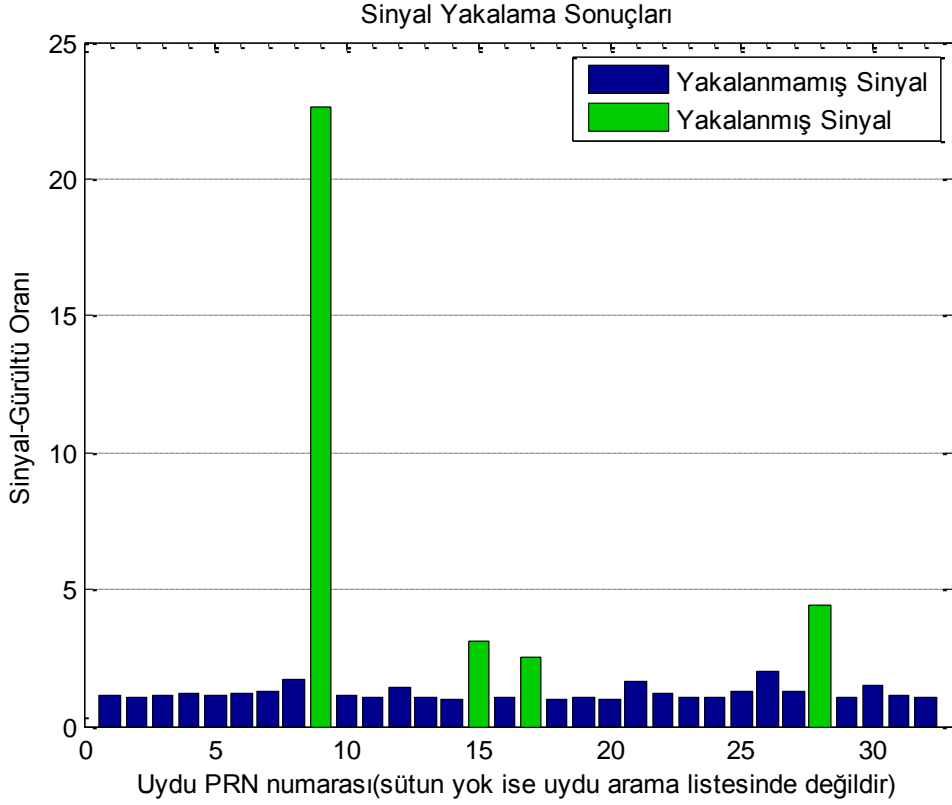
Şekil 4-12 Geciktirme ve çarpma yöntemi akış şeması

Çizelge 4-3: Geciktirme ve Çarpma Yöntemi ile sinyal yakalama testleri; yakalanan sinyal değerleri

Test Numarası	Yakalanan Uydu	Taşıyıcı Frekans(Hz)	Doppler Kayması(Hz)	Kod Kayıklığı
TEST-1	25	4.08853e+006	-3465	3154
	29	4.09083e+006	-1171	1269
TEST-2	9	4.09156e+006	-437	2550
	28	4.08951e+006	-2490	715
	15	4.09233e+006	328	5685
	17	4.09278e+006	780	5179



Şekil 4-13 Geciktirme ve Çarpma Yöntemi ile sinyal yakalama Test-1, uyduların Sinyal-Gürültü oranları



Şekil 4-14 Geciktirme ve Çarpma Yöntemi ile sinyal yakalama Test-2, uyduların Sinyal-Gürültü oranları

Aynı sinyaller kullanılarak yapılan testlerde yakalanabilen uydular için FFT yöntemi ile geciktirme ve çarpma yönteminin benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, test 1’de FFT yöntemi ile 6 uydu yakalanabilmişken geciktirme ve çarpma yöntemi ile sadece 2 uydu yakalanabilmiştir. Test 2’de ise FFT yöntemi ile 7 uydu, geciktirme ve çarpma yönteminde 4 uydu yakalanabilmiştir. Bu sonuçlar FFT yönteminin daha iyi sonuç verdiğini ve gürültüye karşı daha güçlü olduğunu göstermektedir.

FFT yöntemi, geciktirme ve çarpma yöntemine göre düşük güçteki sinyalleri yakalama konusunda daha başarılıdır ancak geciktirme ve çarpma yöntemi FFT yöntemine göre daha hızlıdır. Toplanmış olan iki GPS sinyalinin her iki yöntemle yakalama işlemlerinin ne kadar zaman aldığı Çizelge 4-4’te verilmiştir.

Çizelge 4-4’te aynı yöntemle farklı zamanlarda toplanan sinyaller üzerindeki yakalama işleminin farklı süreler aldığı görülmektedir. Bunun sebebi farklı sayıda uydu yakalanmasıdır. Hangi uydunun görülebildiğini belirlemek eşit süre olsa da

sadece yakalanan uyduların sinyallerinin Doppler kaymaları hesaplanmaktadır. Bu sebeple daha çok uydu yakalandığında yakalama süresi de uzamaktadır.

Çizelge 4-4: FFT yöntemi ile geciktirme ve çarpma yöntemi ile sinyal yakalama süreleri

TEST	TEST-1 yakalama süresi (saniye)	TEST-2 yakalama süresi (saniye)
FFT Yöntemi	7.92	8.47
Geciktirme ve Çarpma Yöntemi	2.95	3.33

4.2.3 Hızlı Açılma (Warm Start)

Bu bölümde bazı ön bilgiler kullanılarak görülebilecek GPS uydularının hesaplanması ve sadece onların aranması anlatılacaktır. 4.2.1 ve 4.2.2 numaralı bölümlerde bütün GPS uyduları aranarak sinyal yakalamaya çalışılmıştır. Bu bölümde ise, alıcının bulunduğu yerde o anda görülebilecek uydular belirlenip sadece onların aranması sağlanarak sinyal yakalama işlemi hızlandırılacaktır.

Hızlı açılma, sinyal yakalama yöntemlerinin yerine kullanılabilir bir yöntem değildir. Sinyal yakalama yöntemleri için bir ön hazırlık aşamasıdır. Hızlı açılma işlemleri tamamlandıktan sonra FFT ya da geciktirme ve çarpma yöntemlerinden biri kullanılarak sinyal yakalama işlemi yapılır.

Hızlı açılmanın mantığı şu şekilde anlatılabilir; bir alıcının kabaca konumu, sinyal zamanı ve uydu konumları biliniyorsa o anda alıcının görebileceği uydular belirlenebilir [6]. Kabaca uydu konumlarını hesaplamak için almanak içindeki bilgiler yeterlidir. Kapatıldığı yerde ve kapatıldıktan sonra çok zaman geçmeden tekrar açılan bir alıcıda hem son kapatıldığı andaki konum hem de almanak bilgisi saklanmış olabilir. Uzun süre kapalı kalan bir alıcının almanak bilgisi geçersiz olacaktır. Kapalı kalma süresi ne kadar kısa olursa uydu konumları o kadar doğru hesaplanacaktır. Alıcı içindeki basit bir saat ile zaman bilgisi de tutulabilir.

Çizelge 4-5'te almanak içinde yer alan 1 numaralı uyduya ait bilgiler ve açıklamaları verilmiştir. Almanak bütün uydular için bu bilgileri içermektedir. Bu bilgiler efemeris bilgilerinin bir kısmını içermektedir. Efemeris içerisinde bulunan hata düzeltme katsayılarının çoğunluğu almanak içerisinde olmadığından, uydu konumları kabaca hesaplanabilir.

Çizelge 4-5: Bir numaralı uyduya ait almanak bilgisi ve açıklamaları [6; 25]

***** Week 710 almanac for PRN-01 *****		
ID	01	Uydu numarası
Health	000	Uydu sağlık bilgisi
Eccentricity (e_s)	0.1708507538E-002	Dış merkezlilik
Time of Applicability(s) (t_{yu})	503808.0000	Almanak bilgisi zamanı
Orbital Inclination(rad) (i)	0.9604601255	Yörünge eğikliği
Rate of Right Ascen(r/s) ($\dot{\Omega}$)	-0.7760323249E-008	Doğru yükseliş oranı
SQRT(A) (m ^{1/2}) ($\sqrt{a_s}$)	5153.656250	Yörünge yarıçapı karekökü
Right Ascen at Week(rad)(Ω_e)	-0.4642407848E+000	Haftalık doğru yükseliş
Argument of Perigee(rad) (ω)	0.312346726	Yerberi değişkeni
Mean Anom(rad) (M_0)	0.2934986114E+001	Anomali ortalaması
Af0(s) (a_{f0})	0.1335144043E-004	Uydu saat düzeltmesi
Af1(s/s) (a_{f1})	0.3637978807E-011	Uydu saat düzeltmesi
week	710	Hafta

Uydu konumlarının hesaplanmasında ilk adım sinyal toplama zamanının GPS zamanına çevrilmesidir.

Sinyal zamanı; yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniye formatındadır. GPS zamanında ise hafta numarası (week number, WN) kullanılmaktadır. Yıl, ay ve gün hafta numarasının hesaplanması için kullanılacaktır. Hafta numarası, 1980 yılının Ocak ayının 5. gününü 6. güne bağlayan gece yarısı başlamaktadır. Ancak hafta numarası 1024 olunca tekrar sıfırdan başladığından, başlangıç noktası bu sıfırlama anına denk gelen 21/22 Ağustos 1999 olarak alınabilir. 21 Ağustos 1999

tarihinden itibaren geçen gün sayısı 7'ye bölünerek hafta numarası bulunabilir. Bu bölme işleminin kalanı, haftanın günü (date of the week, DOW) olur [6; 25].

Saat, dakika ve saniye Greenwich'e göre alınmalıdır. Türkiye saati GMT+2 olduğundan sinyal zamanından 2 saat çıkarılmalıdır.

GPS zamanı şu şekilde hesaplanır [6]:

$$t_{GPS} = [(HG \times 24 + (saat - 2)) \times 60 + dak] \times 60 + san + 7 \times (HN - AH) \times (4 \times 60 - 4.09) \quad (4.1)$$

HG: haftanın günü

HN: hafta numarası

AH: almanak haftası

Daha sonraki hesaplamalarda kullanılacak olan epok zamanı (epoch time), t_{oe} şu şekilde hesaplanır [6; 25]:

$$t_{oe} = t_{yu} + a_{f0} \quad (4.2)$$

t_{yu} ve a_{f0} almanaktan elde edilen bilgilerdir.

Zaman dönüşümleri yapıldıktan sonra, uydu konumlarının hesaplanmasına başlanabilir. Hesaplamalarda kullanılan; e_s , t_{yu} , i , $\dot{\Omega}$, $\sqrt{a_s}$, Ω_e , ω , M_0 ve a_{f0} değerleri almanak bilgisinden elde edilmektedir. Bunlar dışında kullanılacak sabitler: $\mu = 3.986005 \times 10^{14} m^3/sec^2$ ve $\dot{\Omega}_{ie} = 7.2921151467 \times 10^{-5} rad/sec$ olarak alınacaktır.

Ortalama hareket şu şekilde hesaplanır [6; 25]:

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a_s^3}} \quad (4.3)$$

Ortalama anomali (Mean Anomaly) hesabı [6; 25]:

$$M = M_0 + n(t_{GPS} - t_{oe}) \quad (4.4)$$

Dış merkez anomaliliği (Eccentric Anomaly), E; birkaç tekrar yapılarak hesaplanır [6; 25]:

$$E = M + e_s \sin E \quad (4.5)$$

Uydu ile dünya merkezi arasındaki uzaklık, r ; şu şekilde bulunabilir [6; 25]:

$$r = a_s(1 - e_s \cos E) \quad (4.6)$$

Gerçek anomali (The true anomaly), v ; şu şekilde hesaplanabilir [6; 25]:

$$v_1 = \cos^{-1} \left(\frac{\cos E - e_s}{1 - e_s \cos E} \right) \quad (4.7)$$

$$v_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - e_s^2} \sin E}{1 - e_s \cos E} \right) \quad (4.8)$$

$$v = v_1 \text{sign}(v_2) \quad (4.9)$$

\emptyset ve Ω_{er} hesaplamaları [6; 25]:

$$\emptyset = v + \omega \quad (4.10)$$

$$\Omega_{er} = \Omega_e + \dot{\Omega} (t_{GPS} - t_{oe}) - \dot{\Omega}_{ie} t_{GPS} \quad (4.11)$$

Nihayetinde, uydunun konumu şu şekilde hesaplanır [6; 25]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \Omega_{er} \cos \emptyset - r \sin \Omega_{er} \cos i \sin \emptyset \\ r \sin \Omega_{er} \cos \emptyset - r \cos \Omega_{er} \cos i \sin \emptyset \\ r \sin i \sin \emptyset \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Bu işlemler sonucunda elde edilen uydu konumu ECEF (Earth-Center, Earth-Fixed) koordinat düzleminde. (4.2)'den (4.12)'ye kadar olan denklemler, bütün uyduların değerleri için tekrarlanarak her bir uydunun konumu hesaplanır.

Uydu konumu bulunduktan sonra, uydunun alıcı konumuna göre yeri; doğu (East), kuzey (North) ve yukarı (Up) olarak hesaplanmalıdır.

Alıcı konumu çoğunlukla enlem (L_c), boylam (l) ve yükseklik (h) olarak mevcuttur. Bunları uydu konumlarıyla aynı koordinat düzlemine (ECEF) çevirmek için şu formüller kullanılır [6; 25]:

$$x_0 = \frac{a_e \sin l}{\sqrt{1 + (1 - e_e^2) \tan L_c}} + h \times \cos l \times \cos L_c \quad (4.13)$$

$$y_0 = \frac{a_e \cos l}{\sqrt{1 + (1 - e_e^2) \tan L_c}} + h \times \sin l \times \sin L_c \quad (4.14)$$

$$z_0 = \frac{a_e(1 - e_e^2) \sin L_c}{\sqrt{1 - e_e^2 \sin^2 L_c}} + h \times \sin L_c \quad (4.15)$$

x_0 , y_0 ve z_0 alıcının ECEF koordinat düzlemindeki konumlarıdır. a_e ve e_e dünyanın asal eksenini ve dış merkezliği değerleridir.

Sonuçta, uydunun alıcıya göre konumu hesaplanabilir [6; 25]:

$$e_0 = -\sin l (x - x_0) + \cos l (y - y_0) \quad (4.16)$$

$$n_0 = -\sin L_c \cos l (x - x_0) - \sin L_c \sin l (y - y_0) + \cos L_c (z - z_0) \quad (4.17)$$

$$u_0 = \cos L_c \cos l (x - x_0) + \cos L_c \sin l (y - y_0) + \sin L_c (z - z_0) \quad (4.18)$$

Bütün uyduların alıcıya göre; doğu (e_0), kuzey (n_0) ve yukarı (u_0) yönlerdeki konumları hesaplandıktan sonra görülebilen uydular seçilebilir. 5 dereceden daha büyük yükseklik açısına sahip uydular görülebilir [6]. Ancak, hesaplama hataları da göz önüne alınarak yukarı yönde pozitif değer veren uyduların aranması doğru olacaktır ve işlemleri kolaylaştıracaktır.

Uyduların konumları hesaplanarak, görülebilen uydular belirlenebilmekte ve sadece bu uydular aranarak sinyal yakalama işlemi hızlandırılabilir. Uyduların alıcıya göre hızları da belirlenebilirse, taşıyıcı frekans Doppler kayması da yaklaşık olarak bulunabilir. Taşıyıcı frekansın yaklaşık olarak bulunması ile de, bütün Doppler kayması bandında (± 10 kHz) 41 noktada arama yerine; belirlenen taşıyıcı frekans etrafında sadece birkaç noktada arama yapılabilir. Böylece yakalama işlemi biraz daha hızlandırılmış olur.

Uyduların alıcıya göre hızları basitçe şu şekilde hesaplanabilir: uydu konumları bir saniye arayla iki defa hesaplanır ve farkları alınır. Uyduların alıcıya olan mesafesi metre cinsinden hesaplandığından, bu iki mesafe arasındaki fark metre/saniye (m/s) cinsinden hızı verecektir.

Doppler frekans kaymasına sebep olan Doppler hızı, uydu ile alıcının birbirinden uzaklaşma ya da birbirine yaklaşma hızıdır. Bu sebeple hesaplanan hızın yönü de önemlidir. Hızlar x, y ve z eksenleri için ayrı ayrı hesaplanacağından Doppler hızı da rahatlıkla hesaplanabilir:

$$V_{dopp} = -V_x \cos \alpha - V_y \cos \beta - V_z \cos \gamma \quad (4.19)$$

V_{dopp} , Doppler hızını V_x , V_y ve V_z uydunun alıcıya göre x, y ve z eksenlerindeki hızı; α , β ve γ , x, y ve z eksenlerinde uydunun alıcıya göre açısını göstermektedir.

Doppler hızı hesaplandıktan sonra Doppler frekansı da hesaplanabilir:

$$f_{dopp} = f_{IF} + \frac{f_{L1} V_{dopp}}{c} \quad (4.20)$$

c: ışık hızı

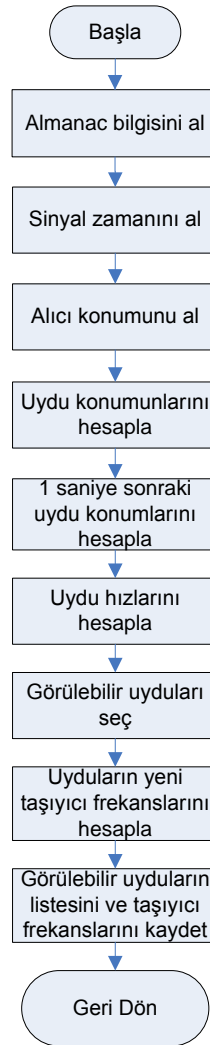
Daha önce FFT yöntemi ile geciktirme ve çarpma yönteminin testlerinde kullanılan 2 GPS sinyali için bu hesaplamalar yapılmış, yakalama sonrası bulunan gerçek Doppler kaymaları ve hata büyüklükleri Çizelge 4-6'da verilmiştir.

Çizelge 4-6: Yakalanan uydular için gerçek ve hesaplanan Doppler kaymaları

Test Numarası	Yakalanan Uydu	Gerçek Doppler Kayması (Hz)	Hesaplanan Doppler Kayması (Hz)	Hata (Hz)
TEST 1	25	-3465	-3103	362
	29	-1171	-822	349
	31	-2365	-1996	369
	12	-3980	-3680	300
	30	-749	-243	506
	18	2919	3231	312
TEST 2	9	-437	-156	281
	28	-2490	-2205	285
	15	328	606	278
	26	-2630	-2354	276
	17	780	1056	276
	8	-2864	-2578	286
	24	2537	2828	291

Hesaplanan Doppler kaymaları ile gerçek Doppler kaymaları arasındaki hatalar 300 Hz civarında bulunmuştur. Almanac içerisinde yer alan efemeris bilgisinde bazı düzeltme terimleri yer almadığından, burada hesaplanan uydu pozisyonları biraz hatalıdır. Bu sebeple Doppler kaymalarının hatalı bulunmuş olması normaldir.

Görülebilir uyduları ve sinyallerin taşıyıcı frekanslarını hesaplamak için hazırlanan MATLAB tabanlı yazılımın akış şeması Şekil 4-15'te verilmiştir.



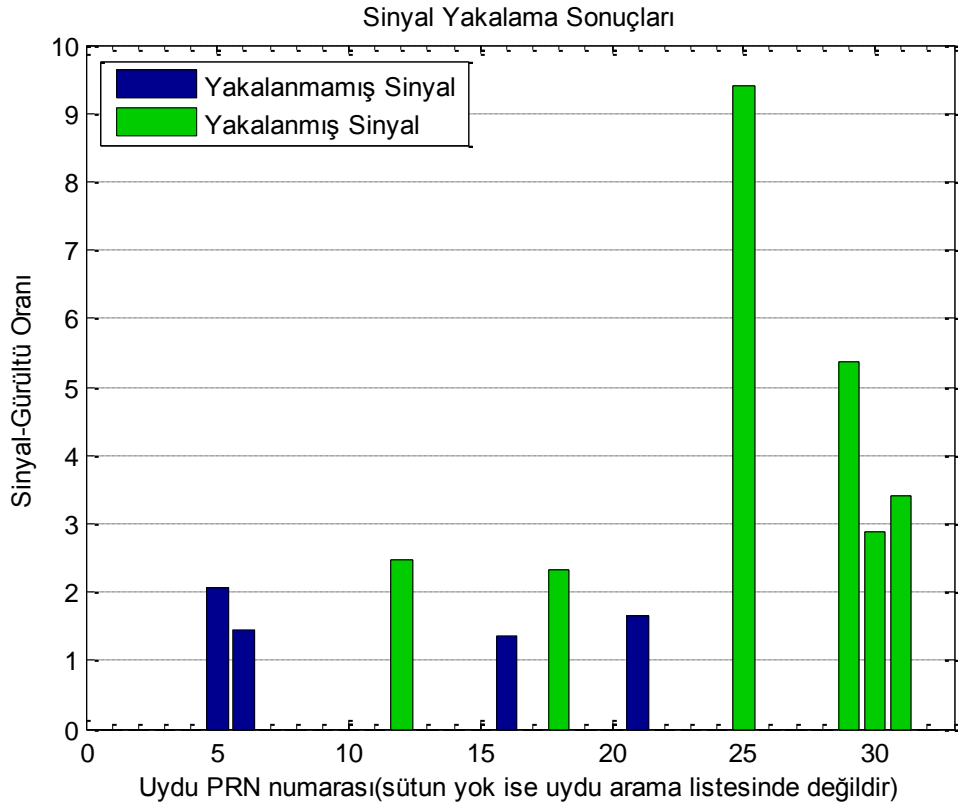
Şekil 4-15 Görülebilir uyduları ve taşıma frekanslarını bulma (hızlı açılma) akış şeması

Çizelge 4-7'de hızlı açılmanın, sinyal yakalama işlemlerini ne kadar hızlandırdığı görülmektedir. Çizelgede verilen sürelerle, uydu konumlarını ve hızlarını hesaplama işlemleri de dahildir. Şekil 4-16 ve Şekil 4-17'de hızlı açılma

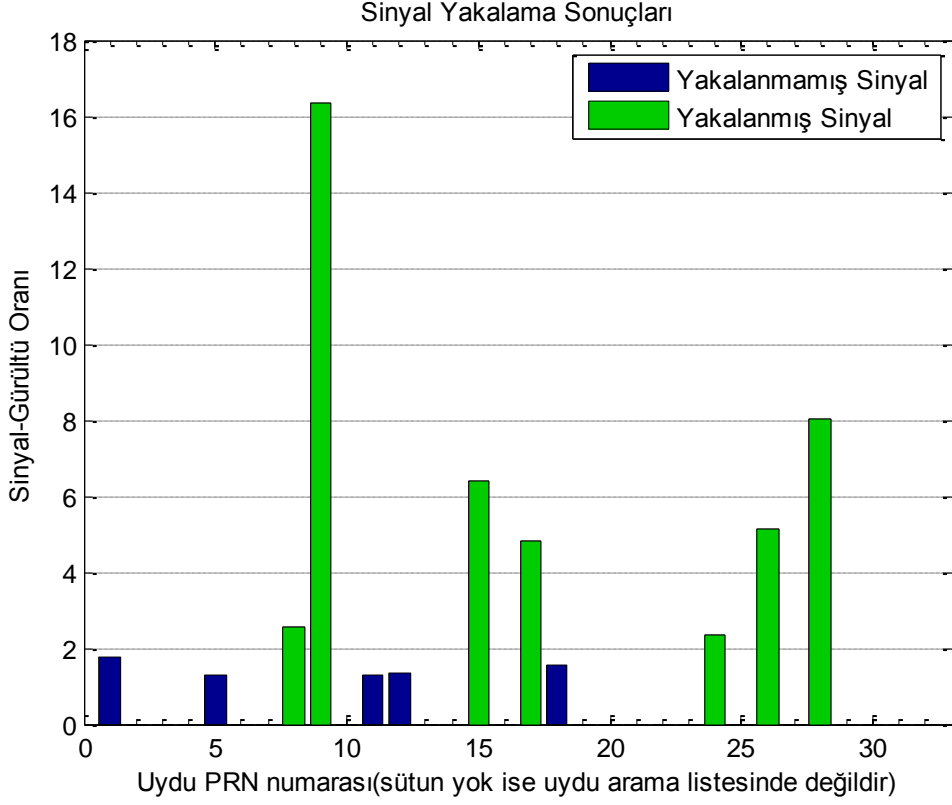
kullanılarak yapılan FFT testleri sonucunda yakalanan uydular görülmektedir. Şekillerde sütunlarla yakalanmamış olarak görülen (boş olmayan) uydular, hesaplamalar sonucunda görülebileceği anlaşılan ancak yakalanamayan uyduları göstermektedir. Görüldüğü gibi hızlı açılma yöntemi sinyal toplama zamanında görülebilecek uyduları doğru bir şekilde bulabilmiştir.

Çizelge 4-7: Yavaş açılma ve Hızlı açılma sinyal yakalama süreleri

TEST	FFT Yöntemi		Geciktirme ve Çarpma Yöntemi	
	Yavaş Açılma	Hızlı Açılma	Yavaş Açılma	Hızlı Açılma
TEST 1 (saniye)	7.92	1.45	2.95	1.25
TEST 2 (saniye)	8.47	1.66	3.33	1.78



Şekil 4-16 Hızlı açılma ile FFT yöntemi, test 1 sonuçları



Şekil 4-17 Hızlı açılma ile FFT yöntemi, test 2 sonuçları

4.3 Sinyal Takibi (Tracking)

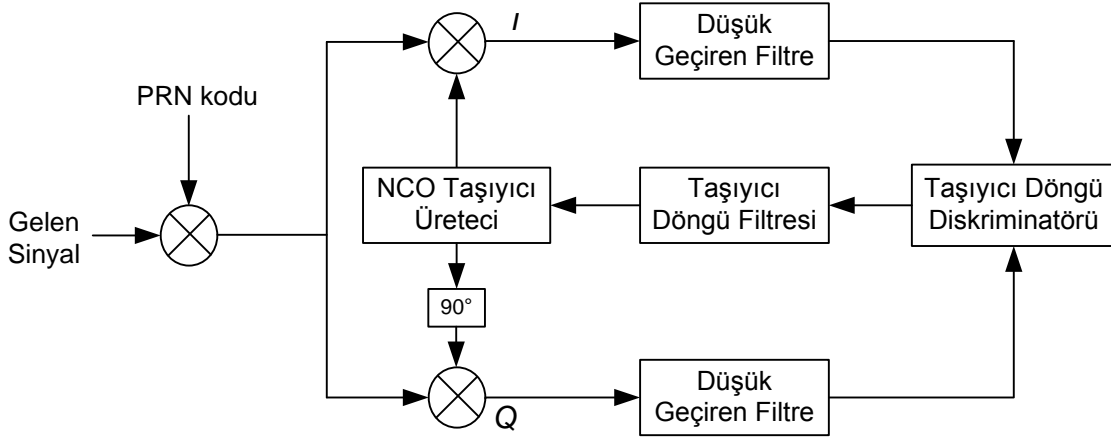
Bu bölümde, bölüm 3.4.1’de anlatılan geleneksel sinyal takip yöntemi detaylı olarak anlatılacak, MATLAB modeli uygulaması yapılacak ve test sonuçları verilecektir.

4.3.1 Taşıyıcı Frekans Takibi

Navigasyon bilgisinin doğru bir şekilde kip çözümlemesinin yapılabilmesi için taşıyıcı frekansın çok hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Taşıyıcı frekans takibi için bir evre kenetlenme devresi (PLL) kullanılacaktır.

Şekil 3-5’te temel bir evre kenetleme devresi gösterilmiştir. Ancak, sıradan bir PLL devresinin problemi 180° ’lik faz kaymalarına karşı hassas olmasıdır. GPS sinyallerinde navigasyon bilgisindeki bit değişimlerinde 180° ’lik faz kaymaları olduğundan, 180° ’lik faz kaymalarına duyarlı olan bir PLL devresi kullanılmalıdır.

Şekil 4-18'de 180°'lik faz kaymalarına duyarlı olmayan Costas döngüsü (Costas Loop) görülmektedir. Bu döngü navigasyon bitlerinin değişiminden bağımsız olarak taşıyıcı sinyali takip edebilecektir. Bu sebeple GPS alıcılarında taşıyıcı frekans takibi için Costas döngüsü kullanılır [7; 26].



Şekil 4-18 Taşıyıcı Frekans takibi için kullanılan Costas Loop devresi

Şekil 4-18'de görülen Costas döngüsünde 2 çarpma işlemi vardır. Birincisi, gelen sinyal ile yerel üretilen taşıyıcı sinyal; ikincisi ise gelen sinyal ile üretilen taşıyıcı sinyalin 90° faz kaydırılmış hali arasındadır. Costas döngüsünün amacı eşvre (*I*, *in-phase*) kolundaki sinyalin takibini yapmaktır. *I* kolundaki sinyalin takibini yapabilmek için NCO taşıyıcı üretecine bir geri besleme yapılması gerekmektedir. Şekil 4-18'deki PRN kodun gelen sinyaldeki kodla bire bir uyduğuna kabul edersek *I* kolundaki (üst koldaki) çarpımın sonucunda:

$$D^k(n)\cos(\omega_{IF}n)\cos(\omega_{IF}n + \varphi) = \frac{1}{2} D^k(n)\cos(\varphi) + \frac{1}{2} D^k(n)\cos(2\omega_{IF}n + \varphi) \quad (4.21)$$

φ , gelen sinyalin fazıyla üretilen taşıyıcı sinyalin fazı arasındaki farktır.

Q kolundaki (alt koldaki) çarpımın sonucunda:

$$D^k(n)\cos(\omega_{IF}n)\sin(\omega_{IF}n + \varphi) = \frac{1}{2} D^k(n)\sin(\varphi) + \frac{1}{2} D^k(n)\sin(2\omega_{IF}n + \varphi) \quad (4.22)$$

elde edilir.

Bu sinyaller düşük geçiren filtreden geçirildikten sonra yüksek frekanslı bileşenlerinden arınmış olurlar:

$$I^k = \frac{1}{2} D^k(n) \cos(\varphi) \quad (4.23)$$

$$Q^k = \frac{1}{2} D^k(n) \sin(\varphi) \quad (4.24)$$

Faz hatası ise şu şekilde bulunabilir:

$$\frac{Q^k}{I^k} = \frac{\frac{1}{2} Dk(n) \sin(\varphi)}{\frac{1}{2} Dk(n) \cos(\varphi)} = \tan \varphi \quad (4.25)$$

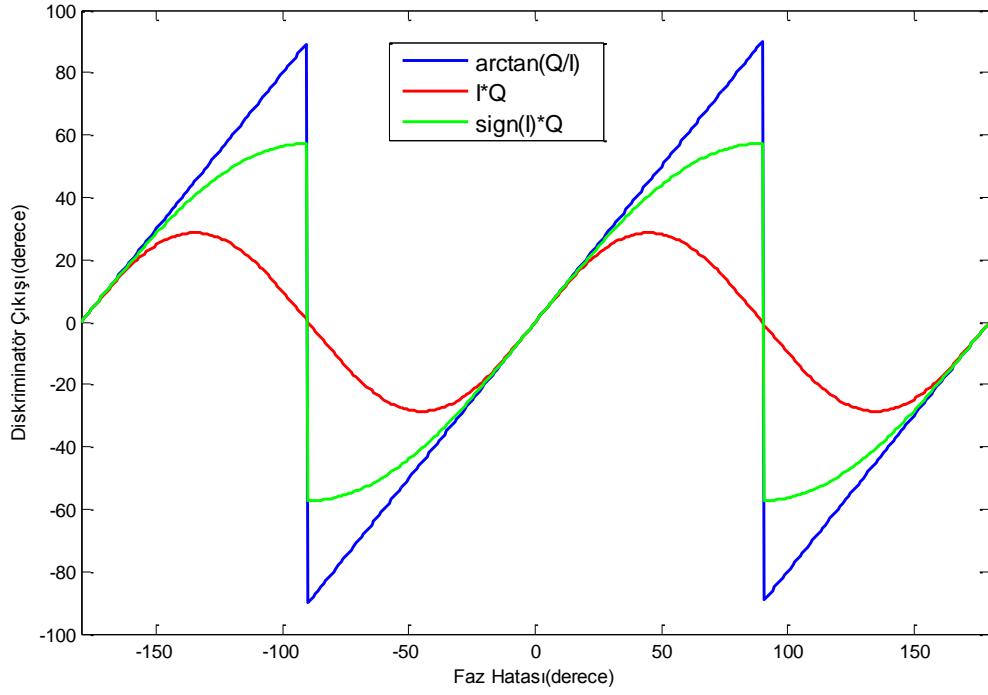
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{Q^k}{I^k} \quad (4.26)$$

Bu arktanjan ayırtaç (discriminator) zaman kaybı yüksek olsa da en kesin sonucu verir. Çizelge 4-8'de Costas döngüsü için kullanılabilecek çeşitli ayırtaçlar görülebilir [7; 27].

Çizelge 4-8: Costas Döngüsü Ayırtaç Çeşitleri [7; 27]

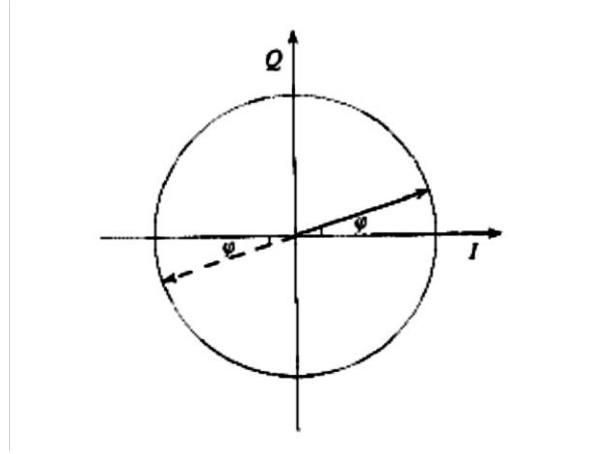
AYIRTAÇ	KARAKTERİSTİĞİ
$D = \text{sign}(I^k)Q^k$	Çıkışı $\sin(\varphi)$ ile orantılıdır.
$D = I^kQ^k$	Çıkışı $\sin(2\varphi)$ ile orantılıdır.
$D = \tan^{-1} \frac{Q^k}{I^k}$	Çıkış direk olarak faz hatasını (φ) verir.

Şekil 4-19'da Costas döngüsü için kullanılabilecek farklı ayırtaçların tepki grafikleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi faz hatası 0 ve $\pm 180^\circ$ olduğunda ayırtaç çıkışları sıfırdır. Bu sayede navigasyon bit değişiminden kaynaklı 180° 'lik faz kaymaları sinyal takibini etkilemeyecektir [7; 27].



Şekil 4-19 Farklı ayırtaçların (Diskriminatör) tepki grafikleri

180°'lik bir faz kayması olduğunda Costas Döngüsünün tepkisi Şekil 4-20'de daha açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu şekilde I^k ve Q^k 'nin vektörel toplamı koordinat düzleminde vektörel olarak gösterilmiştir. Yerel olarak üretilen taşıyıcı sinyal, gelen sinyal ile aynı fazda ise vektör I ekseninde olacaktır; ancak şekilde ufak bir faz farkı (φ) gösterilmiştir. Sinyal doğru bir şekilde takip edilebildiği sürece vektör I ekseninde kalma eğiliminde olacaktır. Navigasyon bitlerinin değişiminden kaynaklı, 180°'lik bir faz kayması olursa vektör de fazör şeması üzerinde 180° dönecektir (kesik çizgi ile gösterilmiştir). Bu sayede navigasyon biti değişimi olduğunda bile Costas döngüsü sinyal takibini devam ettirecek ve herhangi bir kesinti yaşanmayacaktır. Bu özelliği sebebiyle Costas döngüsü GPS takip döngülerinde kullanımı en çok tercih edilen PLL devresidir [7; 27].



Şekil 4-20 Gelen sinyal ile yerel üretilen taşıyıcı sinyal arasındaki faz hatasının fazör şeması [7]

Taşıyıcı Döngü Filtresi

Hem taşıyıcı frekans takibi için kullanılan Costas döngüsünün, hem de kod takibi için kullanılacak olan DLL döngüsünün; analitik ve doğrusal PLL modelleri vardır. Bu modeller, döngü filtrelerinin tasarımı ve performanslarının kestirimi için kullanılabilir. Bu doğrusal model Ziemer ve Peterson [28] tarafından geliştirilmiştir ve oldukça kullanışlı bir araçtır. Doğrusal PLL devrelerinin parametrelerinin ve performanslarının kestiriminde kullanılabilecek bir diğer çalışma da Best [29] tarafından yapılmıştır.

İkinci dereceden bir PLL devresi, birinci dereceden bir filtre ve Voltaj Kontrollü Osilatör (VCO - Voltage Controlled Oscillator) içerir. Analog bir döngü filtresinin ve Voltaj Kontrollü Osilatörün transfer fonksiyonları şu şekildedir [7; 30]:

$$F(s) = \frac{1}{s} \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1} \quad (4.27)$$

$$N(s) = \frac{K_o}{s} \quad (4.28)$$

F(s) ve N(s) sırasıyla filtre ve Numerik Kontrollü Osilatörün (NCO) transfer fonksiyonlarıdır. K_o NCO'nun kazanç katsayısıdır. Analog bir PLL devresinin doğrusal transfer fonksiyonu ise şu şekilde yazılabilir [7; 30]:

$$H(s) = \frac{K_d F(s) N(s)}{1 + K_d F(s) N(s)} \quad (4.29)$$

K_d faz ayırtacının kazancıdır. Denklem (4.27) ve (4.28), denklem (4.29) içine dağıtılırsa [7; 30]:

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.30)$$

şeklinde bulunur.

Doğal frekans, $\omega_n = \sqrt{(K_o K_d)/\tau_1}$ ve sönüm oranı, $\zeta = (\tau_2 \omega_n)/2$ şeklindedir. Denklem (4.30)'da verilen transfer fonksiyonu analog formdadır ve sayısal hale çevrilmesi için çift doğrusal (bilinear) çevrim yapılmalıdır. Bu çevrim sonucunda oluşan PLL sayısal transfer fonksiyonu [7; 30]:

$$H_1(z) = \frac{(4\zeta\omega_n T + (\omega_n T)^2) + 2(\omega_n T)^2 z^{-1} + ((\omega_n T)^2 - 4\zeta\omega_n T)z^{-2}}{(4 + 4\zeta\omega_n T + (\omega_n T)^2) + (2(\omega_n T)^2 - 8)z^{-1} + (4 - 4\zeta\omega_n T + (\omega_n T)^2)z^{-2}} \quad (4.31)$$

olarak verilir.

Sayısal filtre ve numerik kontrollü osilatörün transfer fonksiyonları [7; 30]:

$$F(z) = \frac{(C_1 + C_2) - C_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.32)$$

$$N(z) = \frac{K_0 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (4.33)$$

olarak yazılabilir.

Burada, filtrenin katsayıları C_1 ve C_2 nin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplama, analog PLL'in transfer fonksiyonu ile sayısal PLL'in transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması ile yapılabilir. Sayısal PLL'in transfer fonksiyonu [7; 30]:

$$H(z) = \frac{\theta_o(z)}{\theta_i(z)} = \frac{K_d F(z) N(z)}{1 + K_d F(z) N(z)} \quad (4.34)$$

olarak alınır ve denklem (4.32) ve (4.33), denklem (4.34)'e dağıtılırsa transfer fonksiyonu şu hale gelir [7; 30]:

$$H_2(z) = \frac{K_0 K_d (C_1 + C_2) z^{-1} - K_0 K_d C_1 z^{-2}}{1 + (K_0 K_d (C_1 + C_2) - 2) z^{-1} + (1 - K_0 K_d C_1) z^{-2}} \quad (4.35)$$

Denklem (4.31)'deki $H_1(z)$ ile denklem (4.35)'teki $H_2(z)$ birbirlerine eşitlenirse, C_1 ve C_2 için aşağıdaki eşitlikler bulunur [7; 30]:

$$C_1 = \frac{1}{K_0 K_d} \frac{8\zeta\omega_n T}{4 + 4\zeta\omega_n T + (\omega_n T)^2} \quad (4.36)$$

$$C_2 = \frac{1}{K_0 K_d} \frac{4(\omega_n T)^2}{4 + 4\zeta\omega_n T + (\omega_n T)^2} \quad (4.37)$$

Doğal frekans ise şu şekilde hesaplanabilir [7; 30]:

$$\omega_n = \frac{8\zeta B_L}{4\zeta^2 + 1} \quad (4.38)$$

Burada, B_L gürültü bant genişliğini göstermektedir.

Sönüm oranı ve gürültü bant genişliği, uygulamaya ve sinyal gürültü oranına göre seçilmelidir.

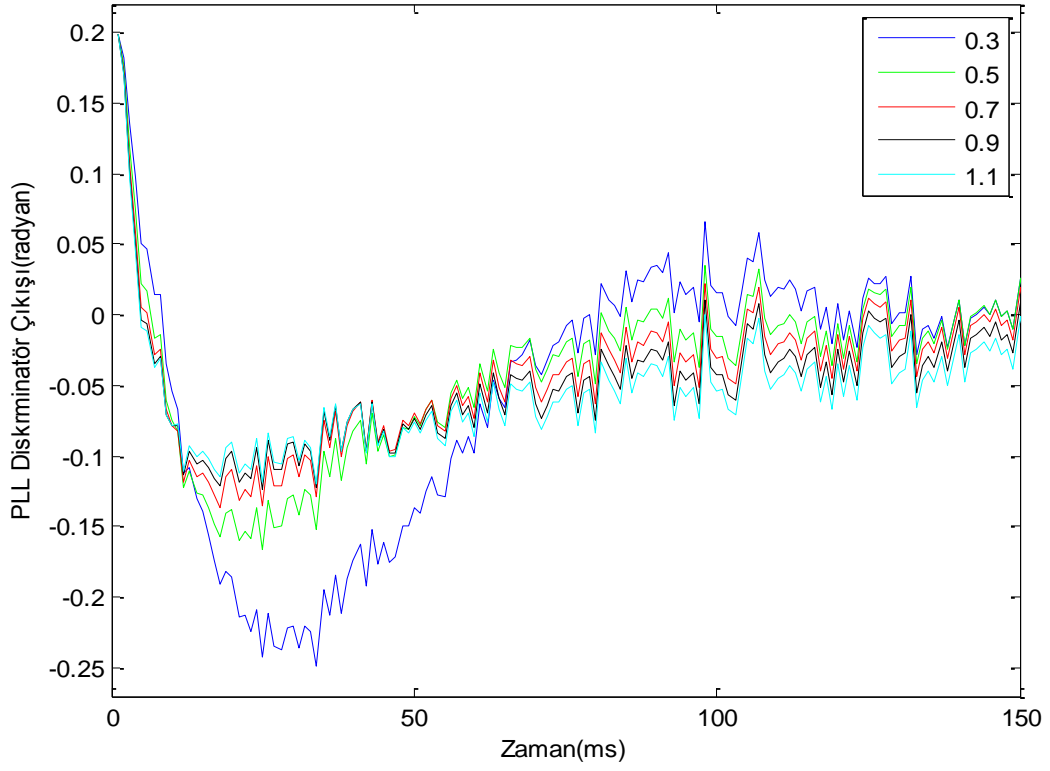
Sönüm Oranı

Sönüm oranı, filtrenin istenen değere ulaşma hızını ve aşım miktarını kontrol etmektedir. Küçük bir sönüm oranı hızı arttırmakta, ancak aşım miktarını büyütmektedir. Şekil 4-21'de farklı sönüm oranı değerlerine göre oluşan tepkiler verilmiştir. Şekilde en yüksek aşım miktarının, en düşük sönüm oranında; en düşük aşım miktarının ise en yüksek sönüm oranında olduğu görülebilir.

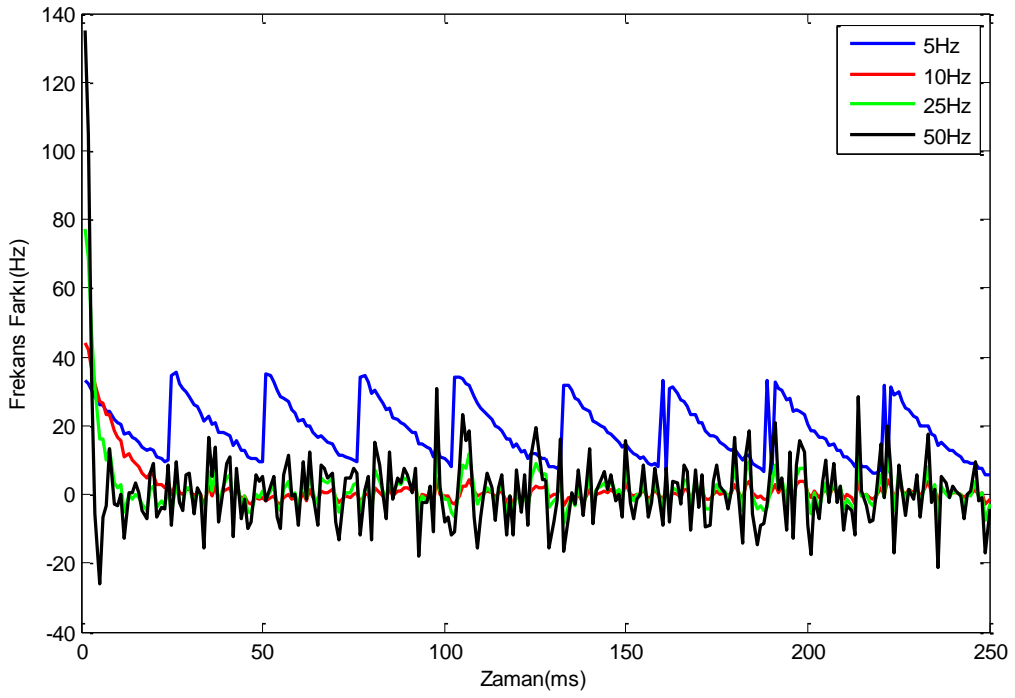
Sönüm oranı seçimi hız ve aşım miktarı dengesini sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Sönüm oranı, hem yeterince hızlı hem de çok aşım yapmayacak şekilde $\zeta = 0.7$ olarak seçilmiştir.

Gürültü Bant Genişliği

Gürültü bant genişliği, filtrede izin verilecek gürültü oranını belirlemektedir. Bu değer aynı zamanda, sönüm oranında olduğu gibi, yatışma süresini de etkilemektedir. Takip döngüsü, başlaması için gerekli olan ilk frekans bilgisini sinyal yakalama işleminden alır. Sinyal yakalama işleminde bulunan başlangıç frekansı bir miktar hatalı olabilir. Takip döngüsü bu değerden başlayarak gerçek değere kilitlenir. Farklı gürültü bant genişlik tercihlerinin etkilerini incelenmesi amacıyla, gerçek GPS sinyali kullanılarak 4 farklı (5 Hz, 10 Hz, 25 Hz ve 50 Hz) gürültü bant genişliği ile takip döngüsünün performansına bakılmıştır. Takip döngüsünün çıkışını gösteren grafik Şekil 4-22'de verilmiştir. Burada başlangıç frekansının, sinyal yakalama işleminden 22 Hz kadar hatalı gelmesi sağlanmıştır.



Şekil 4-21 Farklı sönüm oranlarına göre faz hatası grafiği



Şekil 4-22 Farklı gürültü bant genişliklerine göre filtre tepkileri grafiği

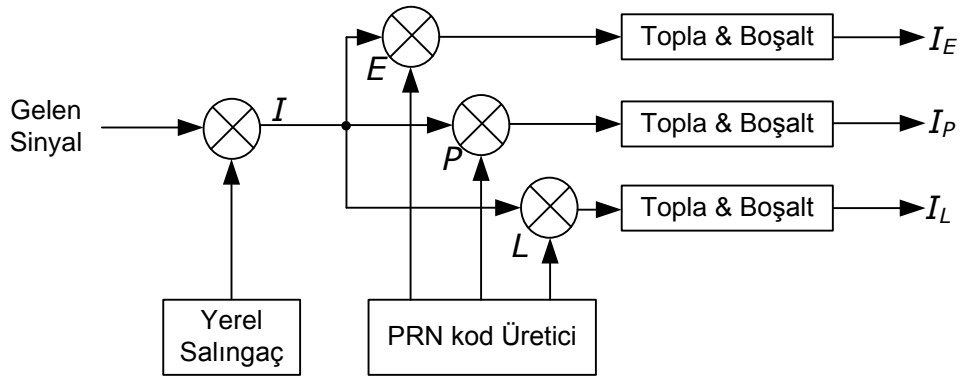
Şekil 4-22’de bant genişliği 50 Hz seçildiğinde, takip döngüsünün doğru frekansı çok hızlı bulduğu ancak çok fazla gürültüye izin verildiği görülmektedir. Gürültü bant genişlikleri azaldıkça, doğru frekansı bulma süresi uzamakta ancak izin verilen gürültü miktarı düşmektedir. Şekilde; 5Hz’lik bant genişliğinin, 22 Hz’lik başlangıç hatası ile takip döngüsüne başlamak için yeterli olmadığı da görülmektedir.

GPS’in yer uygulamalarında tipik olarak kullanılan gürültü bant genişliği 20 Hz’dir. Şekil 4-22’deki sonuçlara bakıldığında 20-25 Hz’lik bant genişliği kullanmanın uygun olduğu görülmektedir.

4.3.2 PRN Kod Takibi

Kod takibinin amacı gelen sinyalin kod fazını takip etmek ve sinyalin koduyla aynı fazda bir kod çıkarmaktır. GPS alıcılarında kod takibi için erken-geç takip döngüsü (early-late tracking loop) adında bir gecikme kilitleme döngüsü (DLL) kullanılır. DLL devresinde ana fikir, Şekil 4-23’te gösterildiği gibi gelen sinyali kodun 3 farklı fazındaki haliyle ilintilendirmektir [7].

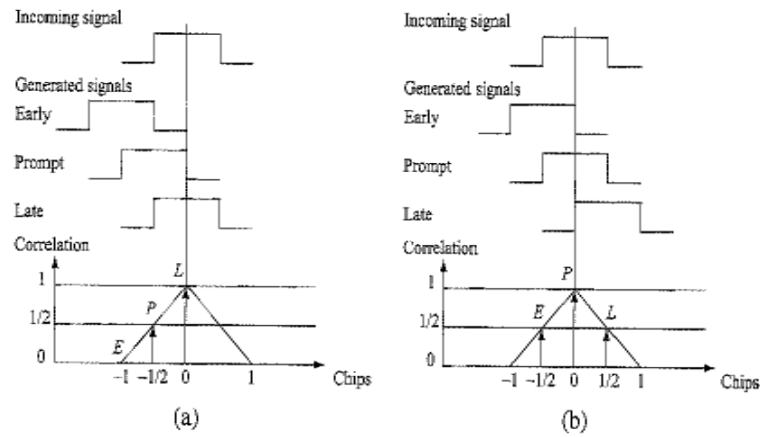
Şekil 4-23’te ilk aşama, gelen sinyali taşıyıcı frekansından arındırarak C/A kodu temel banda indirmektir. Daha sonra sinyal 3 farklı fazdaki kodla çarpılır. Bu kodlar arasındaki faz farkları yarım ($\pm\frac{1}{2}$) çip kadardır. Çarpım işleminden sonra, bu üç çıkış; takip için kullanılacak sinyal parçası boyunca toplanır ve boşaltılır. Bu üç toplama işleminin sonucunda elde edilen sayısal büyüklükler, gelen sinyal ile ilgili koldaki kod arasındaki ilintinin büyüklüğünü vermektedir [7].



Şekil 4-23 Temel bir kod takip döngüsü blok şeması [7]

Şekil 4-23'te E ile gösterilen kolda C/A kod $\pm\frac{1}{2}$ çip kadar erkene alınmıştır ve bu kola erken kapı (early gate) denir. P ile gösterilen kolda C/A kod hiç bir yönde kaydırılmaz ve bu kola eş-zaman kapısı (prompt gate). L ile gösterilen kolda C/A kod $\pm\frac{1}{2}$ çip kadar geciktirilmiştir ve bu kola geç kapı (late gate) denir.

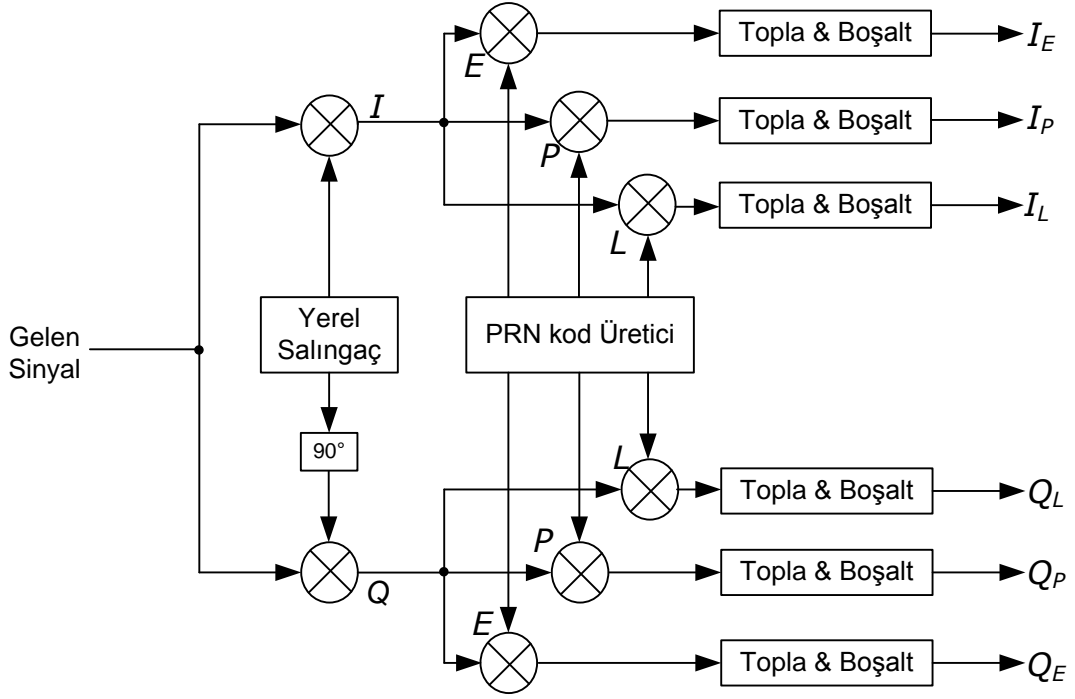
Üç koldaki ilinti sonucu; I_E , I_P ve I_L karşılaştırılarak hangi koldaki ilinti sonucunun en yüksek olduğuna bakılır. Şekil 4-24, bir kod takibi örneğindeki ilinti sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4-24-a'da geç kapı kodu en yüksek ilinti sonucuna sahiptir ve kod fazı azaltılmalıdır. Şekil 4-24-b'de ise en yüksek ilinti eş-zaman kapısındadır, erken ve geç kapılar eşit ilintiye sahiptir. Bu, kodun fazının yakalandığını göstermektedir [7].



Şekil 4-24 Kod takibi, üç koldaki ilinti sonuçları [7].

Şekil 4-23'teki gibi 3 üç kapılı bir DLL devresi, sadece taşıyıcı sinyalin hem frekans hem de fazının ikisinin beraber iyi yakalanabildiği durumlarda iyi sonuç verir. Ancak üretilen taşıyıcı sinyaldeki bir faz hatası sinyalin daha gürültülü olmasına ve DLL devresinin kod takibini yapamamasına sebep olacaktır. Bu sebeple GPS alıcılarında DLL devreleri çoğunlukla Şekil 4-25'teki gibi 6 kapılı olarak tasarlanırlar [7].

Şekil 4-25'teki DLL devresi taşıyıcı sinyalin fazından bağımsız olarak çalışır. Yerel olarak üretilen taşıyıcı sinyal, gelen sinyal ile aynı fazda ise bütün enerji eşevre (I) kolunda olacaktır. Ancak aralarında bir faz hatası var ise enerji eşevre ve dikevre (Q) kollarının ikisinde paylaşılacaktır. Her 2 koldaki ilinti sonuçları kullanılarak taşıyıcı sinyaldeki faz hatasının getireceği problemler giderilebilmektedir [7].



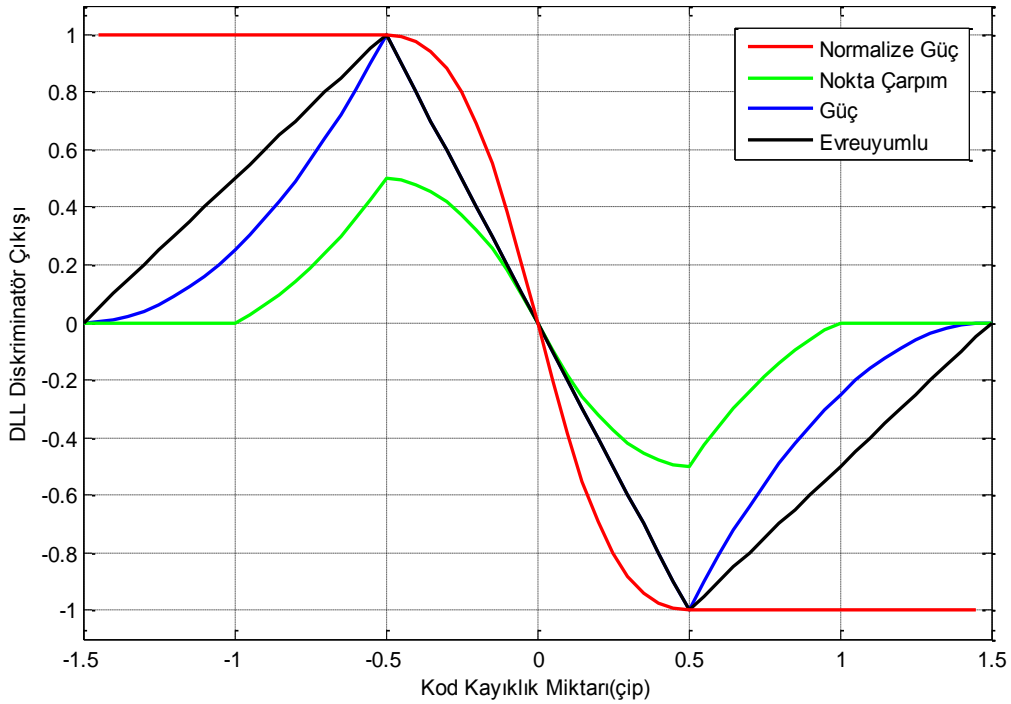
Şekil 4-25 6 kapılı DLL devresi [7]

Kod takibinin yapılabilmesi için PRN kod üreticisine bir geri besleme yapılması gerekmektedir. Çizelge 4-9'da DLL döngülerinde sıklıkla kullanılan ayırtaç örnekleri verilmiştir [7; 31].

Çizelge 4-9'da, bir evre uyumlu, üç tane de evre uyumsuz ayırtaç verilmiştir. Bir DLL devresinde kullanılacak ayırtaç çeşidi uygulamaya ve sinyaldeki gürültü miktarına bağlıdır. Çizelgede verilen ayırtaçların tepkilerini gösteren grafik Şekil 4-26'da verilmiştir [7; 31].

Çizelge 4-9: DLL, kod takip döngüsü için kullanılabilir ayırtaç çeşitleri [7]

TİPİ	AYIRTAÇ	KARAKTERİSTİK
Evreyumlu (Coherent)	$I_E - I_L$	En basit yapıdır. Q koluna ihtiyaç duymaz ancak taşıyıcı frekans takibinin çok iyi yapılıyor olması gerekmektedir.
Evreyumsuz (Noncoherent)	$(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)$	Güç (Power), $\pm \frac{1}{2}$ çip aralığında evreyumlu ayırtaç ile neredeyse aynı tepkiyi verir.
	$\frac{(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)}{(I_E^2 + Q_E^2) + (I_L^2 + Q_L^2)}$	Normalize Güç (Normalized Power), $\pm \frac{1}{2}$ çipten büyük faz hatalarının olduğu gürültülü sinyallerde bile DLL'in takibi devam ettirmesini sağlar.
	$I_P (I_E - I_L) + Q_P (Q_E - Q_L)$	Nokta Çarpım (Dot Product), bütün ilinti sonuçlarını kullanır.



Şekil 4-26 Çizelge 4-9'da verilen DLL ayırtaçlarının (diskriminatör) tepkileri

Şekil 4-26'da tepkileri verilen ayırtaçlar, aralarında $\pm\frac{1}{2}$ çip kadar faz kayması olan erken, eş-zaman ve geç kapılara ait C/A kodlarıyla test edilmiştir. Erken, eş-zaman ve geç kapı kodları arasındaki kod kayıklık miktarı, DLL devresindeki gürültü bant genişliğini belirlemektedir. Kod kayıklık miktarı $\pm\frac{1}{2}$ çipten büyük olduğunda, DLL devresi daha geniş dinamikleri takip edebilecek ve gürültüye karşı daha gürbüz olacaktır. Ancak, diğer yandan; daha küçük kod kayıklığı, sonucun daha kesin olmasını sağlayacaktır.

Uygulamada, PRN kod takibi için Normalize Güç Ayırtacı kullanılacaktır. Ayırtaç şu şekildedir:

$$D = \frac{(I_E^2 + Q_E^2) - (I_L^2 + Q_L^2)}{(I_E^2 + Q_E^2) + (I_L^2 + Q_L^2)} \quad (4.39)$$

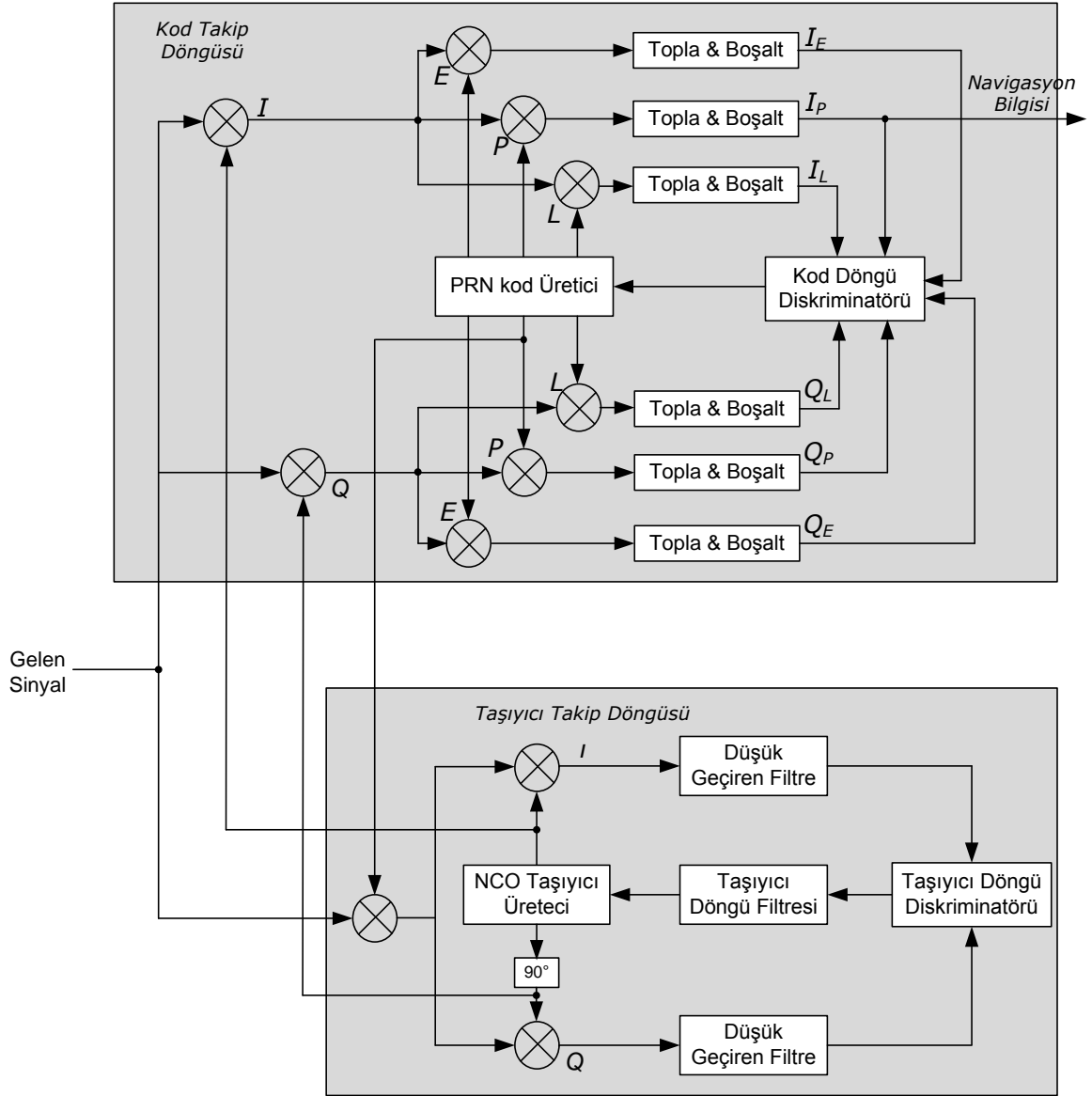
Normalize Güç Ayırtacı, hem I hem de Q kollarındaki çıkışları kullanmaktadır bu sebeple taşıyıcı sinyalin faz hatasından bağımsızdır. Aynı zamanda, Şekil 4-26'da da görülebileceği gibi sadece Normalize Güç Ayırtacı 0.5'ten büyük kod kayıklıklarında, kod kayıklığını sıfıra çekebilmektedir. Bu sebeple normalize güç ayırtacı daha gürültülü ve daha düşük güçlü sinyallerin takibini yapabilecektir. Bu avantajları sebebiyle normalize güç ayırtacı seçilmiştir.

4.3.3 Birleştirilmiş Takip Döngüsü

Önceki bölümlerde, taşıyıcı frekans ve PRN kod takip döngüleri detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde de bu iki döngünün işlem sayısını en aza indirecek şekilde nasıl bir araya getirileceği anlatılacaktır.

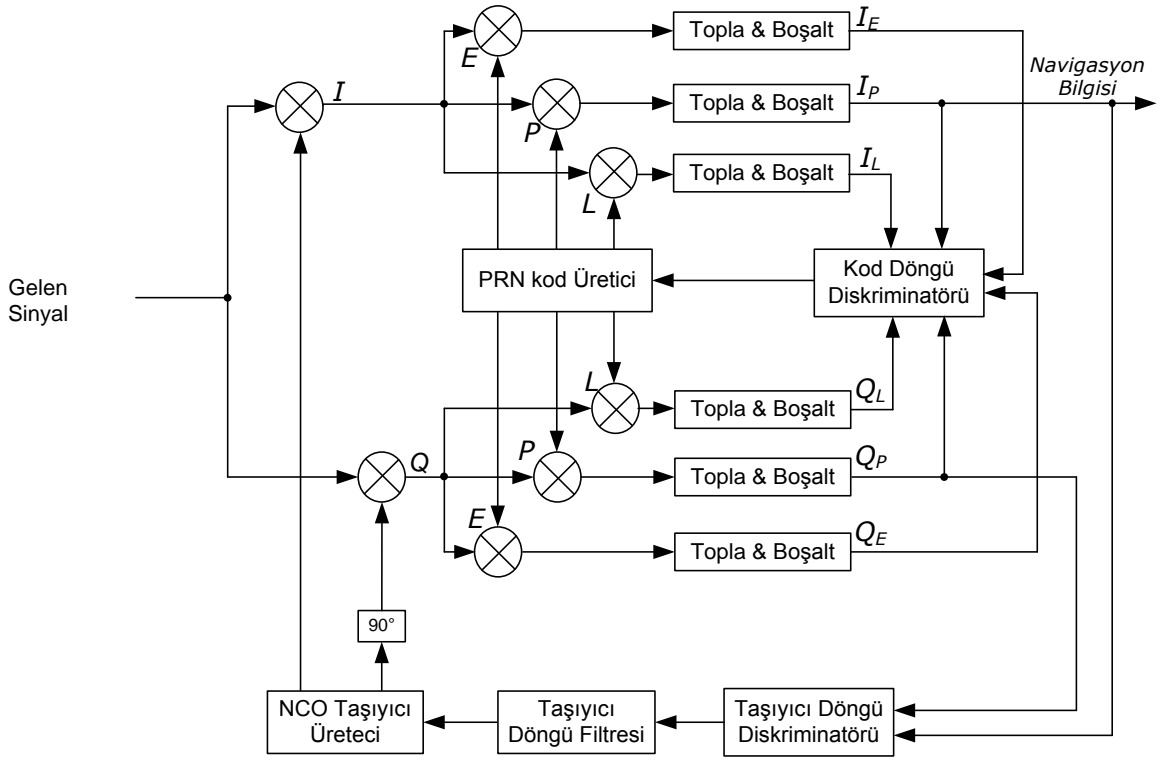
Şekil 4-27'de taşıyıcı frekans ve kod takip döngülerinin birleştirilmiş hali görülmektedir. Şekilde, taşıyıcı frekans takip döngüsünde PRN kodun kip çözümü için kullanılan kodun kod takip döngüsünden geldiği görülebilir. Şekilden, aynı zamanda; kod takip döngüsünde taşıyıcı sinyalin kip çözülmesi için gerekli sinyallerin taşıyıcı frekans döngüsünden geldiği de görülebilir.

Şekil 4-27'deki birleştirilmiş takip döngüsü 11 tane çarpım işlemi içermektedir. Takip döngüsünde en çok zaman harcanan bloklar çarpım işlemleridir. Bu çarpım işlemlerinin azaltılması döngünün daha hızlı çalışmasını sağlayacaktır.



Şekil 4-27 Birleştirilmiş taşıyıcı frekans ve kod takip döngüleri [7]

Şekil 4-28'de birleştirilmiş takip döngüsünün eniyileştirilmiş hali gösterilmiştir. Bu döngüde, taşıyıcı ayırtacının I ve Q girişleri I_P ve Q_P olarak seçilmiştir. Böylece Costas döngüsündeki 3 çarpım işlemine ihtiyaç kalmamış ve takip döngüsü hızlandırılmıştır.

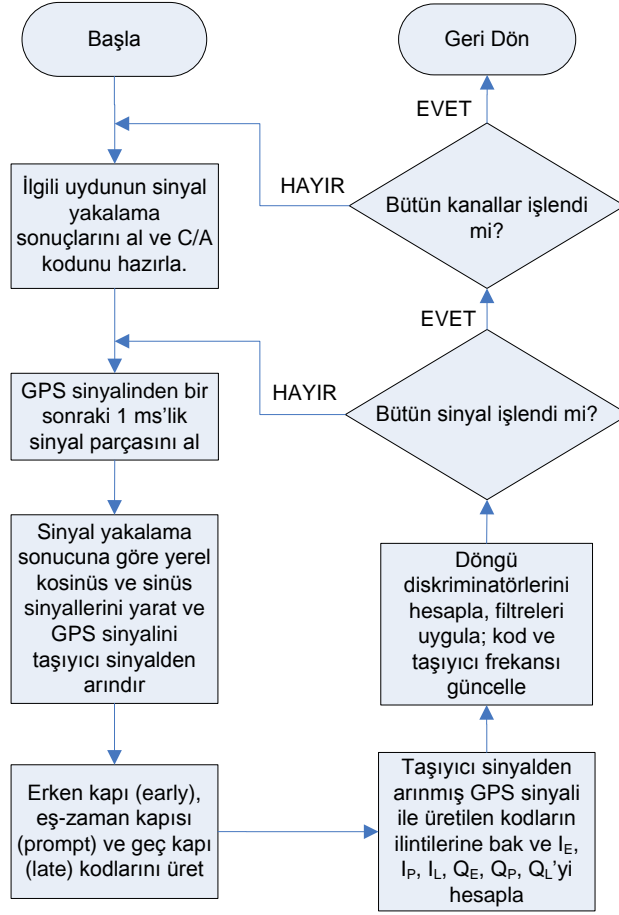


Şekil 4-28 GPS alıcısında kullanılan takip döngüsü blok şeması [7]

Şekil 4-28’de verilen, birleştirilmiş takip döngüsünü gerçekleştiren yazılımsal kodun akış şeması Şekil 4-29’da verilmiştir. Kod yakalanan her uydu için bir kanal atayarak, her defasında bir kanalın takibini yapmaktadır. Her defasında, o kanala atanmış olan uydunun bilgileri alınmakta ve sinyal birer milisaniyelik parçalar halinde takip edilmektedir.

Öncelikle, alınan 1 milisaniyelik GPS sinyali, yakalama kısmında bulunan taşıyıcı frekans kullanılarak temel banda indirilmekte ve daha sonra üretilen erken, eş-zaman ve geç kapı kodlarıyla ilintilerine bakılmaktadır. Hesaplanan 6 ilinti sonucu (I_P , I_E , I_L , Q_P , Q_E , Q_L) kullanılarak döngü ayırtıcı hesaplanmakta ve döngü filtreleri uygulanarak yeni taşıyıcı frekans ve kod kayıklığı bulunmaktadır. Taşıyıcı frekans ve kod kayıklığı düzeltilerek, sonraki 1 milisaniyelik sinyal parçasına geçilmektedir.

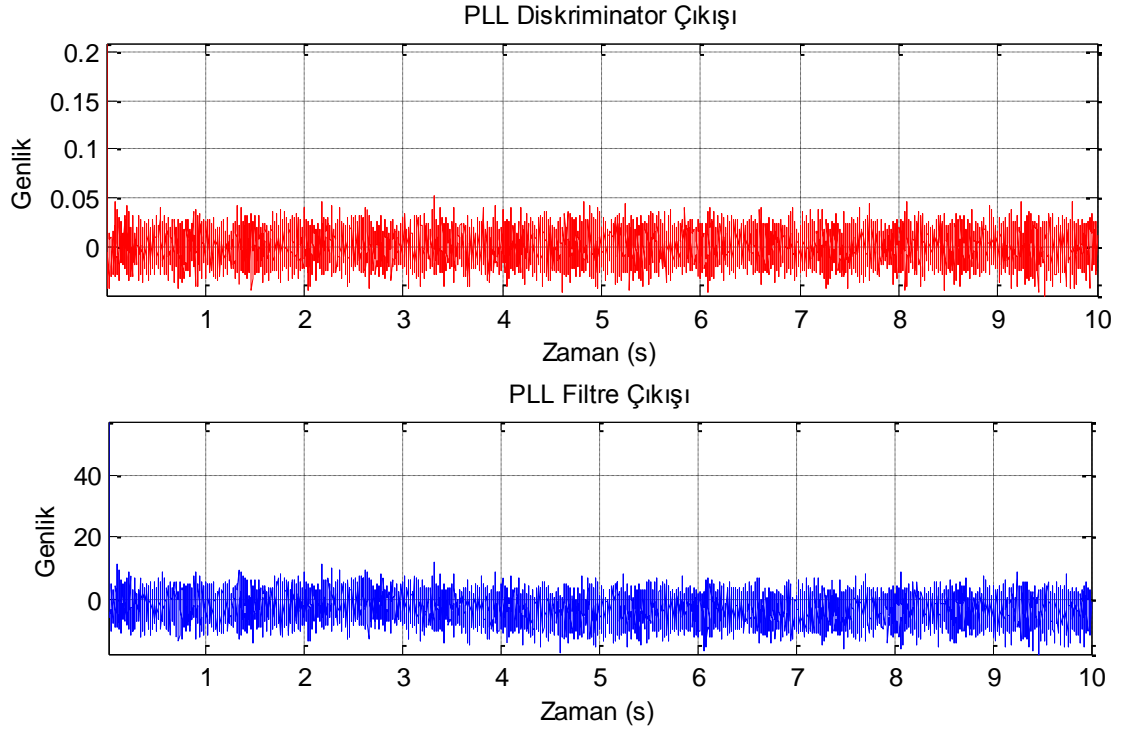
Takip döngüsünün çıktısı, konum hesaplamalarında kullanılacak olan navigasyon bilgisidir.



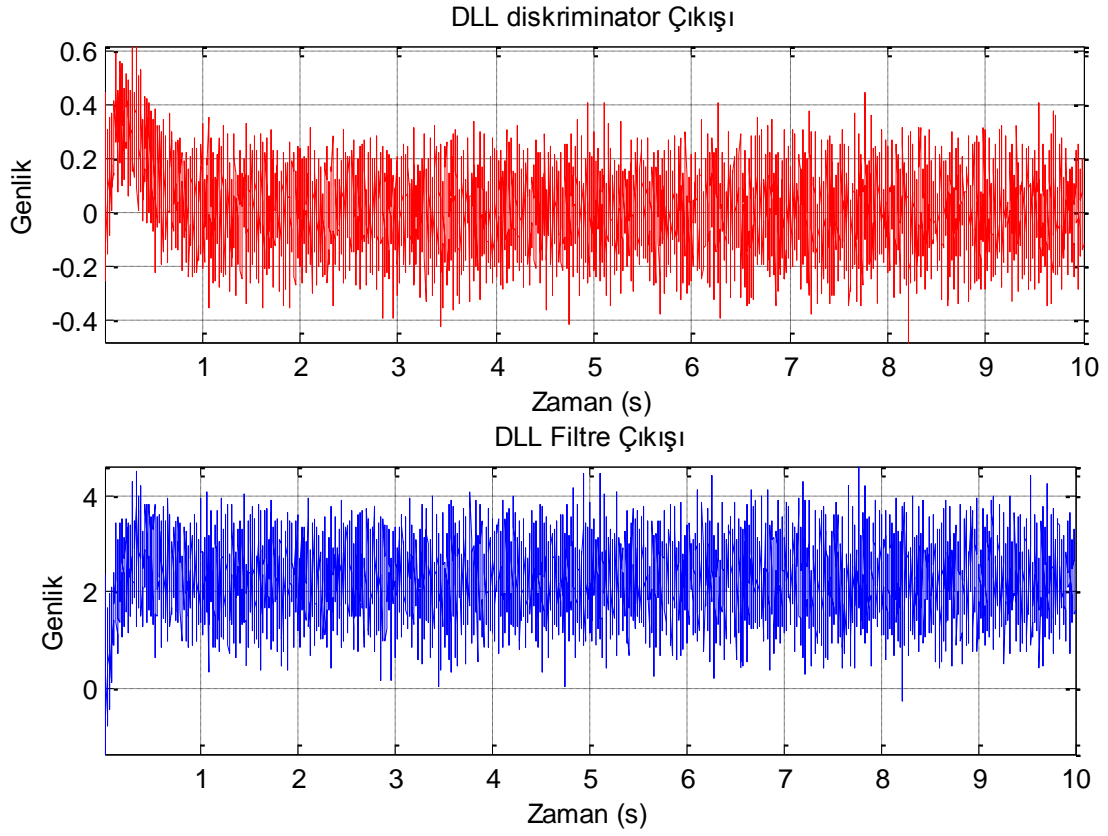
Şekil 4-29 GPS alıcısında kullanılan takip döngüsü akış şeması

Geliştirilen yazılım tabanlı sinyal takip kodu, 10 saniyelik GPS sinyali ile test edilmiştir. Şekil 4-30'da 10 saniyelik sinyalin takibi esnasında hesaplanan PLL ayırtacının ve PLL döngü filtresinin çıktıları verilmiştir. Grafikte ilk değer (sinyal yakalama sonucunda elde edilen) biraz hatalı olmasına rağmen, Costas döngüsünün çok kısa sürede doğru değere oturduğu ve taşıyıcı sinyal takibini doğru bir şekilde yapabildiği görülmektedir.

Şekil 4-31'de PRN kod takip döngüsünün (DLL) ayırtaç ve döngü filtre çıktıları verilmiştir. Şekilden, DLL döngüsünün başlarda biraz hatalı olsa da, kod takibini yapabildiği görülmektedir.

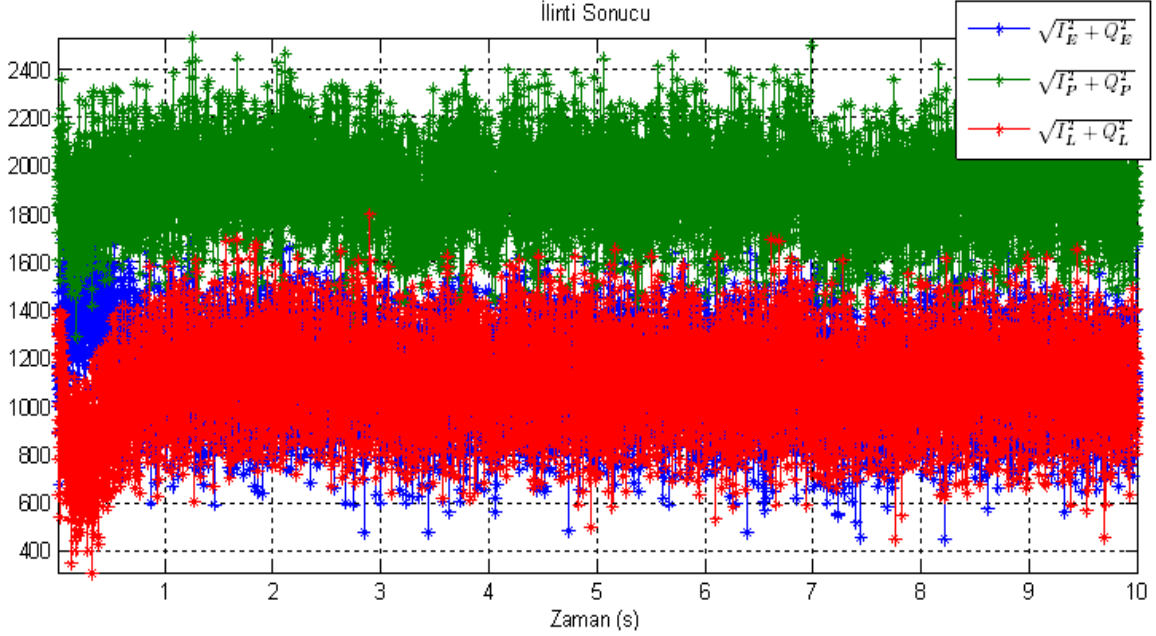


Şekil 4-30 PLL Ayırtaç ve Filtre çıkışları



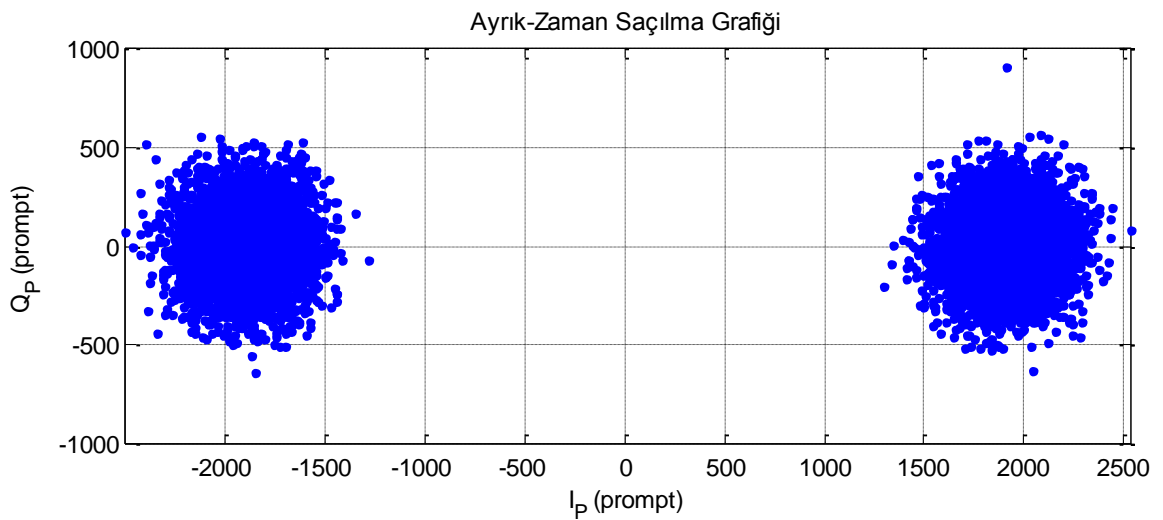
Şekil 4-31 DLL Ayırtaç ve Filtre çıkışları

Şekil 4-32'de takip döngüsünün her koldaki ilinti sonuçları verilmiştir. Şekilde; eş-zaman, erken ve geç kapılarının hem I hem de Q kollarındaki bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökü gösterilmiştir. Bu değerleri her koldaki güç olarak kabul edebiliriz. En yüksek gücün eş-zaman kapısında görülmesi, takip döngüsünün GPS sinyalini doğru bir şekilde takip edebildiğini göstermektedir.



Şekil 4-32 Eş-zaman, erken ve geç kapıların ilinti sonuçları

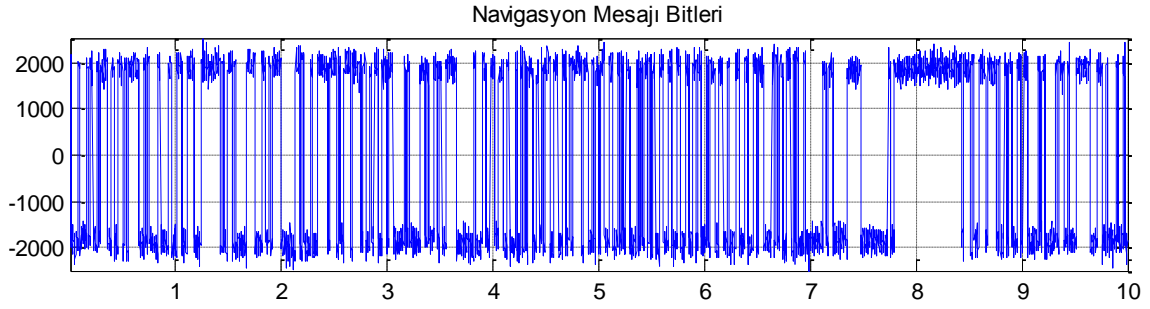
Şekil 4-33'te, eş-zaman (prompt) kapısında ilinti değerlerinin I ve Q kollarındaki dağılımı verilmiştir.



Şekil 4-33 Eş-zaman (prompt) kapısında, ilinti saçılma grafiği

İlinti sonucunun I kolunda, Q kolundan çok daha büyük olması, taşıyıcı takip döngüsünün taşıyıcı fazını da iyi takip edebildiğini göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, taşıyıcı faz hatası arttıkça ilinti sonucu Q koluna doğru kayacaktır.

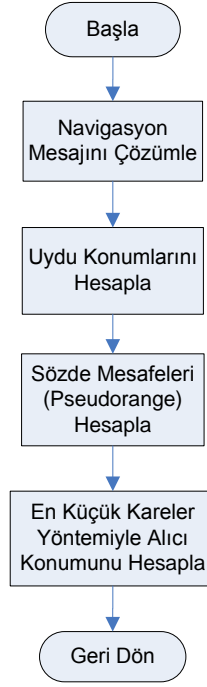
Şekil 4-34'te takip döngüsü sonucunda ortaya çıkan Navigasyon mesajı bitleri verilmiştir. Bu mesaj bilgisi, konum hesaplamalarında sözde mesafenin hesaplanması için kullanılacaktır. Navigasyon mesajı, aynı zamanda, uydu konumlarının ve zaman düzeltmelerinin hesaplanması için gerekli olan efemeris bilgilerini de içermektedir.



Şekil 4-34 Navigasyon mesajı bitleri

4.4 Konum Hesaplama

Sinyal takibi sonuçları kullanılarak, alıcı konumunun hesaplanmasına ait akış şeması Şekil 4-35'te verilmiştir. Akış şemasındaki her bölüm alt başlıklar halinde anlatılacaktır.

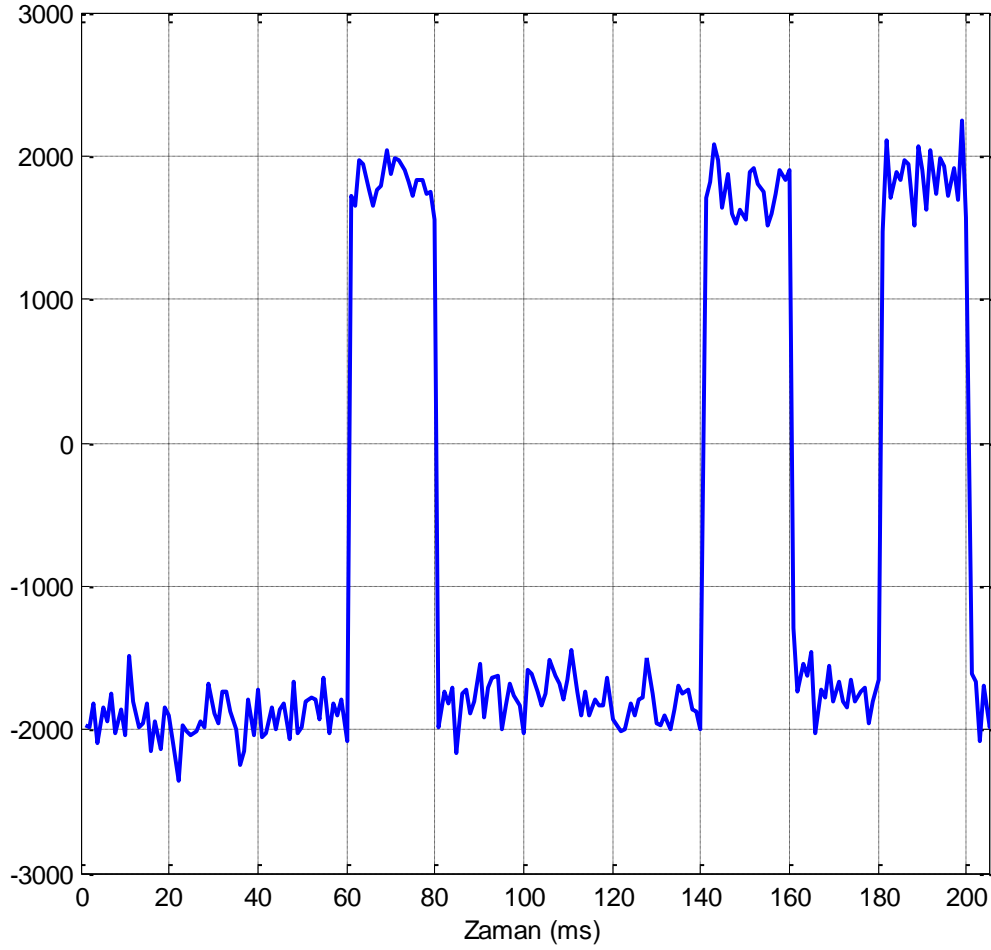


Şekil 4-35 Konum hesaplama akış şeması

4.4.1 Navigasyon Mesajının Çözülmesi

Sinyal takibi döngüsü sonucunda, eşvre kolunun çıktıları 1 ve -1 olarak değiştirildiğinde navigasyon mesajı elde edilir. Takip döngüsü sonucunda, her 1 milisaniyede bir bitlik bilgi elde edilir. Ancak, navigasyon mesajı bitlerinin 20 milisaniye uzunluğunda olması ve GPS sinyallerinin gürültülü ve zayıf sinyaller olması sebebiyle 20 milisaniyelik ortalamalar alınarak bir bitlik bilgi elde edilir [7].

Navigasyon mesajı bitlerinin doğru bir şekilde elde edilebilmesi için, ilk olarak her bir bitlik bilgiyi içeren 20'şer milisaniyelik kısımların belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla ilk bit değişiminin olduğu (+1'den -1'e ya da tersi) yer bulunur ve buradan başlanarak her 20 milisaniyelik kısımdan bir bit bilgisi elde edilir. Şekil 4-36'da takip döngüsü çıktısının, ilk bit değişiminin olduğu yerden itibaren 200 milisaniye uzunluğundaki bir parçası gösterilmiştir. Buradan navigasyon mesajına ait 10 bit çıkarılabilir. Şekilde her 20 milisaniyeden bir bitlik bilgi elde edildiğinde; 10 bitin "-1 -1 1 -1 -1 1 1 -1 1" şeklinde olduğu görülebilir.



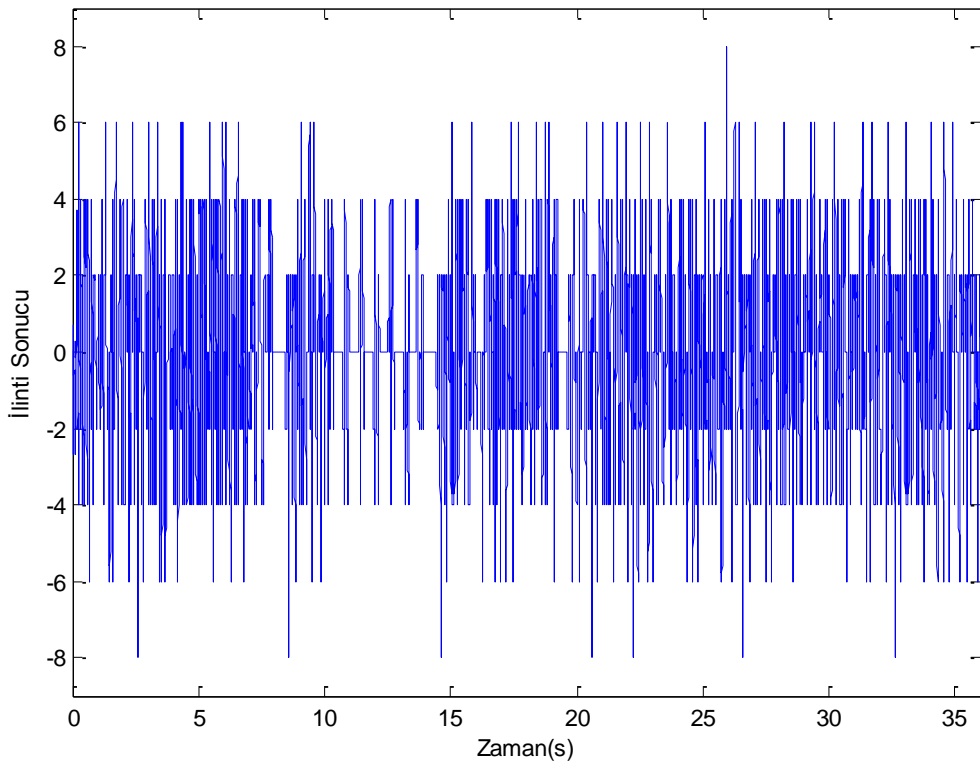
Şekil 4-36 Takip döngüsünün 200 milisaniyelik çıkışı

Takip döngüsünün çıktısı 50 Hz'lik bir bit dizisine çevrildikten sonra bu bitlerin çözümlenerek anlamlı bilgilere dönüştürülmesi gerekmektedir. Navigasyon mesajının yapısı bölüm 2.7.3'te verilmiştir. Takip döngüsü sonucunda elde edilen bit dizisinde; navigasyon mesajına ait çerçevelerin, alt çerçevelerin ve sözcüklerin bulunması ve çözümlenmesi gerekmektedir.

Navigasyon mesajının çözümlenmesinde ilk problem, bir alt çerçevenin başlangıç yerinin bulunmasıdır. Her alt çerçevenin başlangıcı 8 bitlik bir başlık ile işaretlenmiştir. Bu 8 bitlik başlık, 10001011 şeklindedir. Ancak, Costas döngüsünün sinyali 180° 'lik faz kaymasıyla da takip edebiliyor olması sebebiyle bu 8 bitlik dizi tersi şeklinde (01110100) de görülebilir. Bu 8 bitlik dizi, başlık dışında mesajın herhangi bir yerinde de görülebilir. Bu sebeple başlıkların bulunması için

başka arama yöntemleri de eklenmelidir. Başlıkların bulunması için kullanılan arama yöntemi, başlıkların 6 saniyede bir tekrar ettiğini de kontrol etmektedir. 6 saniyede bir tekrar eden başlık dizileri dışındaki aynı bit dizilimine sahip yerler başlık olarak alınmamaktadır [7].

Başlık araması, başlık bitleri ile takip döngüsü sonucu elde edilen navigasyon mesajının ilintisine bakılarak yapılmaktadır. Bu iki bit dizisinde de 0 yerine -1 kullanılmıştır. Böylece, başlığın eşleştiği yerlerde ilinti sonucu 8, tersinin eşleştiği yerlerde ise -8 olarak bulunmaktadır. Şekil 4-37'de, takip döngüsü sonucu elde edilen 36 saniyelik navigasyon mesajı ile 8 bitlik başlık arasındaki ilinti sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4-37 Navigasyon mesajı ile 8 bitlik başlık arasındaki ilinti sonucu

Şekil 4-37'de görüldü gibi, 36 saniyelik mesajda 6 alt çerçeve olmasına rağmen daha fazla yerde ilinti sonucu 8 ya da -8 olarak bulunmuştur. Burada sadece 6 saniyede bir olan ve eşlik (parite) kontrolünde hata olmayan yerler alt çerçeve başlığı olarak alınmaktadır. Şekilde, 6 saniyelik aralıklarla ilinti sonucunun -8 olduğu görülmektedir. Bu yerler, 6 alt çerçevenin başlangıç yerini göstermektedir.

Alt çerçevelerin başlangıç yerlerinin bulunmasıyla mesajın çözümlenmesine başlanabilir. Ancak, ilinti sonucunun -8 olması sebebiyle, bütün mesajın ters çevrilmesi gerekmektedir.

Navigasyon mesajı, bölüm 2.7.3'te anlatıldığı şekilde (IS-GPS-200D [25] dokümanında mesaj içeriği ayrıntılı bir şekilde bulunmaktadır) çözümlenebilir.

4.4.2 Uyduların Konumlarının Hesaplanması

Navigasyon mesajında, her uydunun konumunun hesaplanması için gerekli olan efemeris bilgileri bulunmaktadır. Bu bilgiler kullanılarak görülmekte olan uyduların anlık konumu hesaplanabilir.

Bölüm 4.2.3'te, uydu konumlarının nasıl hesaplandığı anlatılmış ve Çizelge 4-5'te de Almanak içerisindeki efemeris bilgileri verilmiştir. Ancak, her uydunun navigasyon mesajı içerisinde gönderdiği kendisine ait efemeris bilgileri daha hassas hesaplamalar için bazı düzeltme katsayıları içermektedir. Efemeris mesajının almanak içinde yer almayan ancak navigasyon mesajında bulunan, düzeltme terimleri Çizelge 4-10'da verilmiştir. Navigasyon mesajı ile gelen efemeris bilgisi hem Çizelge 4-5 hem de Çizelge 4-10'daki bilgilerin tamamını içermektedir.

Çizelge 4-10: Efemeris mesajının almanak içinde yer almayan ancak navigasyon mesajında bulunan, düzeltme terimleri [6; 25].

Δn	Ortalama hareketin hesaplanan değer ile farkı
IDOT	Yörünge eğiklik oranı
C_{uc}	Enlem, kosinüs harmoniği düzeltme terimi
C_{us}	Enlem, sinüs harmoniği düzeltme terimi
C_{rc}	Yörünge yarıçapı, kosinüs harmoniği düzeltme terimi
C_{rs}	Yörünge yarıçapı, sinüs harmoniği düzeltme terimi
C_{ic}	Yörünge eğiklik açısı, kosinüs harmoniği düzeltme terimi
C_{is}	Yörünge eğiklik açısı, sinüs harmoniği düzeltme terimi

Uydu konumları kaba bir şekilde, bölüm 4.2.3'te verilen (4.1)'den (4.12)'ye kadar olan denklemlerle hesaplanabilir. Ancak, uydu konumlarının daha hassas bir

şekilde hesaplanması için navigasyon mesajı ile gelen efemeris bilgisi içindeki düzeltme terimleri kullanılmalıdır. Düzeltme terimlerinden düzeltme bilgileri şu şekilde hesaplanmalıdır [6; 25]:

$$\delta\phi = C_{us} \sin 2\phi + C_{uc} \cos 2\phi \quad (4.40)$$

$$\delta r = C_{rs} \sin 2\phi + C_{rc} \cos 2\phi \quad (4.41)$$

$$\delta i = C_{is} \sin 2\phi + C_{ic} \cos 2\phi \quad (4.42)$$

Bu düzeltme bilgileri; (4-3), (4-6), (4-10) ve (4-12) denklemlerinde hesaplanan değerlerin düzeltilmesi için şu şekilde kullanılacaktır [6; 25]:

$$n \rightarrow n + \Delta n \quad (4.43)$$

$$\phi \rightarrow \phi + \delta\phi \quad (4.44)$$

$$r \rightarrow r + \delta r \quad (4.45)$$

$$i \rightarrow i + \delta i + IDOT(t - t_{oe}) \quad (4.46)$$

Bu düzeltmeler de kullanılarak uyduların pozisyonları hassas bir şekilde bulunmaktadır.

4.4.3 Sözde Mesafe (Pseudorange) Kestirimi

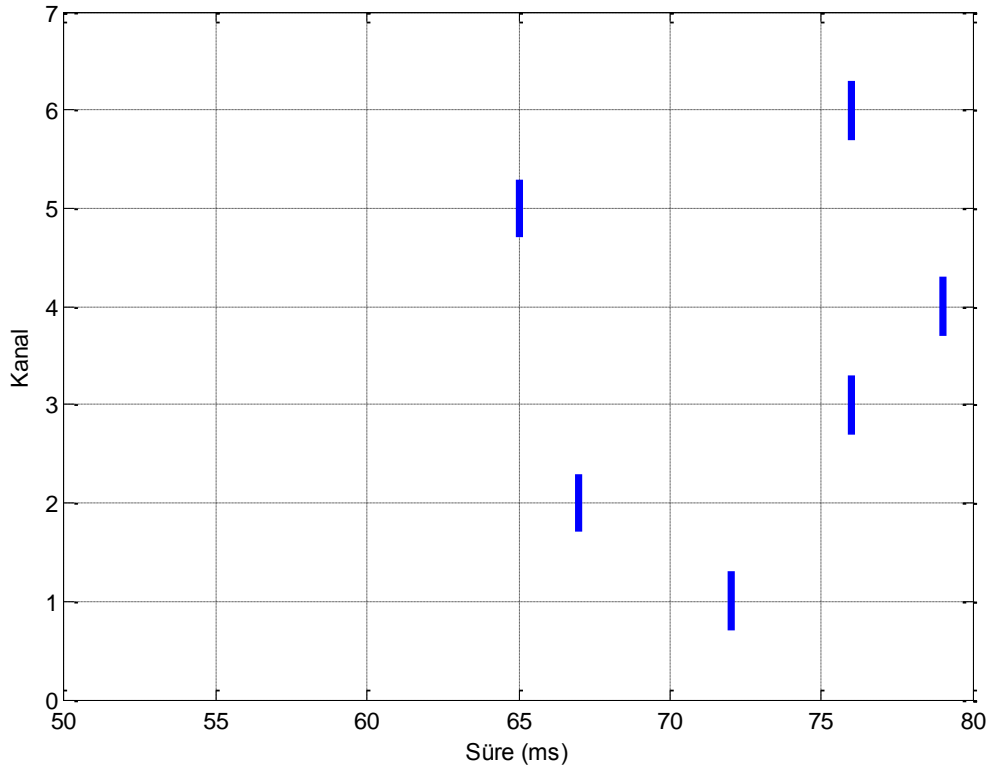
Sözde mesafe kestirimini iki farklı bölümde inceleyebiliriz. Bunların ilki, sözde mesafe için ilk kestirimi yapmak; ikincisi ise ilk kestirim değerinden sonra sözde mesafenin değişimini takip etmektir.

Sözde mesafelerin ilk kestirimini yapılabilmesi için, sinyalin uydudan alıcıya ulaşma süresinin bilinmesi gerekmektedir. Bu süre ışığın boşluktaki hızı ile çarpılarak uydu ile alıcı arasındaki mesafe hesaplanabilir. Alıcıya ulaşan bir sinyalin uydudan çıkış zamanı, navigasyon mesajından hesaplanabilir. Ancak, alıcının saati hiçbir zaman uydu ile tam eş zamanlı olamayacağından sinyalin ne kadar sürede alıcıya ulaştığı tam olarak bilinemez. Bu sebeple önce farklı uydulardan gelen sinyallerin alıcıya ulaştıkları anlar arasındaki zaman farkı bulunur. Bu işlem, navigasyon mesajlarındaki başlıkların bulunmasıyla yapılmaktadır. Bütün uyduların ilk başlıklarının geldiği an bulunur. Böylece sinyallerin alıcıya ulaştıkları zamanlar arasındaki farklar da bulunmuş olur.

Bir GPS uydusundan yeryüzüne bir sinyalin geliş süresinin 65 - 83 milisaniye aralığında olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, en kısa sürede gelen sinyalin geliş zamanı 65 milisaniye olarak alınır ve sonraki uydular navigasyon mesajından bulunan zaman farklarına göre sıralanırlar. Şekil 4-38'de 6 kanaldaki uydu sinyallerinin bulunan ulaşma süreleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, en kısa sürede ulaşan sinyal 5. kanaldaki sinyal olduğundan bu sinyalin ulaşma süresi 65 ms olarak kabul edilmiştir. Sonraki kanallar da navigasyon mesaj başlığından bulunan zaman farklarına göre sıralanmıştır.

Bu aşamada 65 ms olarak kabul edilen en yakın uydunun sinyalinin ulaşma süresinin hatalı olduğu bilindiğinden, bu hata konum hesaplamalarında bir bilinmeyen olarak işleme katılır ve doğru değer bulunur.

Çizelge 4-11'de görülen 6 adet uydunun ilk sözde mesafe kestirim değerleri verilmiştir.



Şekil 4-38 Altı kanaldaki uydu sinyallerinin ulaşma zamanları

Çizelge 4-11: Görülen bütün uyduların ilk sözde mesafe kestirimleri

KANAL	UYDU PRN Numarası	Sinyal Ulaşma Süresi (ms)	Sözde Mesafe (m)
1	25	72	21585056.9
2	29	67	20086094.7
3	31	76	22784226.8
4	12	79	24283189.1
5	30	65	19486509.8
6	18	76	22784226.8

Bu aşamada çözünürlük 1 milisaniye olduğundan sözde mesafeler ancak ışık hızının binde biri (300000 m) çözünürlüğünde hesaplanabilirler. Bunun düzeltilmesi için takip döngüsü çıktılarından, ilgili yerin C/A kodunun başlangıç yeri alınır. Böylece çözünürlük $c/8.184\text{MHz} = 36.6$ metreye kadar indirilmiş olur.

İlk kestirim değerinden sonra sözde mesafenin değişimini takip etmek için 2 bilginin tutulması gerekmektedir. Birincisi sözde mesafe kestirimi yapılacak yerin milisaniye olarak zamanı. İkincisi ise daha hassas zaman bilgisi verecek olan C/A kodun başlangıç yeri.

Pozisyon hesaplamaları ne kadar sürede bir yapılmak isteniyorsa, sözde mesafe o kadar süre aralığında bir hesaplanmalıdır. Saniyede 2 defa pozisyon hesaplaması yapılmak isteniyorsa 500 milisaniyede bir sözde mesafe hesaplanmalıdır. Takip döngüsü 1 milisaniyelik bloklar halinde takip yaptığından, ilke olarak saniyede 1000 defaya kadar pozisyon hesaplaması yapmak mümkündür.

4.4.4 Alıcı Konumunun Hesaplanması

Zaman Hesaplamaları [7]

Sinyalin, k uydusundan i alıcısına ulaşma süresi τ_i^k şeklinde gösterilmektedir. c boşluktaki ışık hızını göstermektedir. Sözde mesafe P_i^k şu şekilde tanımlanabilir:

$$t_i - t^k = \tau_i^k = \frac{P_i^k}{c} \quad (4.47)$$

GPS zamanındaki (GPST) her bir ana t^{GPS} diyelim. k uydusundaki ve i alıcısındaki saatler hiçbir zaman GPST ile eş zamanlı olarak çalışamazlar. Bu sebeple aradaki zaman farkları şu şekilde tanımlanır:

$$t_i = t^{GPS} + dt_i \quad (4.48)$$

$$t^k = (t_i - \tau_i^k)^{GPS} + dt^k \quad (4.49)$$

Son denklemde dt^k efemeriste tanımlandığı gibi; $dt^k = a_0 + a_1(t^k - t_{oe}) + \dots$ şeklinde yazılırsa, denklem (4.49), denklem (4.50) şeklinde olacaktır:

$$(t_i - \tau_i^k)^{GPS} = t^k - (a_0 + a_1(t^k - t_{oe}) + \dots) \quad (4.50)$$

Denklem (4.50) ile hesaplanan zaman, sinyalin uydudan çıktığı anı vermektedir ve uydu konumunun hesaplanmasında kullanılır.

Denklem (4.47)'nin yeniden düzenlenmesiyle, şu hali alacaktır:

$$t^k = t_i - \frac{P_i^k}{c} \quad (4.51)$$

Bu denklemi kullanmanın yöntemlerinden biri; t_i 'yi verilen şekilde kullanmaktır. t_i sinyal zamanının, alıcı saatiyle gösterilen halidir. Sözde mesafe, P_i^k için de bir kestirim yapılabilmektedir. Böylece t^k hesaplanabilir ve uydu düzeltmesi dt^k eklenerek kullanılabilir. Donanım tabanlı GPS alıcılarında hesaplamalar bu şekilde yapılmaktadır.

Yazılım tabanlı alıcılarda ise durum biraz farklıdır. Bütün sözde mesafe gözlemlerinde ortak olan t_{ortak} zamanı, uydulardan sinyal çıkış zamanı olarak tanımlanır. Bu sebeple k uydusunun pozisyon hesaplama zamanı şu şekilde bulunur:

$$t^k = t_{ortak} - dt^k \quad (4.52)$$

Yazılım tabanlı alıcılarda, alıcı zamanı tanımlanmaz; onun yerine her bir uydudan gelen sinyallerin alıcıya ulaşmaları arasındaki zaman farkları kullanılır.

Uydu konumları hesaplanırken, navigasyon mesajındaki zaman bilgisi kullanılır ve o zaman bilgisini içeren alt çerçevenin başlangıç anı için alıcı konumu hesaplanır. Ancak navigasyon mesajındaki zaman bilgisi, sinyalin uydudan çıktığı ana aittir ve alıcıya ulaşmaya kadar uyduların konumları değişmiş olur. Bu sebeple, konum hesaplamalarının yapıldığı ECEF koordinatları bu süre kadar döndürülür. Bu döndürme işlemi şu şekilde yapılır [25]:

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta \quad (4.53)$$

$$y' = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (4.54)$$

$$z' = z \quad (4.55)$$

$\theta = \dot{\Omega}_{ie}(t - t_0)$ şeklinde hesaplanabilir. $\dot{\Omega}_{ie} = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$ değerine sahip dünya dönüş hızıdır.

Konum Hesaplama Denklemi [7; 27]

Sözde mesafelerden, konum hesaplaması yapılırken en çok kullanılan yöntem en küçük kareler (least-squares) yöntemidir. En küçük kareler yöntemi, gözlem sayısının bilinmeyen sayısından çok olduğu durumlarda kullanılır. Bu bölümde, 4 ya da daha fazla uydu bilgisi kullanılarak konum hesaplamasının en küçük kareler yöntemi ile nasıl yapıldığı anlatılacaktır.

k uydusu ile i alıcısı arasındaki geometrik mesafe, ρ_i^k ; alıcı saat kayıklığı, dt_i ; uydu saat kayıklığı, dt^k ; troposfer gecikmesi, T_i^k ; iyonosfer gecikmesi, I_i^k ve sözde mesafelerin gözlem hataları da, e_i^k ile gösterilirse; sözde mesafeler için temel gözlem denklemi şu şekilde hesaplanır:

$$P_i^k = \rho_i^k + c(dt_i - dt^k) + T_i^k + I_i^k + e_i^k \quad (4.56)$$

k uydusu ile i alıcısı arasındaki geometrik mesafe, ρ_i^k ; şu şekilde hesaplanabilir:

$$\rho_i^k = \sqrt{(X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2} \quad (4.57)$$

Denklem (4.57)'yi (4.56)'nın içine koyarsak:

$$P_i^k = \sqrt{(X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2} + c(dt_i - dt^k) + T_i^k + I_i^k + e_i^k \quad (4.58)$$

elde edilir.

Uydu saat kayıklıkları dt^k ve uydu konumları (X^k, Y^k, Z^k) daha önce de anlatıldığı gibi navigasyon mesajı ile gelen efemeris bilgisi ile hesaplanmaktadır.

Troposfer gecikmesi T_i^k , bazı modeller ve ortam koşulları (sıcaklık, nem yükseklik, basınç...) kullanılarak hesaplanabilir. İyonosfer gecikmesi I_i^k , navigasyon mesajındaki bazı bilgiler ve çeşitli modeller kullanılarak hesaplanabilir. Böylece denklemde 4 bilinmeyen kalmaktadır: X_i , Y_i , Z_i ve dt_i . Hata terimi e_i^k , en küçük kareler yöntemi kullanılarak en küçük hale getirilmeye çalışılmaktadır. 4 bilinmeyen olduğundan alıcı konumunun hesaplanabilmesi için en az 4 uydu ile sözde mesafenin bilinmesi gerekmektedir.

Denklem (4.58), hesaplanmak istenen uydu konumlarına (X^k, Y^k, Z^k) göre doğrusal değildir. En küçük kareler yönteminin kullanılabilmesi için öncelikle denklemin doğrusal hale getirilmesi gerekmektedir.

Denklem (4.58)'deki doğrusal olmayan kısım, denklem (4.59)'da verilmiştir:

$$f(X_i, Y_i, Z_i) = \sqrt{(X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2} \quad (4.59)$$

Doğrusallaştırmaya, uydu konumu için bir başlangıç noktası bulunarak $(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})$ başlanır. Bu nokta, çoğunlukla dünyanın merkezi $(0,0,0)$ olarak seçilir.

Konumdaki değişim miktarları ΔX , ΔY ve ΔZ , şu şekilde tanımlanır:

$$X_{i,1} = X_{i,0} + \Delta X_i \quad (4.60)$$

$$Y_{i,1} = Y_{i,0} + \Delta Y_i \quad (4.61)$$

$$Z_{i,1} = Z_{i,0} + \Delta Z_i \quad (4.62)$$

Bu değişim miktarları ile alıcı konumları güncellenir. Böylece $f(X_{i,0} + \Delta X_i, Y_{i,0} + \Delta Y_i, Z_{i,0} + \Delta Z_i)$ fonksiyonunun Taylor açılımı:

$$f(X_{i,1}, Y_{i,1}, Z_{i,1}) = f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0}) + \frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})}{\partial X_{i,0}} \Delta X_i$$

$$+ \frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})}{\partial Y_{i,0}} \Delta Y_i + \frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})}{\partial Z_{i,0}} \Delta Z_i \quad (4.63)$$

olarak elde edilir.

Denklem (4.63) sadece birinci dereceden terimler içermektedir. Bu sayede fonksiyon yaklaşık bir konum hesaplamak için kullanılabilir. Fonksiyondaki parçalı türevler, şöyle bulunabilir:

$$\frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})}{\partial X_{i,0}} = - \frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_i^k} \quad (4.64)$$

$$\frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})}{\partial Y_{i,0}} = - \frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_i^k} \quad (4.65)$$

$$\frac{\partial f(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})}{\partial Z_{i,0}} = - \frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_i^k} \quad (4.66)$$

Böylece, birinci dereceden ve doğrusal konum hesaplama denklemi şu şekilde bulunur:

$$P_i^k = \rho_{i,0}^k - \frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} \Delta X_i - \frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} \Delta Y_i - \frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} \Delta Z_i + c(dt_i - dt^k) + T_i^k + I_i^k + e_i^k \quad (4.67)$$

Alıcı ile uydular arası sözde mesafenin ilk değeri $\rho_{i,0}^k$, şu şekilde hesaplanabilir:

$$\rho_{i,0}^k = \sqrt{(X^k - X_{i,0})^2 + (Y^k - Y_{i,0})^2 + (Z^k - Z_{i,0})^2} \quad (4.68)$$

Alıcı için başlangıç konumu $(X_{i,0}, Y_{i,0}, Z_{i,0})$ dünyanın merkezi $(0,0,0)$ olarak alınır, $\rho_{i,0}^k$ sadece uydu konumlarından hesaplanabilir.

En Küçük Kareler (Least-Square) Yöntemi [7; 27]

En küçük kareler yöntemi, çözümlenmesi gereken $Ax = b$ şeklinde bir sistem olarak verilebilir. A , m tane satır ve n tane kolondan oluşur ve $m > n$ 'dir; yani gözlem sonucu (b_1, \dots, b_m) , bilinmeyen (x_1, \dots, x_n) sayısından fazladır. Bilinmeyenler için en iyi seçim (\hat{x} şeklinde gösterilir), hata vektörünü ($\hat{e} = b - A\hat{x}$) en küçük yapan değerlerdir. Bu hatanın boyutu, yani m tane hatanın karelerinin toplamı; $\|e\|^2 = (b - Ax)^T (b - Ax)$ şeklinde hesaplanır. Bu karesel ifadeyi en küçük hale getirmeye çalışmak, şu denklemleri verecektir:

$$A^T A \hat{x} = A^T b \quad \text{ya da} \quad \hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4.69)$$

Hata vektörü de:

$$\hat{e} = b - A \hat{x} \quad (4.70)$$

\hat{x} için, ortak değişinti (covariance) matrisi:

$$\Sigma_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T A)^{-1} \quad \text{ve} \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{e}^T \hat{e}}{m-n} \quad (4.71)$$

olarak tanımlanır.

Doğrusallaştırılmış konum hesaplama denklemi, vektörel olarak tekrar yazılacak olursa:

$$P_i^k = \rho_{i,0}^k + \begin{bmatrix} -\frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & -\frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & -\frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ cdt_i \end{bmatrix} - cdt^k + T_i^k + I_i^k + e_i^k \quad (4.72)$$

şeklinde olacaktır.

Denklemi, en küçük kareler yöntemine uygun olarak, $Ax = b$ şeklinde, tekrar düzenlersek şu hale gelecektir:

$$\begin{bmatrix} -\frac{X^k - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & -\frac{Y^k - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & -\frac{Z^k - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta Y_i \\ \Delta Z_i \\ cdt_i \end{bmatrix} = P_i^k - \rho_{i,0}^k + cdt^k - T_i^k - I_i^k - e_i^k \quad (4.73)$$

$b_i^k = P_i^k - \rho_{i,0}^k + cdt^k - T_i^k - I_i^k - e_i^k$ şeklinde tanımlayıp; denklemi bütün uyduları kapsayacak şekilde yazarsak, çözüm denklemi:

$$Ax = \begin{bmatrix} -\frac{X^1 - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^1} & -\frac{Y^1 - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^1} & -\frac{Z^1 - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^1} & 1 \\ -\frac{X^2 - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^2} & -\frac{Y^2 - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^2} & -\frac{Z^2 - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^2} & 1 \\ -\frac{X^3 - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^3} & -\frac{Y^3 - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^3} & -\frac{Z^3 - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^3} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X^m - X_{i,0}}{\rho_{i,0}^m} & -\frac{Y^m - Y_{i,0}}{\rho_{i,0}^m} & -\frac{Z^m - Z_{i,0}}{\rho_{i,0}^m} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{i,1} \\ \Delta Y_{i,1} \\ \Delta Z_{i,1} \\ cdt_{i,1} \end{bmatrix} = b - e \quad (4.74)$$

$m \geq 4$ ise, $\Delta X_{i,1}$, $\Delta Y_{i,1}$ ve $\Delta Z_{i,1}$ için bir çözüm vardır. Bulunan bu sonuç, alıcı konumuna eklenerek bir sonraki alıcı konumu bulunmuş olur:

$$X_{i,1} = X_{i,0} + \Delta X_{i,1} \quad (4.75)$$

$$Y_{i,1} = Y_{i,0} + \Delta Y_{i,1} \quad (4.76)$$

$$Z_{i,1} = Z_{i,0} + \Delta Z_{i,1} \quad (4.77)$$

Bir sonraki özyinelemede, $X_{i,0}$ yerine $X_{i,1}$ konur (bütün parametreler için yapılır) ve (4.73) numaralı denklemden itibaren hesaplamalar tekrar yapılır. Bu hesaplama, peş peşe gelen iki özyinelemede hesaplanan alıcı konumları arasındaki farklar metre düzeyine inene kadar tekrarlanır. Çoğunlukla 2 ya da 3 özyineleme yeterli olmaktadır.

4.4.5 Hesaplanan Konumun Doğruluğu

Denklem (4.71)'de formülü verilen ortak değişinti matrisi, $\Sigma_{\hat{x}}$ görülen uyduların geometrisinin uygunluğuyla ilgili bilgi içermektedir. $\Sigma_{\hat{x}}$ daha küçük değerler aldığı anda hesaplanan konumun hatası da daha az olmaktadır.

Ortak değişinti matrisi $\Sigma_{\hat{x}}$, 3 boyutlu konum ve zaman kayıklığı (X, Y, Z, c dt) hesaplandığı durumlarda 4'e 4'lük bir matris olmaktadır.

En küçük kareler yöntemi ile konum hesaplama sonucunda oluşan ortak değişinti matrisi şu bilgileri içerir [7]:

$$\Sigma_{ECEF} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} & \sigma_{X,c dt} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} & \sigma_{Y,c dt} \\ \sigma_{ZY} & \sigma_{ZY} & \sigma_Z^2 & \sigma_{Z,c dt} \\ \sigma_{c dt,X} & \sigma_{c dt,Y} & \sigma_{c dt,Z} & \sigma_{c dt}^2 \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

ECEF koordinatında hesaplanan ortak değişinti matrisinin, konumla ilgili olan 3'e 3'lük kısmına S dersek. S matrisi bir dönüşüm matrisi F ile doğu, kuzey, yukarı (easting, northing, Up) koordinatına (UTM koordinat düzlemi) dönüştürülebilir [7]:

$$\Sigma_{enu} = \begin{bmatrix} \sigma_e^2 & \sigma_{en} & \sigma_{eu} \\ \sigma_{ne} & \sigma_n^2 & \sigma_{nu} \\ \sigma_{ue} & \sigma_{un} & \sigma_u^2 \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Uydu geometrisi sebebiyle hesaplanan konumun doğruluğunun seyrelmesi DOP şeklinde gösterilmektedir (bölüm 2.6.1'de anlatılmıştır). DOP farklı çeşitlerde tanımlanabilir. Bunlar:

Geometrik:
$$GDOP = \sqrt{\frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_{c dt}^2}{\sigma_0^2}} = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 + \sigma_{c dt}^2}{\sigma_0^2}}$$

Yatay (Horizontal):
$$HDOP = \sqrt{\frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{\sigma_0^2}}$$

Dikey (Vertical):
$$VDOP = \sigma_u / \sigma_0$$

Konum (Position):
$$PDOP = \sqrt{\frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2}{\sigma_0^2}} = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}{\sigma_0^2}}$$

Zaman (Time):
$$TDOP = \sigma_{c dt} / \sigma_0$$

olarak sıralanabilir ve aralarındaki bağıntı

$$GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2$$

şeklindedir.

Hesaplanan konum hatası, hesaplanan DOP değeri ile sözde mesafe hesaplamalarında yapılan hatanın çarpımına eşittir.

Yapılan çalışmalar sonucunda, PDOP değerinin 5'ten küçük ve en az 5 uydu kullanılarak yapılan konum hesaplamalarının iyi sonuç verdiği gözlenmiştir [7].

4.4.6 Konum Hesaplama Sonuçları

Konumu hassas olarak bilinen bir noktada, iki farklı zamanda 37 saniye uzunluğunda GPS sinyalleri toplanmış ve bu tez çalışması boyunca bu iki sinyal kullanılarak alıcı bileşenleri test edilmiştir. Bu testlerin sonucunda ortaya çıkan sonuçlar ve bazı grafikler daha önceki bölümlerde verilmiştir. Bu bölümde de bu iki GPS sinyali ile hesaplanan alıcı konumları verilecek ve hesaplanan konumların hatası incelenecektir.

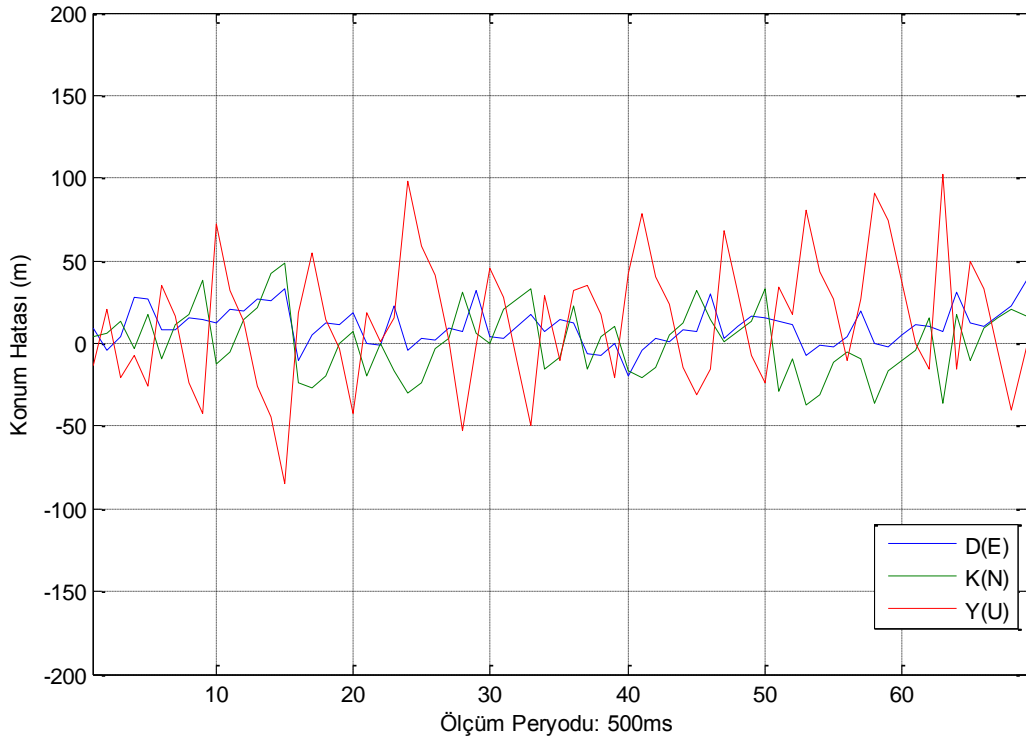
Alıcı, konum hesaplamalarını saniyede iki defa (500 milisaniyede bir) yapacak şekilde ayarlanmıştır. Saniyede iki kere konum hesaplandığı düşünüldüğünde 37 saniyelik GPS sinyalinden en fazla 74 konum bilgisi hesaplanabilir. Ancak konum hesaplamaları navigasyon mesajındaki ilk alt çerçevenin başlığından itibaren başladığı için hesaplanabilecek konum sayısı çoğunlukla daha az olmaktadır.

Hesaplanan konumların ortalama değerleri, ortalama hataları ve standart sapmaları Çizelge 4-12'de verilmiştir. Sonuçlar UTM sistemine göre metre cinsinden verilmiştir. Çizelgede ortalama ve standart sapma değerleri verilen

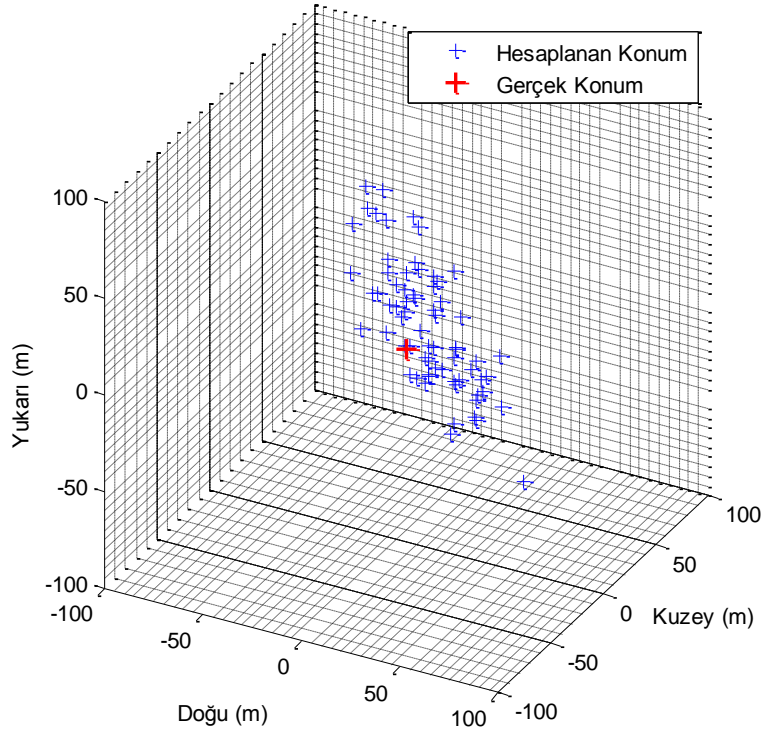
hataların 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak çizimleri Şekil 4-39, Şekil 4-40, Şekil 4-41 ve Şekil 4-42'de verilmiştir.

Çizelge 4-12: Konum Hesaplama Sonuçları

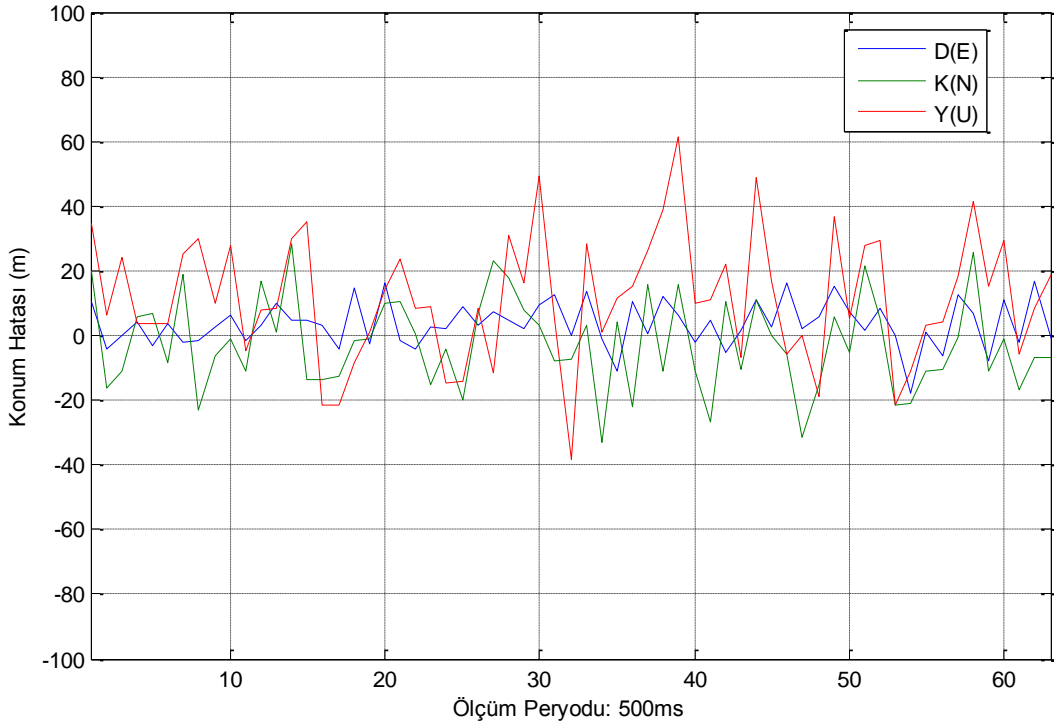
(Metre)	Gerçek Konum	TEST-1			TEST-2		
		Ortalama Konum	Ort. Hata	Standart Sapma	Ortalama Konum	Ort. Hata	Standart Sapma
Doğu	501922	501928	6	11.5	501921	1	7.0
Kuzey	4437279	4437281	2	20.2	4437278	1	14.3
Yukarı	1033	1047	14	38.8	1045	12	19.5



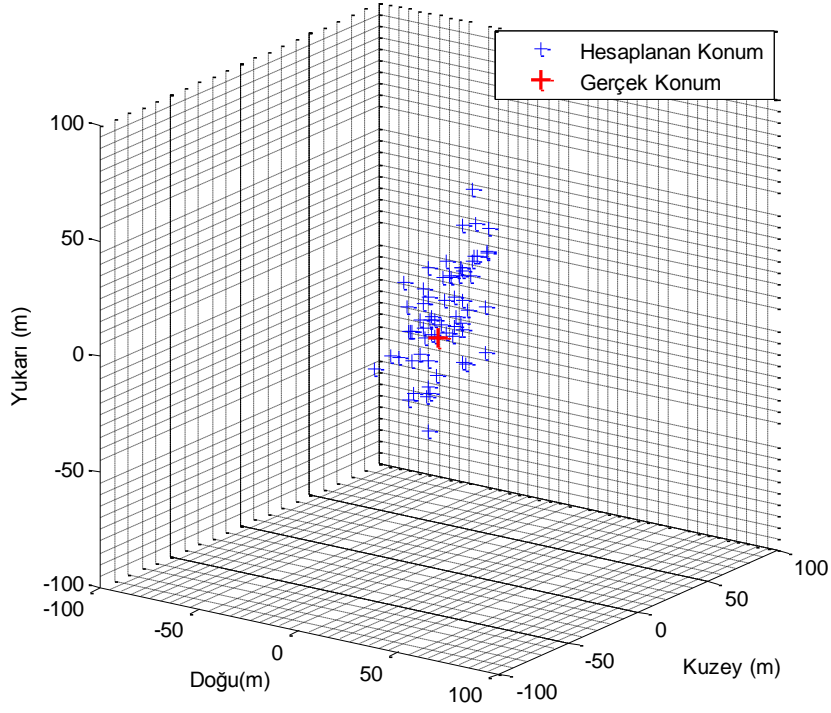
Şekil 4-39 Test-1'e ait hata grafiği



Şekil 4-40 Test-1'e ait 3 boyutlu hata grafiği



Şekil 4-41 Test 2'ye ait hata grafiği



Şekil 4-42 Test-2'ye ait 3 boyutlu hata grafiği

Çizelge 4-12'de verilen hatalar, sözde mesafe hesaplamalarında yapılan hatalar ile uydu geometrisinden kaynaklı hataların (DOP) çarpımına bağlıdır.

İki test için ayrı ayrı hesaplanan, uydu geometrisinden kaynaklı hata değerleri Çizelge 4-13'te verilmiştir.

Çizelge 4-13: Konum hesaplamaları sonucu bulunan DOP değerleri.

	TEST-1	TEST-2
GDOP	5.01	2.78
PDOP	4.12	2.40
HDOP	3.88	1.61
VDOP	1.39	1.79
TDOP	2.83	1.40

Konum hesaplamaları yapılırken, troposfer düzeltmeleri için genel bir model kullanılmıştır. Ancak iyonosfer düzeltmeleri için ihtiyaç duyulan katsayıların navigasyon mesajının tamamı (12.5 dk) olmadan elde edilememesi sebebiyle iyonosfer düzeltmesi yapılamamıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere sinyal örnekleme frekansının 8.184 MHz olması sebebiyle alıcı çözünürlük hatası c (ışık hızı)/ 8.184MHz = 36.6 metredir.

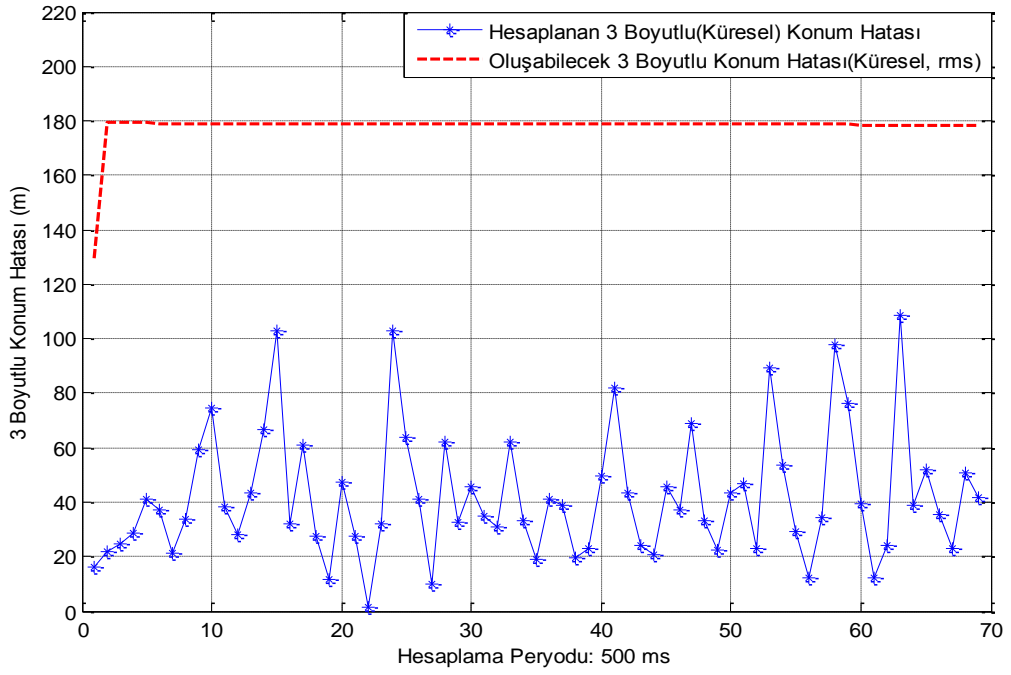
Bölüm 2.6.2’de, Çizelge 2-1’de GPS hata kaynaklarının sözde mesafe üzerindeki hata miktarları verilmiştir. Bu tablodaki alıcı gürültüsü ve çözünürlüğü hatası, bizim alıcımız için geçerli olan 36.6 metre ile değiştirilip toplam hata tekrar hesaplandığında: 43.2 metre çıkmaktadır. İyonosfer düzeltmesi yapılmamış olmasına rağmen, bu hesaplamada düzeltme sonucu kalan en büyük hata olan 19.6 metre alınmıştır.

Sözde mesafe hesaplamasında oluşabilecek 43.2 metrelik hatanın DOP değerleriyle çarpımı, konumda oluşabilecek hata miktarlarını (yaklaşık olarak) verecektir [7]. Çizelge 4-14’te hesaplama sonucunda oluşabilecek; 3 boyutlu, 2 boyutu ve tek boyutlu konum hataları verilmiştir.

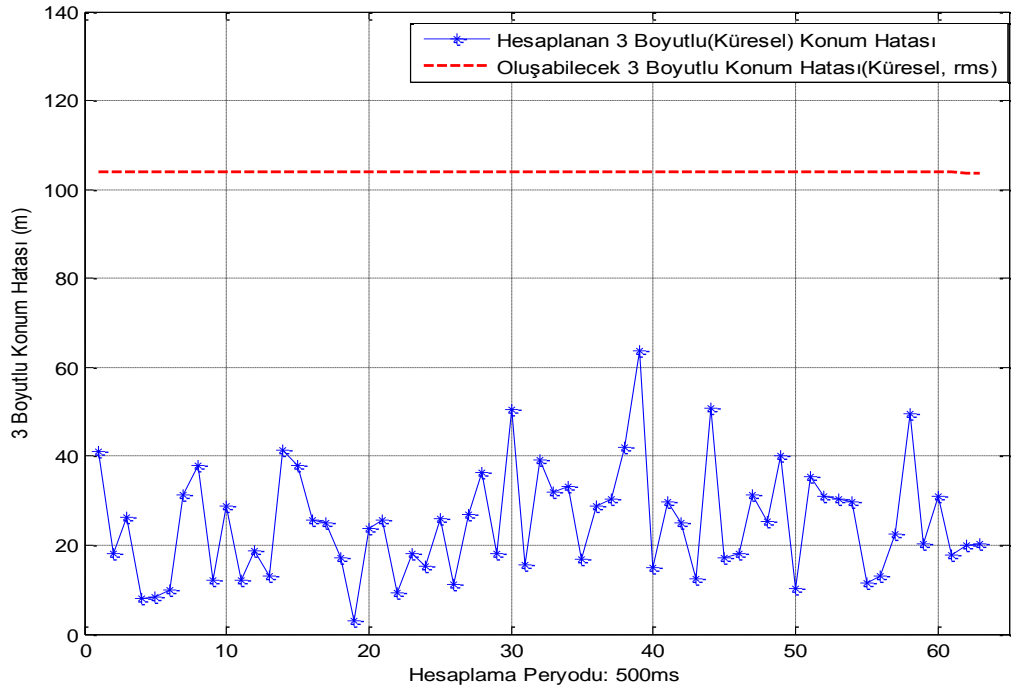
Çizelge 4-14: Hesaplama sonucunda oluşabilecek hata konum hataları

(metre, rms)	TEST-1	TEST-2
Konum Hatası(3 boyutlu, küresel) PDOP x 43.2 m	177.98	103.85
Yatay Konum Hatası(2 boyutlu, dairesel) HDOP x 43.2 m	167.62	69.52
Dikey Konum Hatası(1 boyutlu) VDOP x 43.2 m	60.05	77.15

Çizelge 4-12’deki hesaplama sonucunda oluşan konum hataları ve standart sapma değerleri Çizelge 4-14’te verilen oluşabilecek hata miktarları ile karşılaştırıldığında, hesaplama sonucu oluşan hataların beklenen hata bandı içinde kaldığı görülmektedir. Şekil 4-43 ve Şekil 4-44’te testler sonucunda hesaplanan konumların küresel hataları ve oluşabilecek hata bantları gösterilmiştir.



Şekil 4-43 Test-1 sonucu hesaplanan konumların küresel hataları ve oluşabilecek küresel konum hataları



Şekil 4-44 Test-2 sonucu hesaplanan konumların küresel hataları ve oluşabilecek küresel konum hataları

5 SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında; GPS sisteminin genel çalışma ilkeleri çalışılmış, GPS sinyal yapısı incelenmiş, GPS alıcı yapıları ve bileşenleri araştırılmıştır. Yazılım tabanlı GPS alıcılarında kullanılan çeşitli tekniklerin performansları incelenmiş ve bütün bir yazılım tabanlı GPS alıcısının konum bulma performansı gözlenmiştir.

Yazılım tabanlı GPS alıcısının bileşenleri MATLAB kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan modeller kaydedilen 37 saniyelik gerçek GPS sinyalleriyle test edilmiş ve performansları incelenmiştir. GPS alıcısının bütün bileşenleri uygulanarak alıcının konum hesaplaması yapılmış ve alıcı konumunun küçük bir hatayla hesaplanabildiği görülmüştür.

GPS alıcılarının ilk bileşeni, sinyal toplama ve hazırlama kısmıdır. Bu kısım, GPS sinyalini yazılım tabanlı GPS alıcısında işlenebilecek hale getirir. Yazılım tabanlı bir GPS alıcısının performansı, işlediği sinyalin sinyal-gürültü oranına oldukça bağlıdır. Bu sebeple, sinyal toplama ve hazırlama bileşeninin, sinyal-gürültü oranı yüksek seçilmelidir.

Yazılım tabanlı GPS alıcılarının ilk bileşeni, sinyal toplama ve hazırlama kısmından sonra gelen sinyal yakalama kısmıdır. Sonraki işlemler sinyal yakalama kısmının sonuçlarına göre devam edeceğinden, güçlü bir sinyal yakalama yöntemi, GPS alıcısının performansını oldukça arttıracaktır. Bu aşamada yakalanamayan bir sinyalin daha sonra tekrar hesaplamalara katılması mümkün olmayacaktır. Yanlış yakalanan sinyaller ise, yazılım tabanlı GPS alıcısının performansını düşürecektir.

Sinyal yakalama için yazılım tabanlı GPS alıcılarında tercih edilen iki yöntem modellenmiş ve test edilmiştir. Bunlar, FFT yöntemi ile geciktirme ve çarpma yöntemleridir. Yapılan testlerin sonucunda FFT yönteminin geciktirme ve çarpma yöntemine göre daha güçlü olduğu (daha fazla uydu sinyalini doğru bir şekilde yakalayabildiği) ancak bunun karşılığında da geciktirme ve çarpma yönteminden daha fazla zaman harcadığı görülmüştür. Sonuçta, iyi performans istenen uygulamalarda FFT yönteminin, zamanın performanstan daha önemli olduğu

uygulamalarda ise geciktirme ve çarpma yönteminin kullanılmasının daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

Yazılım tabanlı GPS alıcılarının ikinci bileşeni sinyal takibidir. Sinyal takibi, sinyalin taşıyıcı frekansı ve kod kayıklığını takip eden 2 döngünün uygun bir şekilde birleştirilmesiyle yapılmıştır. Taşıyıcı frekans takibi için kullanılacak döngünün, navigasyon bit değişiminden kaynaklı 180 derecelik faz kaymalarında takibi kaybetmeyecek nitelikte olmasının önemli bir kistas olduğu anlaşılmıştır. Bu sebeple bunu gerçekleştirebilen Costas döngüsü seçilmiştir.

Taşıyıcı frekans ve kod kayıklığı takibi için kullanılan her iki döngünün de performanslarını belirleyen bileşenler, seçilen ayırtaçlar ve filtre parametreleridir. Bu değerler; alıcının kullanılacağı uygulamaya, kullanılan GPS sinyalinin özelliklerine ve sinyal yakalama biriminin performansına uygun olarak seçilmelidir. Filtre parametrelerinin seçiminde hız-gürültü ödünleşimi söz konusudur. Yüksek hızlı uygulamalarda, filtre parametreleri ilgili hıza uygun seçilmelidir. Bunun karşılığında, yüksek frekanslı gürültü bileşenlerinin de filtreden geçeceği dikkate alınmalıdır.

Yazılım tabanlı GPS alıcılarının son bileşeni konum hesaplama kısmıdır. Konum hesaplama kısmında, sinyal yakalama döngülerinin sonucunda elde edilen navigasyon bilgi mesajı ile kod ve frekans kayıklık bilgileri kullanılarak alıcının konumu hesaplanmaktadır.

Yazılım tabanlı GPS alıcılarında donanımsal alıcılardan farklı olarak fiziksel bir saat kullanılmaz, bunun yerine bütün uydular için ortak bir zaman olduğu varsayılır ve sözde mesafeler için bu şekilde bir kestirim yapılır. Tezde uygulanan bu yaklaşım sonucunda elde edilen konum bilgilerinin gerçek konuma oldukça yakın olduğu ve hataların da beklenen bandın içinde kaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] *Basic Guide to Advanced Navigation*, NATO, RTO Publication, SET-054/RTG-30, **2004**
- [2] Parkinson, B. W., James J., Spilker Jr., *Global Positioning System: Theory and Applications*, Washington, American Institute of Aeronautics and Astronautics, **1996**
- [3] Kahveci, Doç. Dr. Muzaffer, Yıldız, Prof. Dr. Ferruh, *Global Konum Belirleme Sistemi, Teori – Uygulama*, Nobel Yayın Evi, **2005**
- [4] Schmidt, George T., *INS/GPS Technology Trends*, NATO, RTO Lecture Series Supporting Papers, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, Paper 1, **2008**
- [5] Grewal, Mohinder S., Weill, Lawrence R., Andrews, Angus P., *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*, Wiley, **2007**
- [6] Tsui, Y., Bao, J., *Fundamentals of Global Positioning System Receivers, A Software Approach*, USA, Wiley-Interscience **2005**
- [7] Borre, K., Akos, D.M., Bertelsen, N., Rinder, p., Jensen, S.H., *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver, A single Frequency Approach*, Boston, Birkhauser, **2007**
- [8] Kaplan, Elliott D., *Understanding GPS, Principles and Applications*, Boston – London, Artech House, **1996**
- [9] en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System (Temmuz, **2013**)
- [10] Misra, P., Enge, P., *Global Positioning System, Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, **2001**
- [11] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., *GNSS – Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo and More*, New York, Springer Wien, **2008**
- [12] El-Rabbany, A., *Introduction to GPS The Global Positioning System*, Boston – London, Artech House, **2002**
- [13] XU, Guochang, *GPS - Theory, Algorithms and Applications*, Springer, **2007**
- [14] *Navstar GPS User Equipment Introduction*, Public Release Version, **1996**
- [15] Pany, T., *Navigation Signal Processing for GNSS Software Receivers*, Boston – London, Artech House, **2010**
- [16] *Global Positioning System, Standard Positioning Service Signal Specification*, GPS NAVSTAR, 2nd Edition, **1995**
- [17] Samper, J. M., Perez, R. B., Lagunilla, J. M., *GPS & Galileo: Dual RF Front-end Receiver and Design, Fabrication and Test*, McGraw-Hill, **2009**
- [18] Vaughan, R., Scott, N. and White, D., *The Theory of Bandpass Sampling*, *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 39, No. 9, 1973-1984, **1991**.
- [19] Hill, G., *The Benefits of Undersampling*, *Electronic Design*, 69-79 **1994**

- [20] HU, H., Fang, L., *Signal Search and Acquisition Algorithms for Software GPS Receiver*, 13-16, ISIP **2009**
- [21] JianFeng, W., YounHui, H., *The Study on GPS Signal Acquisition Algorithm in Time Domain*, IEEE, **2008**
- [22] Bao, J., Tsui, Y., Stockmaster, M., Akos, D. M., *Block Adjustment of Synchronizing Signal (BASS) for Global Positioning System (GPS) Receiver Signal Processing*, Avionics Engineering Center, Ohio University, ION GPS, 637-643, **1997**
- [23] *SE4120L GNSS Receiver IC Datasheet Rev3p5*, **2009**
- [24] Nunes, F. D., Leitao, J. M. N., *A New Fast Code/Frequency Acquisition Algorithm for GPS C/A Signals*, Instituto de Telecomunicacoes – IST, Paris, IEEE, 766-770, **2003**
- [25] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, IS-GPS-200, Rev. D, **2004**
- [26] Caciotta, M., Leccese, F., Pisa, S., PiuZZi, E., *A Voltage Controlled Oscillator for Obtaining a Frequency Reference Constantly Locked to L1 GPS Carrier for Power Quality Assessment Applications*, 16. IMEKO TC4 Symposium, **2008**
- [27] Kaplan, E. D., Hegarty, C. J., *Understanding GPS Principles and Applications*, Second Edition, Boston – London, Artech House, **2006**
- [28] Ziemer, R. E., Peterson, R. L., *Digital Communications and Spread Spectrum Systems*, New York, MacMillan, **1985**
- [29] Best, R. E., *Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications*, McGraw-Hill, 5th. Edition, **2003**
- [30] Chung, B., Cien, C., Samuelli, H. Jain, R., *Performance Analysis of an All-Digital BPSK Direct-Sequence Spread-Spectrum IF Receiver Architecture*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1096-1107, **1993**
- [31] Ma, C., Lachapelle, G., Cannon, M. E., *Implementation of a Software GPS Receiver*, 956-970, ION GNSS **2004**

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Tahsin ZUBAROĞLU
Doğum Yeri : HATAY
Medeni Hali : Bekar
E-posta : tzubaroglu@yahoo.com.tr
Adresi : Ümitköy / ANKARA

Eğitim

Lise : 1998 – 2002 Hatay Osman Ötken Anadolu Lisesi
Lisans : 2003 – 2008 Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans : 2010 – 2013 Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi

- İngilizce : çok iyi
- Arapça : temel

İş Deneyimi

2008 - : Navigasyon Sistemleri Mühendisi, ASELSAN

Deneyim Alanları

- Radyo Navigasyon Sistemleri
- Ataletsel Navigasyon Sistemleri
- Ataletsel Sensörler

- MEMS Sensörler

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-