

GNSS TABANLI ZAMANLAMA VE SENKRONİZASYON

GNSS BASED TIMING AND SYNCHRONIZATION

FEVZİ BADEMCİ

Dr. Öğr. Üyesi YAKUP SABRİ ÖZKAZANÇ
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2022

ÖZET

GNSS TABANLI ZAMANLAMA VE SENKRONİZASYON

Fevzi BADEMCİ

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup Sabri ÖZKAZANÇ

23.06.2022, 83 sayfa

Zaman, bir süreci ifade eden kavram ve kullanılan bir ölçüt olarak ele alınmaktadır. Zamanın hassas şekilde elde edilmesi bazında atomik saat birimlerinin bu alandaki en hassas birimler olduğu ve uydu sistemlerinde kullanıldığı bilinmektedir. Bu bilgi ışığında uydu atomik saatleri yardımı ile dünya üzerinde daha az maliyetli ve daha hassas zaman yönetimi ve kullanımı durumu doğmuştur.

Global Positioning System (GPS) – Küresel Konumlama Sistemi tabanlı zamanlama ve senkronizasyon sistemleri sürekli gelişen yaygın ve doğru zaman işleyişini temel alan sistemlerdir. GPS tabanlı sistemlerde zaman işlevinin sürekli olarak sistemlere sağlanması için bir atomik osilatör, yani GPS'den gelen sinyalleri temel alarak oluşturulan GPS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon sistemleri ile birleşerek çalışırlar.

Çalışma kapsamında, bir GPS alıcısının mevcut durumunda güvenilir zamanlama çözümleri sağlayamadığı bu ortamlarda ve özellikle havacılık olmak üzere birçok sektörde ihtiyaç olan referans zaman kaynağı olarak kabiliyetini göstermeyi ve sonuçlarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

PLL entegre devresi ile yapılan tasarımda GPS sinyali var iken ve yok ikenki şartlar altında çeşitli ölçümler alınmıştır. Bu sayede GPS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon sistemlerinde istenen ve maliyet etkin yapısı da elde edilmiştir.

Çalışma sonunda nanosaniyeler mertebesinde sapma/zamansal kaymalar gözlemlenmiş kabul edilebilir doğruluk ve hassaslıkta sonuçlar alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, GPS, Zamanlama, Senkronizasyon, PLL

ABSTRACT

GNSS BASED TIMING AND SYNCHRONIZATION

Fevzi BADEMCİ

Master of Science, Department of Electrical And Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yakup Sabri ÖZKAZANÇ

23.06.2022, 83 pages

Time is considered as a concept expressing a process and a criterion used. It is known that atomic clock units are the most sensitive units in this field and are used in satellite systems on the basis of obtaining time precisely. In the light of this information, with the help of satellite atomic clocks, less costly and more precise time management and usage has emerged in the world.

Global Positioning System (GPS) – Global Positioning System-based timing and synchronization systems are systems based on pervasive and accurate timekeeping, which are constantly evolving. In GPS-based systems, they work in conjunction with an atomic oscillator, that is, GPS-based timing and synchronization systems created based on signals from GPS, to provide the time function to the systems continuously.

Within the scope of the study, it is aimed to demonstrate the capability of a GPS receiver as a reference time source needed in these environments where it cannot provide reliable timing solutions in its current state and in many sectors, especially aviation, and evaluate its results.

In the design made with the PLL integrated circuit, various measurements were taken with and without the GPS signal. In this way, the desired and cost-effective structure of GPS-based timing and synchronization systems has been obtained. At

the end of the study, deviations / temporal shifts in the order of nanoseconds were observed and results with acceptable accuracy and precision were obtained.

Keywords : GNSS, GPS, Timing, Synchronization, PLL

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans süresi boyunca danışmanım olarak akademik çalışmalarına destek veren, yol gösteren, bu yolda bana rehberlik eden çok değerli ve saygıdeğer hocam Yakup Sabri ÖZKAZANÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman koşulsuz desteğini hissettiğim başta babam Lütfi BADEMCİ, annem Satı BADEMCİ olmak üzere kardeşlerim Ferhat, Büşra, Zeliha, Furkan ve eşim Elif BAŐTUĞ BADEMCİ'ye çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisans sürecinin en başından beri bilhassa ders ve yeterlilik döneminde aralarına kabul ederek bana yardımcı olan; bilgilerini, tecrübelerini paylaşan TUSAŐ A.Ő şirketindeki F-16 ÖZGÜR Projesi arkadaşlarım Gürkan Yılmaz PALA ve Fatma Ceren CENGİZ'e teşekkür ederim.

Bu süreç boyunca profesyonel olarak çalıştığım diğer şirketlere ve şirketlerdeki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER.....	viii
TABLolar.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KÜRESEL SEYRÜSEFER UYDU SİSTEMLERİ.....	4
2.1. GPS Temelleri.....	4
2.2. GPS Sistem Bileşenleri.....	7
2.2.1. GPS Uzay Bileşeni.....	8
2.2.2. GPS Kontrol Bileşeni.....	9
2.2.3. GPS Kullanıcı Bileşeni.....	10
2.3. GPS Navigasyon Mesajı.....	11
2.3.1. C/A Kod Özellikleri.....	15
3. GNSS/GPS VE ZAMANLAMA.....	18
3.1. Zaman Kavramı.....	18
3.2. GPS’de Kullanılan Zaman Sistemleri.....	18
3.2.1. Dinamik Zaman Sistemi.....	19
3.2.2. Atomik Zaman.....	19
3.2.3. Greenwich Ortalama Saati (GMT).....	20
3.2.4. Koordineli Evrensel Zaman (UTC).....	21
3.2.5. GPS Saati.....	21
3.2.6. GNSS/GPS Sistemlerinde Zaman Kayıklıkları.....	23
3.2.7. Hata Düzeltme Çalışmaları ve Senkronizasyon.....	25

3.3. Osilatör Karakterizasyonu	28
3.4. Osilatör Çeşitleri	31
4. GPS KONTROLLÜ SAAT	34
4.1. Fırın Kontrollü Kristal Osilatör (OCXO).....	36
4.2. GPS Sinyaline Kenetlenmiş Sinyal Oluşumu	37
4.3. Uydu Sinyali Alıcı Modülü	38
4.4. CTI OSC-202 10MHz OCXO Modülü	40
4.5. PHASE LOCKED LOOP OPTİMİZASYON YAPILARI	41
4.5.1. CD4046 ENTEGRESİ.....	42
4.5.1.1. Faz Kenetlenme Metodu	45
4.5.1.2. Faz Kenetleyici İç Yapısı	46
4.5.1.3. Faz Kenetlenme Fonksiyonu Analog Yapısı	47
4.5.1.4. Faz Kenetleyici Tasarımı	48
5. DENEYSEL BULGULAR	57
5.1. GNSS Almaç (U-BLOX M8N) Ayarlaması	57
5.2. GPS Kontrollü Zamanlama Ölçümü.....	59
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	77
7. KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ŞEKİLLER

Şekil 1 : GPS Uydu Yörüngeleri [3].....	5
Şekil 2 : GPS Bileşenleri [5]	8
Şekil 3 : GPS uydu yörüngeleri ve konumları [6]	9
Şekil 4 : Kontrol Bölümü İstasyonları [2].....	10
Şekil 5 : GPS Kullanıcı Bileşeni [8]	11
Şekil 6 : GPS Sinyal Bileşenleri [10]	13
Şekil 7 : GPS Sinyali Mesaj Yapısı [11].....	14
Şekil 8 : L1 & L2 Sinyalleri Yapısı [13].....	15
Şekil 9 : Zaman Değişimi ve Farkları [15].....	20
Şekil 10 : Timepulse ve Seri data yapısı [17]	22
Şekil 11 : Zaman İlişkileri [15]	23
Şekil 12 : Senkronizasyon Teknolojileri [21].....	27
Şekil 13 : GPS Kontrollü Osilatör Yapısı	35
Şekil 14 : U-BLOX M8N GPS Modülü ve Anteni [29]	38
Şekil 15 : U-BLO M8N Alıcı Modül Blok Şeması [30]	39
Şekil 16 : 10Mhz OCXO Sinyal Üreteç modül [31]	40
Şekil 17 : 4046 PLL entegresi bağlantı şeması [32]	44
Şekil 18 : PLL entegresi faz karşılaştırıcı iç blok şeması [32]	47
Şekil 19 : PLL devre direnç ve kapasitans hesap grafiği [32].....	50
Şekil 20 : PLL entegresi kazanç ve transfer fonksiyon yapısı	52
Şekil 21 : Kazanç transfer fonksiyon yapısı	54
Şekil 22 : PLL devresi test düzeneği(kalifikasyon).....	55
Şekil 23 : U-CENTER Yazılım arayüzü	57
Şekil 24 : GNSS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon devresi deney düzeneği	60
Şekil 25 : GNSS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon devresi tasarım montajı	61
Şekil 26 : Referans sinyal (1PPS) yükselen kenar süresi	63
Şekil 27 : Referans sinyal (1PPS) düşen kenar süresi	64
Şekil 28 : GPS sinyali (A) varken ve 15dk sonra PLL devresi çıkışı sinyal (C) yükselen kenar süresi	64
Şekil 29 : 15dk sonra GPS Modülü çıkışı sinyal (A) yükselen kenar süresi	65

Şekil 30 : PLL devresinin ilk açılış durumundaki çıkış sinyalinin (C) yükselen kenar süresi	65
Şekil 31 : GPS modülü yeterli uydu sayısı olmadığındaki konumun sapma durumu	66
Şekil 32 : GPS modülünün uydulara tam senkronize olmadığı durumda referans sinyal ile PLL ile oluşturulan sinyal karşılaştırması	67
Şekil 33 : GPS modülü yeterli uydu sayısı varkeni konumun sapma durumu	68
Şekil 34 : GPS modülünün uydulara tam senkronize olduğu durumda referans sinyal ile PLL ile oluşturulan sinyal karşılaştırması	68
Şekil 35 : GPS modülünün uydulara tam senkronize olduğu durumda konumun sapma durumu	69
Şekil 36 : 24 saat boyunca PLL devresi sapma grafiği	69
Şekil 37 : 30 gün boyunca PLL devresi sapma grafiği	71
Şekil 38 : GPS yok iken PLL devresi zamanlama ve senkronizasyon deney düzeneği	73
Şekil 39 : GPS modülü, PLL ve OCXO devresi çalışmaya başladıktan 15dk sonraki çıkış sinyalinin yükselen kenar süresi	74
Şekil 40 : Sadece PLL ve OCXO devresi çalışmaya başladıktan 12 saat sonraki çıkış sinyalinin zaman kayması	75
Şekil 41 : 24 saat boyunca sadece PLL ve OCXO devresi sapma grafiği	75

TABLULAR

Tablo 1 : Navigasyon mesajı alt bölüm içerikleri [9].....	12
Tablo 2 : Frekans standartlarının göze çarpan özelliklerinin karşılaştırılması [25]	32
Tablo 3 : PLL tipine göre hesaplama klavuz tablosu [32].....	51
Tablo 4 : GPS ve PLL Çıkış Sinyallerinin Yükselme Süreleri.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Işık hızı
σ	Standart Sapma
μ	Aritmetik ortalama
ζ	Sönüm oranı
$^{\circ}$	Derece

Kısaltmalar

A/S	Anti Spoofing
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADC	Analog to Digital Converter
ANS	Ataletsel Navigasyon Sistemi
BFF	Band Pass Filter
C/A	Clear Acquisition - Coarse Acquisition
CMDACode	Division Multiple Access
CNAV	Civil Navigation
DOP	Dilution of Precision
DC	Direct Current
ECEF	Earth-Center, Earth-Fixed
FLL	Frequency Locked Loop
GMT	Greenwich Mean Time
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPSDO	GPS Disciplined Oscillator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
KKS	Küresel Konumlandırma Sistemi
LNAV	Legacy Navigation
LNA	Low Noise Amplifier
MCS	Master Control Station
NAV-TP	Navigation Time Pulse

NAV-PVT	Navigation Position Velocity Time
NMEA	National Marine Electronics Association
NTP	Network Time Protocol
OCS	Operational Control System
OCXO	Oven Controlled Crystal Oscillator
P Code	Precise/ Protected Code
PPB	Part Per Billion
PPM	Parts Per Million
PLL	Phase Locked Loop
RHCP	Right-Handed Circularly Polarized
RINEX	Receiver INdependent Exchange
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
SA	Selective Availability
SPS	Standard Positioning Service
SV	Satellite Vehicle
TACC	Time Accuracy
TCXO	Temperature Controlled Crystal Oscillator
TP Qerr	Timepulse Quantisation Error
UTC	Coordinated Universal Time
UTM	Universal Transverse Mercator
VCO	Voltage Controlled Oscillator

SÖZLÜKÇE

İNGİLİZCE

Frequency Locked Loop (FLL)

Gain

In-phase

Modulation

Multipath

Navigation

Phase Locked Loop (PLL)

Precise Positioning Service (PPS)

Pseudo Random Noise

Pseudorange

Voltage Controlled Oscillator (VCO)

Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO)

Temperature Controlled Crystal Oscillator
(TCXO)

TÜRKÇE

Frekans Kenetleme

Döngüsü

Kazanç

Eşevreli

Kiplenim

Çokyolluluk

Navigasyon, Seyrüsefer

Evre Kenetleme Döngüsü

Hassas Konumlandırma

Servisi

Sözde Rastlantısal Gürültü

Sözde Mesafe

Voltaj Kontrollü Osilatör

Fırın Kontrollü Kristal

Osilatör

Sıcaklık Kontrollü Kristal

Osilatör

1. GİRİŞ

İnsanlar bir noktanın veya bulunduğu yerin nerede olduğunu belirlemek için geçmişte konumu ve yön bulmayı da güneş, ay ve aracılığıyla yıldızlar kullanarak yapmış sonrasında haritalar, deniz fenerleri ve pusulalar kullanılmıştır. Ancak bu yöntemler yeterli hassaslık ve doğrulukta sonuçlar vermemesi nedeniyle alternatif yöntemler araştırılmaya başlanmıştır. Bu süreçte de Global Navigation Satellite System (GNSS) - Küresel uydu seyrüsefer sistemi oluşturulmuştur ve kullanıma alınmıştır. Uydu sistemleri ile belirli bir yükseklikteki sinyal yayılımı ile dünya üzerindeki bir noktanın konumunu bulma temeline dayanmaktadır. GNSS temel olarak kod-faz ve varış zamanının ölçümüne dayanan bir sistemdir. Dünya üzerindeki atmosfer katmanlarına yerleştirilen uydu veya uydu takım sistemlerinden oluşan bir mimaridir. Radyo dalgası sinyalleri ile yapılan konum hesabına dayalı sistemdir [1].

Uydu üzerinden konum belirleme, uydudan yayılan sinyallerin bir alıcı tarafından alınıp kaydedilir. Kaydedilen sinyalin uydudan yayınlandığı an ile alıcıda kaydedildiği an arasında geçen süre, sinyalin yayılma hızı ile çarpılarak uydu ile alıcı arasındaki mesafe belirlenmektedir. Uydunun koordinatları zamana bağlı olarak değişimi de bilindiğinden, alıcının konumu hesaplanabilmektedir. Uyduların yayınladıkları atomik saat değeri ile zaman senkronizasyonu ve bu zamana göre konum değişimi ile hız bilgileri elde edilmektedir.

GNSS sistemlerindeki alıcılarda doğruluğu daha düşük saatler kullanılmaktadır. Alıcı ile uydudan gelen sinyal içeriğindeki zaman farkları oluşmaktadır. Alıcılardaki saatlerin senkronizasyonundan kaynaklı hata, alıcıda gerçekleştirilen konum belirleme işlemi sırasında fazladan bir uydu sinyali daha kullanılarak tespit edilir ve giderilir. Böylece GNSS sistemlerde zaman bulunmaktadır. GNSS sistemlerinde hatanın en aza indirilebilmesi için hizmetin sunulduğu uzay ve kontrol segmentinde (birimlerinde) hassasiyeti oldukça yüksek olan atomik saatler kullanılmaktadır. Fakat kullanıcı segmentindeki (son kullanıcı birimleri örn. Mobil cihazlar, telefon vb.) daha az doğruluğu olan saatlerin yol açtığı hata doğru zaman bilgisi içeren bir başka uydu sinyalinin işleme katılmasıyla giderilmektedir.

GNSS uyduları üzerinden konum, hız ve zaman elde edilmesi ihtiyaçlarının giderilmesi sürecinde kullanıcı segmentindeki yapılarda hassas saat bulunmaması nedeniyle zaman hataları oluşmaktadır.

GPS kontrollü osilatör tekniği kullanıcı segmentindeki sistemlerde bulunan osilatörün oluşturduğu sabit frekanslı saat sinyali ile GPS'ten alınan saat sinyalinin fazlarını senkronize işlemidir. Yani kullanıcılarda bulunan osilatörden çıkan sinyalin faz kaymalarından kaynaklı oluşan saat hatasının giderilmesidir. Bu sayede kullanıcı segmentindeki kullanıcıların birbirlerine göre zamansal farklılıkları ortadan kaldırılmaktadır. Literatürde GPS Disciplined Oscillator - GPS Disiplinli Osilatör olarak yer almaktadır.

GPS Disiplinli Osilatör konsepti temel alınarak referans saat sinyali üreten sistemlere de GPS kontrollü saat sistemi olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemlerde bazında faz kenetlemeli çevrim gibi teknikler kullanılmaktadır. Sürekli olarak kullanıcının saat bilgisi güncelleme ve diğer birimler ile senkronizasyonu oluşturma açısından oldukça önemli bir yapıdır.

GPS kontrollü osilatör tekniği ile GNSS Tabanlı Zamanlama ve Senkronizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında aşağıdaki aşamalar uygulanmıştır:

- GPS Disciplined Oscillator ve GPS kontrollü saat yapıları araştırılmıştır.
- UBLOX GPS Alıcı modülü üzerinden uydudan alınan 1 PPS'lik zaman sinyali U-CENTER programı ile düzenlemeler yapılarak 1Hz ve 10KHz'lik frekansta elde edilmiştir.
- 10MHz Fırın Kontrollü Kristal Osilatör modülü ile çıkışında sabit ve ayarlanabilir frekans elde edilmiştir.
- 10MHz OCXO modülünden ele edilen sinyal ile GPS modülünden elde edilen sinyalin frekans uyumlandırma işlemi için Faz kenetleyici çevrim (Phase Locked Loop - PLL) devre tasarımı yapılmıştır.
- Çalışma kapsamında GPS'ten alınan sinyal ile OCXO modülünden gelen sinyalin uyumlandırma sonrasında farklı birçok sistemde kullanılacak olan referans sinyal elde edilmesi amaçlanmıştır.

- Bu çalışma kapsamında GPS sinyali ver iken ve yok iken PLL devresi çıkışındaki referans sinyalin zamana göre kayma durumları incelenecektir.

Burada temel durum GPS sinyali kullanılan ve bu yapıyı referans olarak alan herhangi bir sistem veya ekipmanın GPS ile bağlantısı koptuğunda ilk olarak zaman saati değerlerinde faz ve frekans değişimi, kararsızlık, birçok etkenden etkilenme, doğruluk ve çözünürlüğün azalması ve tüm bunlara bağlı olarak da hata oranının artması ve senkronizasyon yapısının bozulmasına sebep olacaktır. Bu bozulma ise tüm ölçüm ve hesaplamaları etkilemesi nedeniyle GPS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon mimarilerinin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır.

GPS tabanlı zamanlama uygulamaları kapsamında GPS zamanının sismik izleme ağıları, Haberleşme Senkronizasyonu, Mobil Verici Sistemler, İnternet Sağlayıcıları ve Hücrel veri transferi sistemleri gibi pek çok sektöre uygun çalışmalar literatüre yansımıştır. Bu doğrultuda GPS sinyali parametrelerini kullanarak veya GPS alıcı modüllerinden elde edilen sinyaller ele alınarak yazılım, optimizasyon, elektronik tasarım ve iyileştirmeler akademik veya bilimsel olarak yoğun bir şekilde ele alınmaktadır.

Çalışma kapsamında tez içerisinde

- 2. Bölümde GNSS Sistemleri, GPS yapısı ele alınacaktır.
- 3.bölümde GNSS/GPS ve Zamanlama
- 4.bölümde GPS Kontrollü Saat ve PLL Devre tasarımı
- 5.bölümde Deneysel Bulgular.

ile başlıklar içerisinde sunulmuştur.

Yukarıdaki bölümler ile GPS Tabanlı Zamanlama ve Senkronizasyon konusu kapsamında teorik yapı ve elektronik devre mimarilerinin sentezini içeren bir çalışma amaçlanmaktadır.

2. KÜRESEL SEYRÜSEFER UYDU SİSTEMLERİ

GNSS yapısı, yeryüzünde çeşitli farklı koşul ve noktalardaki uydulardan alınan sinyaller ile anlık ve yüksek hassaslık/doğrulukta konum, hız ve zaman belirlemeye/ölçümlemeye yarayan bir seyrüsefer sistemidir.

Bu doğrultuda Uydu Tabanlı Konum Belirleme Sistemleri yapıları oluşmuş ve kullanıma açılmıştır. Böylece navigasyon, insansız araçlar, arama-kurtarma faaliyetleri, hedef bulma ve kilitleme algoritmaları, sınırlı hava koşullarında uçakların iniş ve kalkışı, Jeodezik ve Jeodinamik ölçme yapıları, kadastral ölçme sistemlerinde, GNSS destekli fotogrametri çalışmaları, deformasyon ölçümlenmeleri, gerçek zamanlı sabit GNSS ağı ve CBS uygulamaları şeklinde çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde en çok oranda konum, hız ve zaman belirleme amaçlı kullanılan başlıca Uydu Konum Belirleme sistemleri aşağıdakilerdir [2];

- GPS (ABD)
- GLONASS (RUSYA)
- BEIDOU (ÇİN)
- GALILEO (AVRUPA BİRLİĞİ)

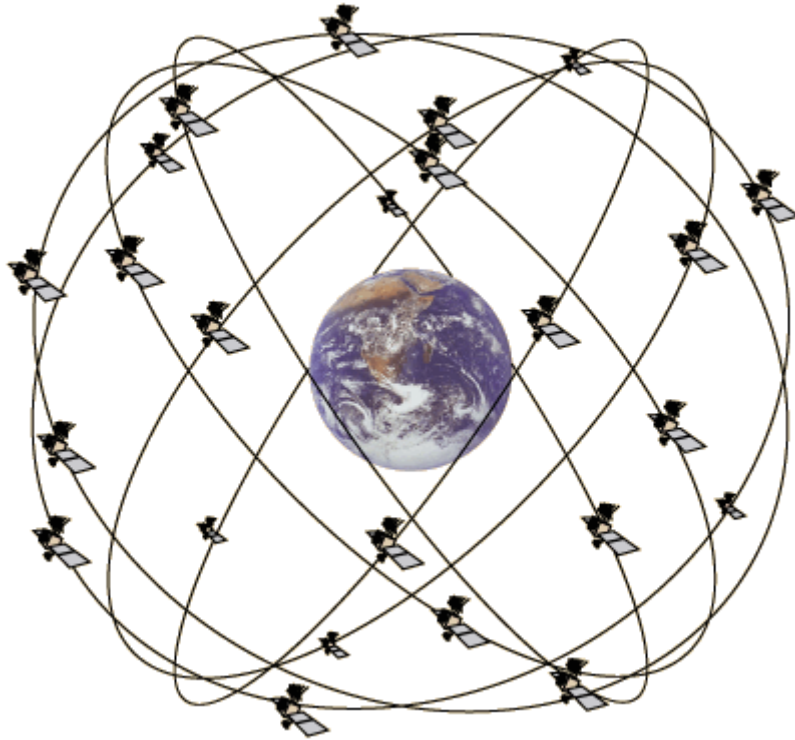
Yukarıdaki uydu konum belirlem sistemlerinde küresel ölçek haricinde bölgesel sistemlerde bulunmaktadır.

2.1. GPS Temelleri

GPS radyo sinyalleri temelinde çalışan bir radyo seyrüsefer (navigasyon) ve zaman belirleme sistemidir. GPS, ABD Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen, işletilen ve kontrol edilen bir sistemdir. Yörüngede bulunan uydu ağı aracılığıyla atmosferden dünyaya doğru yayımlanan kodlanmış sinyallerle dünya üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatlarını belirlemeyi mümkün kılmayı amaçlamaktadır ve şu an kullanılmaktadır. 1994 yılında tam olarak devreye

alınan GPS NAVSTAR Sistemi halihazırda dünyada en yaygın kullanılan navigasyon sistemidir.

GPS sistemi; herhangi bir anda dünya üzerindeki herhangi bir noktada, her türlü hava koşulunda, kesintisiz olarak, yüksek doğrulukta navigasyon bilgisi sağlamayı hedeflemektedir. Bu bilgileri GPS alması ile alan kullanıcı sistemleri sayesinde 3 boyutlu olarak konum, hız ve zaman bilgilerine ulaşabilir. GPS Sistemi nominal olarak 6 farklı yörünge düzleminde 4'er tane olmak üzere yerleştirilmiş 24 uydudan oluşur (Şekil 1). Bu uydu takımı dünyayı her an kapsayıcı ve kesintisiz şekilde hizmet vermeyi temel alan bir mantık ile oluşturulmuş ve yörüngeye oturtulmuştur.



Şekil 1 : GPS Uydu Yörüngeleri [3]

Modüler veya sabit noktada olan GPS alıcısı tarafından kullanılan konum bulma yöntemi, geometrik bir ilkeye dayanır. Bir noktanın konumu, konumu bilinen 3 noktaya olan uzaklıkları biliniyorsa buna göre hesaplanabilir. GPS uyduları kendi konumlarını hesaplamayı sağlayan ve her biri uyduya özel olarak tanımlanmış olan yapıdaki sinyalleri sürekli olarak yayımlamaktadırlar.

GPS alıcısı bu sinyalleri alıp yazılımsal olarak çözümlenerek hem uydunun konumunu belirleyebilir hem de sinyalin alıcıya ulaşma süresini kestirebilir. Bu sayede hem uyduların konumları hem de alıcı ile uydular arasındaki mesafeler bulunabilir 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 10,23MHz olan temel frekansın 154 ve 120'nin tam katları alınarak elde edilmiş olan L1 ($10,23 \times 154 = 1575.42$ MHz) ve L2 ($10,23 \times 120 = 1227.60$ MHz) frekanslarında bulunan iki bileşenden oluşur (Şekil 8). GPS elektromanyetik dalgalar kullanılarak uydulardan kullanıcılara veri akışı sağlanmaktadır. Bütün GPS uyduları 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 ve eşsiz olduğundan uydu sinyalleri birbirinden CDMA (Code Division Multiple Access) tekniği ile ayırt edilebilmektedir [4].

İlke olarak GPS uydusu tarafından gönderilen sinyaller ile navigasyon ve zaman bilgileri kullanılarak uydunun gönderme anında geçerli olan konumu alıcı sistemi tarafından bulunabilir. Aynı zamanda PRN kodları kullanılarak sinyalin uydudan alıcıya ulaşmaya kadar ortamda geçirdiği süre de bulunabilir.

Uydu alıcı sistemleri tarafından alınan sinyalin hangi uydunun sinyali olduğunu tanımlamada değişik yöntemler mevcuttur. Bunlar, uydunun tipine göre belirlenen yörüngeye yerleşme sıra numarasına, her bir uyduya ait PRN (Pseudo Random Noise) kod numarasına, yörünge konumundaki numaralama ve NASA katalog numarasına göre yapılmaktadır.

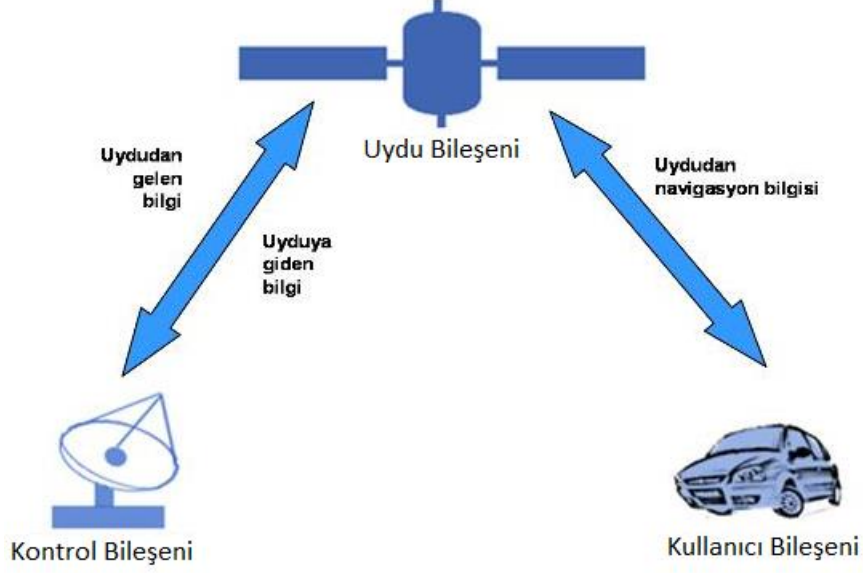
Zaman farkının bulunması işlemi için alıcıda uyduyla eş zamanlı çok hassas bir saat bulunması gerekmektedir. Çünkü alıcının iki sinyal arasındaki farkı bir ölçü birimini temel alarak yapması gerekir ve buradaki bu ölçü zaman kavramıdır.

GPS alıcıları pasif cihazlardır. Bu sebeple GPS sisteminden yayılan sinyaller aynı anda sınırsız sayıda kullanıcıya hizmet verebilir. Ancak hassas ve doğruluğu çok yüksek olan (çeşitlerine göre değişmekle beraber 1 ile 10 milyon yılda 1 saniye sapma/yanılmaya sahip) saatler çok maliyetli ve karmaşık olduklarından herhangi bir GPS alıcısında kullanılmazlar. Bu nedenle her zaman GPS uyduları ile alıcı arasında bir zaman farkı oluşur ve matematiksel boyuttaki ele alınan, 3 boyutlu konum dışında dördüncü bir bilinmeyen(zaman) olarak hesaba katılmaktadır. Bu dört bilinmeyenin bulunabilmesi için en az 4 uyduya olan mesafe bilinmelidir.

Yörüngeye yerleşen GPS uydu takımı içindeki uyduların hepsinin eğikliği 55° olarak uydu görüngeleri arasında ortada olan yörüngede dönmektedir. Yörünge yapısı itibariyle dairesel yapıda olan ve her bir uydunun periyodu yaklaşık 12 saattir ve dünyaya göre (24 saat içinde) uydular yörüngede 2 tur atarlar. Dolayısıyla uyduların dönüş sırasındaki dünya üzerindeki izdüşümleri kuzeyden 55° ve güneyden 55° enlemleri aralığında hareket eden bir dalga formunda salınım hareketi yaparlar. Bu yüzden uydu sistemleri günde iki kere 55° kuzey enlemi ve iki kere de 55° güney enlemi üzerinden geçer. Bu geçiş yapısı kuzeyden başlayıp güneye veya tam tersi şeklinde olan bu döngüsel salınım hareketi yörünge üzerinde boylam bazında yaklaşık 90 derecede bir yön değiştirir. Ayrıca diğer yörünge düzlemlerindeki uydular ise dünyaya göre izdüşümleri arasında boylamsal olarak 60 derecelik faz farkı vardır. Yörüngedeki uydu takımı ve bunların dizilimi küresel manada kapsama kabiliyeti getirmektedir.

2.2. GPS Sistem Bileşenleri

GPS sistemi; uzay bileşeni, kontrol bileşeni ve kullanıcı bileşeni olmak üzere üç altbileşenden oluşmaktadır. GPS'in bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



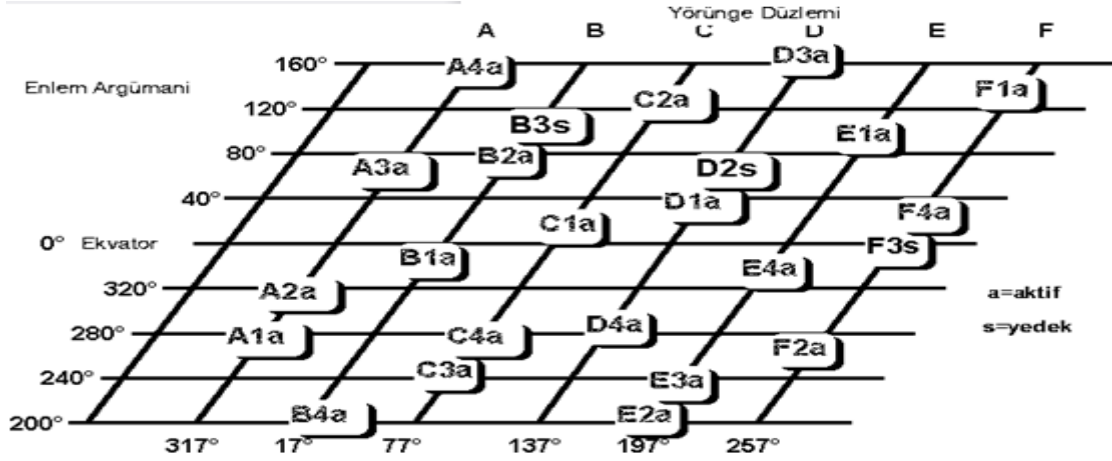
Şekil 2 : GPS Bileşenleri [5]

2.2.1. GPS Uzay Bileşeni

GPS Sistemi nominal olarak 6 farklı yörünge (55 derecelik eğim yapan) düzleminde 4'er tane olmak üzere yerleştirilmiş 24 uydudan oluşur [3]. Ancak, Aralık 2012 tarihinde yörüngeye yerleştirilmiş 32 adet GPS uydusu bulunmaktadır [2]. Yedek uydular, esas uydulardan birinde sorun olması halinde devreye giren uydulardır. Bu uydu takımı dünyayı her an kapsayıcı ve kesintisiz şekilde hizmet vermeyi temel alan bir mantık ile oluşturulmuş ve yörüngeye bulunması haricinde bu yapının sürekli ve hatasız olarak senkronize şekilde çalışması esastır. Her uydu bulunduğu yörünge ve uzay katmanındaki yeri bir sonraki ve bir önceki uydunun yerine göre kendini ve tüm uydu takımı yapısını optimizasyonunu gerektirir (Şekil 3).

GPS uyduları saatte 7.000 mil hızla hareket ederler ve yaklaşık 12 saatte, dünya çevresinde bir tur atarlar. Güneş enerjisi ile çalışırlar ve en az 10 yıl kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. Ayrıca güneş enerjisi kesintilerine karşı (güneş tutulması vs.) yedek bataryaları ve yörünge düzeltmeleri için de küçük ateşleyici roketleri vardır. Sistemde Block I ve Block II uyduları yer almaktadır. Block I uyduları deneysel amaçlı olup, 1978 ve 1985 yılları arasında sistemi test etmek için kullanılmıştır. Block II uyduları işletimsel serinin ilk 9 uydusundan oluşmaktadır.

Block IIA serisi 19 uydudan oluşmakta, Block IIR serisi ise mevcut uyduların yenileri ile yer değiştirmesi için geliştirilmiştir. Bu uyduların en önemli özelliği, saatlerinin atomik (hydrogen masers) olmasıdır. Güncel olarak 27 adet Block II, IIA ve IIR uyduları yörüngelerinde bulunmaktadır [7].



Şekil 3 : GPS uydu yörüngeleri ve konumları [6]

2.2.2. GPS Kontrol Bileşeni

GPS uydularını sürekli olarak yerden izleme amacıyla oluşturulmuş yapıdır. Şekil 4'de gösterildiği üzere yapı içerisinde ana kontrol istasyonu, yer antenleri ve izleme istasyonlarını barındırmaktadır. Dünya üzerinde çeşitli noktalarda 5 adet GPS kontrol istasyonu vardır;

- Colorado Spring (Ana merkez)
- Hawaii
- Kwajalein
- Ascension adaları
- Diego Garcia

Bu istasyonlardan dördü insansız, biri insanlı kontrol merkezidir. İnsansız kontrol merkezleri, topladıkları bilgileri ana merkeze iletirler. Ana merkezde bu bilgiler değerlendirilerek gerekli düzeltmeler uydulara bildirilir [2].



Şekil 4 : Kontrol Bölümü İstasyonları [2]

2.2.3. GPS Kullanıcı Bileşeni

GPS kullanıcı bölümü GPS alıcılardır. Çeşitli amaçlarla GPS kullanarak yerini belirlemek isteyen herhangi bir kişi, sistemin kullanıcı bölümüne dahil olur. Bu bölüm kullanıcılara sunulan uygulamaya ait donanım ve hesaplama tekniklerinin geniş bir aralığını tanımlar. Gerek askeri gerekse sivil kullanıcılar için GPS almaç teknolojisi zaman içinde büyük bir ilerleme göstermiştir [2].

Genel olarak her türlü amaç için farklı duyarlıkları olan uygun donanımlı GPS alıcıları(receiver) bu bölümü oluşturur. Bir GPS alıcısı; algılayıcı (sensor), kontrol ünitesi, alıcı anteni ve güç kaynağından oluşur. Ölçü sırasında; anlık faz farkı ölçüleri (data, ham ölçüler), yayın efemerisi bilgileri (uydu yörünge bilgileri), atmosferik bilgiler (iyonosfer ve troposfer bilgileri), mesaj bilgileri (anten yüksekliği ve nokta bilgileri) elde edilir [2]. Şekil 5’de gösterildiği gibi GPS kullanıcı bileşen bazında GPS alıcısı olarak kullanıcıya lokasyon, yükseklik ve harita gibi çeşitli imkanlar sunmaktadır.



Şekil 5 : GPS Kullanıcı Bileşeni [8]

2.3. GPS Navigasyon Mesajı

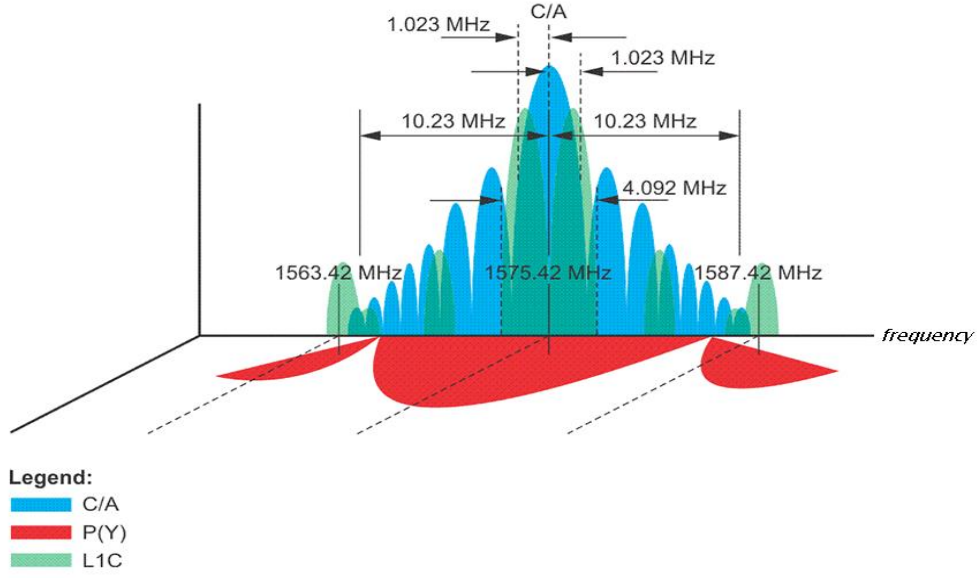
Navigasyon mesajı 50 bit/s lik veri hızında C/A ve P kod üzerine modüle edilmiştir. Mesajın tamamı 1500 bit uzunluğundadır, her biri 300 bitlik 5 alt bölümden oluşmaktadır. Navigasyon mesajının alt bölümlerinin içerikleri tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1 : Navigasyon mesajı alt bölüm içerikleri [9]

Alt Bölüm No	İçeriği
1	a. GPS hafta sayısı b. URA (user range accuracy) değeri c. Uydu sağlık durumu d. Uydu saat düzeltmeleri
2-3	a. Efemeris verileri
4	a. Almanak verileri b. UTC-GPS saat düzeltmeleri, iyonosferik düzeltme katsayıları bulunmaktadır.
5	Bu bölüm büyük oranda tüm uydular için almanak verilerine ayrılmıştır.

GPS Mesaj Seti

- 50 bit/sn'lik veri hızında P-Kod ve C/A Kod üzerine bindirilmiş bir yapıdadır (Şekil 6).
- Mesajın tamamı 1500bit uzunluğundadır ve her biri 300 bitlik 5 alt bölümden oluşmaktadır (Şekil 7).
- Bir alt bölüm toplam 6 saniyede yayınlanmakta ve her biri 30 bit'lik 10 kelime içermektedir (Şekil 7).
- Her bir alt bölüm TLM (Telemetry) kelimesi ile başlamaktadır (Şekil 9). TLM kelimesi Kontrol Bölümü için gerekli bilgileri kapsamakta olup standart GPS alıcıları tarafından kullanılmamaktadır.
- Her bir alt bölümün ikinci kelimesi ise HOW (Hand-Over-Word) kelimesidir (Şekil 7). HOW kelimesi 4 rakamı ile çarpıldığında bir sonraki alt bölümün başlangıcına ait haftanın zamanını (TOW: Time Of Week) vermektedir. TOW sayacı ölçü anındaki GPS haftasının başlangıcından itibaren geçen 1,5 saniyelik zaman aralıklarının toplamını vermektedir.

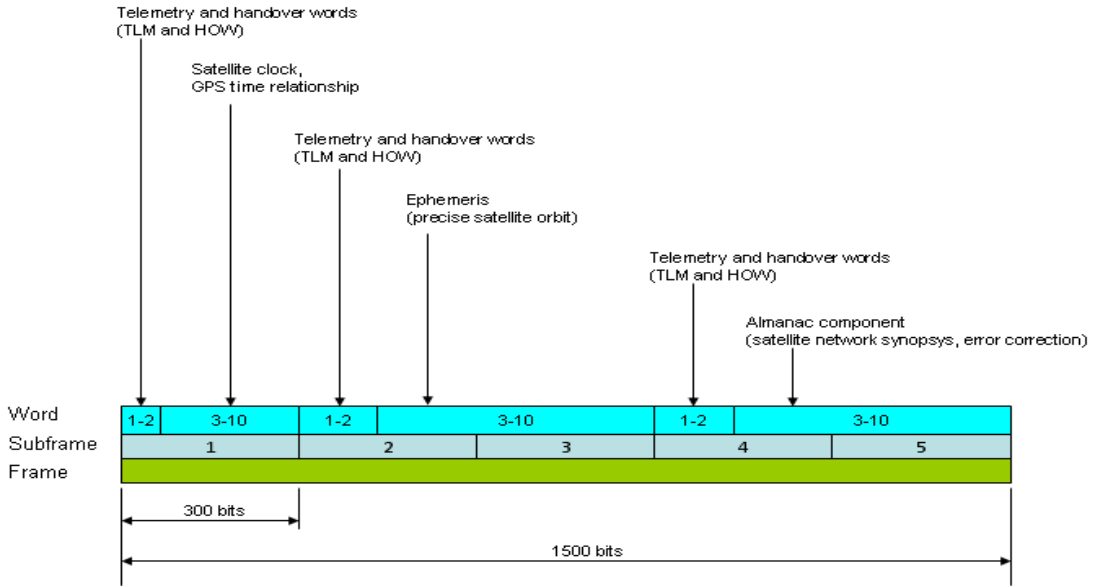


Şekil 6 : GPS Sinyal Bileşenleri [10]

Navigasyon Mesajı 30 saniyelik yapıda ve bu mesajın tamamı toplam 25 frame'den oluşmaktadır. 25 frame'in yayınlanması toplam 12,5 dakikalık süre gerektirmektedir. Şekil 7'da GPS Mesajının genel yapısı görülmektedir.

Almanak verileri, uydu kontrol bölümü tarafından en az 6 günde bir güncelleştirilmektedir. Ancak uydularda bir değişim ya da bozulma olursa bu güncelleme zamanı değişiklik göstermektedir. Mevcut GPS uyduları için bu süre 180 gündür.

GPS Almanak dataları uydudaki saat parametrelerinin belirli bir kısmını kapsamaktadır. Kullanım amacı, GPS alıcısının ölçüme başlamak için ilk açılması anında süratli bir şekilde uydulara kilitlenebilmesi için gerekli olan, doğruluğu oldukça düşük uydu koordinatlarını sağlamaktır. Ayrıca ölçü planlamalarında uydu görünürlük grafiklerinin çizilmesinde de kullanılmaktadır. Almanak verileri her uydu tarafından yayınlanmakta ve içerisinde tüm uydulara ait yaklaşık konum bilgileri bulunmaktadır [12].



Şekil 7 : GPS Sinyali Mesaj Yapısı [11]

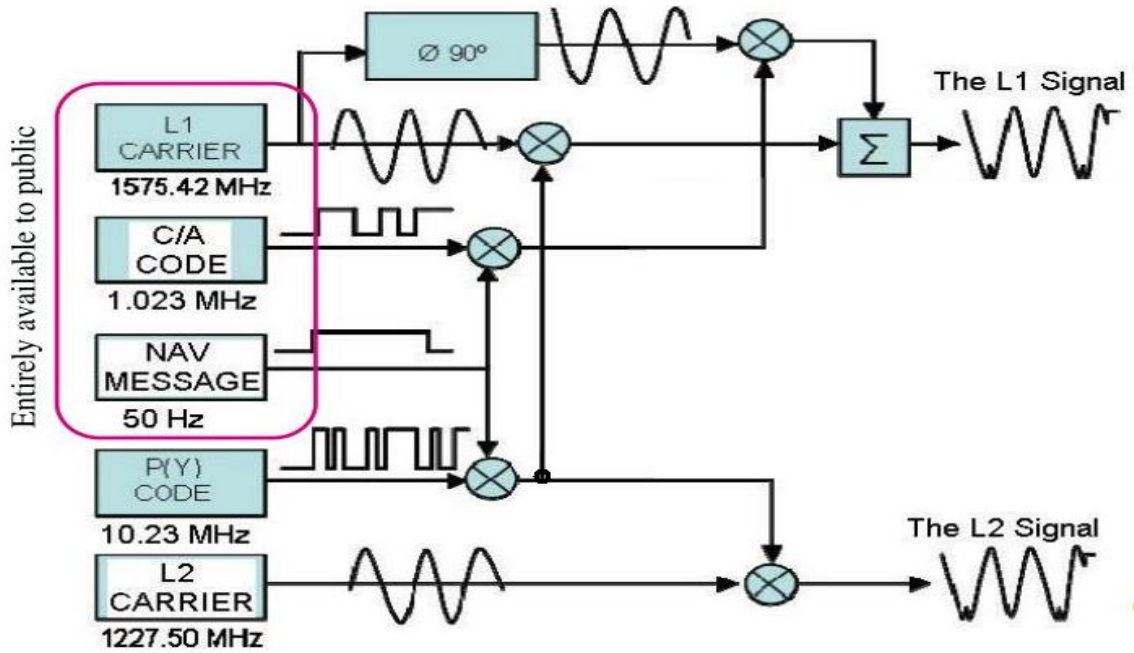
Uydulardan yararlanılarak GPS sinyali üzerinden yapılan ölçmelerde, elektromanyetik dalgalar kullanılarak uydulardan kullanıcılara veri akışı sağlanmaktadır. Her bir GPS uydusu konum belirleme amaçlı olarak iki temel frekansa sahip olup bunlar L1 ve L2 'dir (Şekil 8). L1 ve L2 frekansları 10,23 MHz olan temel frekansın 154 ve 120 tam katları alınarak elde edilmiş olup, L1 frekansı 1575,42 MHz ve L2 frekansı 1227,60 MHz'dir.

GPS sisteminde çift frekans olmasının amaçları;

- L1 frekansının herhangi bir nedenle kesilmesi ya da elektronik karıştırmaya maruz kalması durumunda L2 frekansının yedek frekans (backup) görevi görmesi
- Çift frekans özelliğinden yararlanarak iyonosferik düzeltme olanağı sağlaması olarak sıralanabilir.

L1 ve L2 taşıyıcı frekansları çeşitli sorunları gidermek amacıyla farklı kodlama ve protokoller çerçevesinde yapılandırılmıştır. Uydu saat düzeltmeleri, yörünge parametreleri gibi bilgilerin yeryüzündeki alıcıya ulaştırılabilmesi amacıyla çeşitli kodlarla ve Navigasyon verileri ile modüle edilmiştir. Bahsedilen modülasyon işlemlerinde her bir uyduya tek bir PRN (Pseudo Random Noise) kod numarası

verilmiştir. Tüm uydular aynı taşıyıcı frekansta veri yayını yapmasına karşın, uydu sinyalleri PRN kod modülasyonu tekniği nedeniyle birbiri ile karışmamaktadır.



Şekil 8 : L1 & L2 Sinyalleri Yapısı [13]

L1 taşıyıcı frekansı üzerine iki PRN kodu ve Navigasyon Mesajı verileri modüle edilmiştir. Bu PRN kodları C/A (Coarse/Acquisition, Clear/Access) kod ve P (Precise/Protected Code) kod olarak isimlendirilmektedir.

L2 taşıyıcı frekansı ise yalnızca tek bir PRN kodu (P-kod) ve Navigasyon Mesajı verileri ile modüle edilmiştir. L1 taşıyıcı frekansı üzerinde C/A kod, P-kod ve Navigasyon Mesajı bilgileri, L2 taşıyıcısı üzerinde ise P kod ve Navigasyon Mesajı bilgileri bulunmaktadır. Yani sivil kullanıcılara açık olan C/A kod yalnızca L1 üzerinde mevcuttur. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi C/A kod bilgisinin Block IIR-M uyduları vasıtasıyla L2 üzerinden yayınlanmasına karar verilmiştir.

2.3.1. C/A Kod Özellikleri

C/A kod GPS sinyali taşıyıcı frekans bandı olan L1 taşıyıcı üzerine modüle edilmiştir. Bu kod 1 MHz'lik PRN kod olup, her 1023 bitlik kod sonunda

(milisaniyede bir) tekrarlamaktadır. C/A kod periyodunun çok kısa seçilmesinin amacı GPS alıcılarının uydulara en kısa sürede kilitlemesini sağlamaktır.

Yörüngelerdeki her bir uydu için birbirinden farklı C/A kod PRN tahsis edilmiş olup bu kodlar “Gold Codes” adı verilen kodlar arasından seçilmiştir. C/A kod tüm kullanıcılara açıktır ve özellikle sivil standart konum belirleme hizmeti (SPS: Standart Positioning Service) için temel oluşturmaktadır. Ayrıca P-kodlu GPS alıcılarının daha uzun süreli olan P koduna kilitlemesi için geçen süreyi azaltmakta da kullanılmaktadır.

PRN kodlar bilgi taşımadığı için bunlara “chip” adı da verilmektedir. Dolayısıyla, C/A kod uzunluğu “1023 chip” olarak ifade edilirse, bu her milisaniyede bir tekrar etmektedir. Böylece iki “chip” arasındaki zaman farkı yaklaşık 1 mikrosaniye olup ışık hızı ile işleme aldığımız da yaklaşık 300 metrelik bir “chip” uzunluğuna yani dalga boyuna karşılık gelmektedir. Günümüz sinyal işleme teknikleri ile sinyal çözünürlükleri, gözlenen sinyalin dalga boyunun %1’i kadardır. P kod ve C/A kod için dalga boyu ile “chip” uzunlukları aynı anlamda olup C/A kodun dalga boyu (chip uzunluğu) 300 metre, çözünürlüğü 3 metredir.

2.3.2 P Kod Özellikleri

P-Kod, L1 ve L2 taşıyıcıların her ikisinde de modüle edilmiş olup yaklaşık 266,4 günlük kod uzunluğundadır. Kod uzunluğunun tamamı birer haftalık toplam 37 haftaya bölünmüştür. Her bir uyduya bu 37 haftalık kodun birer haftalık bölümleri tahsis edilmiş olup bu da uydunun PRN numarasını ifade etmektedir. Böylece 37 ayrı PRN P-kodu tahsis edilmiş olmaktadır. Kodlar her GPS haftası başında (Cumartesi gece yarısı) tekrar etmektedir. Eğer P-kod her hafta sıfırlanıp yeniden yayınlanmasaydı, toplam yayınlanma süresi yaklaşık 37 hafta sürecekti. Oysa 37 haftalık periyot birer haftalık bölümlere ayrılarak her bölüm bir GPS uydusuna ve yeryüzü yayın istasyonlarına (Pseudolites) tahsis edilmiştir. Böylece uydulara ait hiçbir bölüm (PRN kodu) diğeriyle karışmamakta ya da çakışmamaktadır. P kod “chip” uzunluğu 30 metre olup, çözünürlüğü 30 cm’dir [6].

P-kod Navigasyon Mesajının her bir alt bölümü 6 saniye (4*1,5 sn) sürmektedir. Ayrıca, GPS alıcısının P-koduna kilitlenebilmesi için Navigasyon Mesajının her bir 6 saniyelik alt bölümünde HOW (Hand-Over-Word) kelimesi vardır. HOW kelimesi her alt bölümün ikinci kelimesi olup, bir sonraki alt bölümün oluşturulmasında P-kodun hangi bölümünün kullanıldığı ile ilgili bilgi vermektedir. Dolayısıyla, HOW kelimesi 4 ile çarpıldığında bir sonraki alt bölümün başlangıcındaki sayaç değerini vermektedir. Böylece, GPS alıcısı önce C/A koda kilitlenip zaman bilgisini alır buradan HOW kelimelerini ve alt bölüm epoklarını belirler ve buradan bir sonraki alt bölüm epokuna ait P-koda daha kolay şekilde kilitlenebilir. Fakat, C/A kod yapılandırması olmaksızın doğrudan P-koda ulaşabilmek için diğer bir seçenek GPS alıcı konumunun ve GPS zaman bilgisinin hassas olarak bilinmesi ve bunun alıcıya girilmesidir.

3. GNSS/GPS VE ZAMANLAMA

3.1. Zaman Kavramı

İnsanoğlu, tarih boyunca çeşitli yöntemlerle zamanı ölçmeye çalışmıştır. İlk başta insanlar için sadece yağmurun, karın, soğğun, sıcakğın zamanını bilmek yetiyordu; mevsim bilgisine dayanarak barınma, göç veya hasat zamanı belirliyordu. Gittikçe daha küçük zaman birimlerine ihtiyaç duyan insanlık, yılı aylara ve haftalara bölmeye başlamıştır. Zaman genel olarak yaşamın ölçütlendirme ihtiyacına istinaden öncelikle yıldızlara daha sonra da birçok farklı metodolojiye bağılı kalarak referans alınan bir kavram olmuştur [14].

Zaman, göreceli bir kavramdır. Zaman içinde olduğumuz üç uzam ve bir zaman boyutlu uzay-zaman soyut olan boyutu olarak da kabul edilir. Zamanın tarifi konusunda tam bir uzlaşmaya varılamasa da ölçülmesi konusunda çeşitli teknikler vardır. Zaman ölçümünde temel bir zaman aralığı referans alır. Bu referans için değışikliğe uğramayan doğal bir fenomen kullanılabilir. Zaman ölçümünde kullanılan başlıca iki adet birbirinden bağımsız ölçek vardır:

- **Atomik ölçüm-** Atomların içsel enerji durumları arasındaki karakteristik frekanslardan yararlanır. Atomik zamanlama için Rubidyum, Sezyum, Hidrojen gibi çeşitli elementler kullanılmaktadır. İlk atom saatleri, sayım ekipmanları eklenmiş Maserler'dir. Bugünün en iyi atom saatleri, soğuk atomlara dayanan ileri fizik ürünü aletlerdir.
- **Dinamik ölçüm-** Gök cisimlerinin çekimsel hareketlerini kullanır. Bu ölçümler sonucu ay ve güneş takvimleri ortaya çıkmıştır.

3.2. GPS'de Kullanılan Zaman Sistemleri

Zaman kavramı yaşam uzayında iki işlem arasındaki geçen sürenin bir temel birime dayandırılması esasına göre oluşturulmuştur. Bu işlem kimi zaman güneş hareketlerine kimi zaman yıldızlara göre yapılmış olsa da farklı ölçüm metodları da geliştirilmiştir. GPS uydu sisteminde 3 farklı zaman metodolojisi

kullanılmaktadır. Bunlar; dinamik zaman, atomik zaman ve yıldız zamanı sistemleridir. Ancak bu belirtilen zamanlar haricinde de bir sürecin belirleyici niteliği olan zaman kavramının da başka çeşitleri bulunmaktadır.

3.2.1. Dinamik Zaman Sistemi

Dinamik (Hareketli/Değişken) zaman sistemi, cisimlerin yerçekimi teorisine göre belirli uzay sistemindeki değişim veya hareketlerini ifade etmektedir. GPS sistemindeki uyduların yörüngelerinin hesaplanmasında temel parametre olarak kullanılan dinamik zaman sistemine Yersel Dinamik Zaman (Temps Dynamique Terreste-TDT) bir başka deyişle Karasal Zaman Sistemi olarak ifade edilmektedir. TDT yer gravite alanı içerisindeki kullanıcılar için uygun bir zaman ölçüğü oluşturmaktadır.

3.2.2. Atomik Zaman

Hassas bir zaman için girilen çalışmalarda atomik titreşim frekanslarını referans alan zaman kavramı Atomik Zaman olarak adlandırılmıştır. Temel zaman ölçüğü olarak Uluslararası Atomik Zaman (International Atomic Time-TAI) kullanılmaktadır. TAI'nin hesaplanmasından BIPM ve IERS sorumludur. TAI sürekli bir zaman ölçüğüdür. TDT'nin uygulamaya uygun şekli gibi de düşünülebilir (Şekil 9).

GPS zaman dönemi yani 1980-01-06 00:00 (gece yarısı) UTC'dir. GPS saati ile TDT arasındaki zamansal farklar onlarca nanosaniye düzeyinde sabitken, GPS Saati ve UTC arasındaki fark değişkendir [15].

TAI (Temps Atomique International), uluslararası birimde atom zamanıdır. Bu, birçok ülkenin atomik standartlarından elde edilen bilginin Paris'te Bureau International de l'Heure (BIH) tarafından analiz edilmesi ile elde edilir. TAI'nin temel birimi SI saniyesidir. SI saniyesi ise şöyle tanımlanır:

Sezyum 133 atomunun çekirdeğinin iki çok ince düzeyi arasındaki geçişe karşılık olan ışınım devir süresinin 9.192.631.770 katı olan süredir.

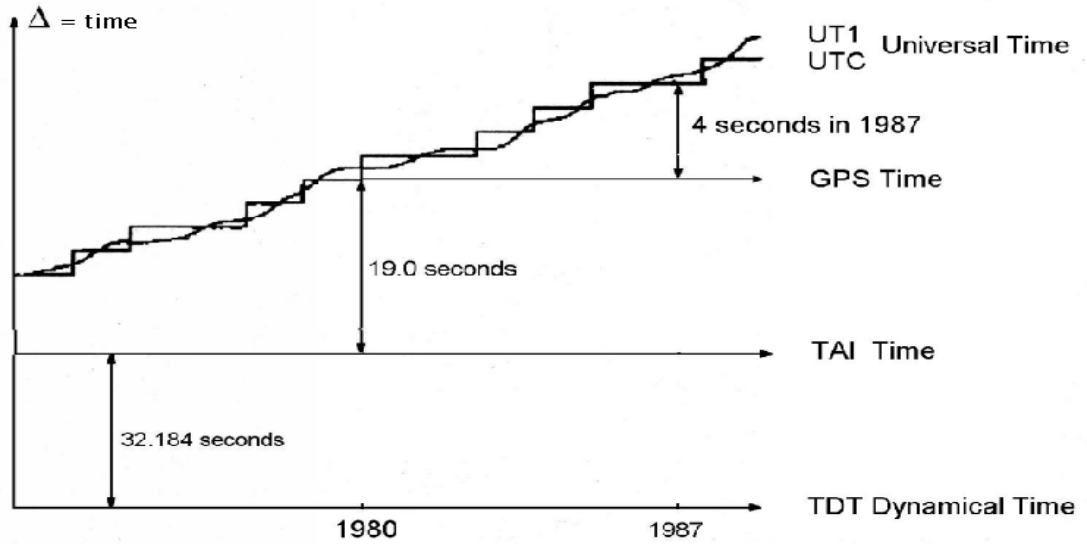
TAI'nin sürekli bir zaman birimi olması nedeniyle pratik kullanımda temel bir sorunu vardır. Dünyanın Güneş çevresindeki devir süresi azalmaktadır. Bunun büyüklüğü zamanımızda 1s kadardır. Böylece TAI'nin Güneş günü ile eşzamanlı kılınması sakıncalı bir duruma gelir (Şekil 11). Sorun UTC'nin kullanılması ile halledilir. UTC ve TAI saatlerinin gidiş hızları birbirine eşittir. Ancak, her yıl Haziran ve Aralık ayında 1s atlatılarak (leap seconds) artırılır. Yani, UTC'nin de ana zaman birimi SI saniyesidir.

Karasal Zaman (TDT) ve Uluslararası Atomik Zaman (TAI) arasındaki ilişki ;

$$\text{TDT} = \text{TAI} - 32.184 \text{ sn}$$

TAI ile GPS zamanı arasında ise 19 saniyelik bir kayıklık payı :

$$\text{TAI} = \text{GPS} + 19 \text{ sn olarak verilmektedir.}$$



Şekil 9 : Zaman Değişimi ve Farkları [15]

3.2.3. Greenwich Ortalama Saati (GMT)

Greenwich meridyeni üzerinde yıldızların günlük hareketlerinin astronomik gözlemlerle belirlenmesiyle temel alınan bir zaman birimidir. Kararsızdır (yılda bir saniye içinde) ve Dünya'nın dönüş hızındaki sürekli değişime, yüzeyi boyunca

coğrafi kutupların hareketine ve gezegenin dönme ekseninin beslenmesine bağlıdır. Greenwich (astronomik) saati, UTC'ye (atomik saat) yakındır.

GPS navigasyon süresi Ocak 1980'den beri faaliyettedir. İçinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. UTC zamanından 16 saniye ileridedir.

3.2.4. Koordineli Evrensel Zaman (UTC)

Koordineli Evrensel Zaman, diğer zaman sistemlerine dayanılarak tanımlanan bir zamandır. Greenwich Ortalama Saati'ne (GMT) benzer, ancak bu zamandan farklı olarak, Dünya'nın dönme zamanına değil, atomik saatler tarafından yapılan ve zaman içinde en doğru ve daha kararlı olan ölçümlere dayanır [16].

UTC zamanı günlere, saatlere, dakikalara ve saniyelere böler, ancak bir gün her zaman 24 saat ve bir saat her zaman 60 dakika iken, bir dakika her zaman 60 saniye olmayabilir. Örneğin 30 Haziran 2015'te 61 saniyelik bir dakika tanımlanmıştır. Bu değişim, dünyanın güneş etrafındaki dönüş süresine bağlıdır ve hızındaki dalgalanmalar nedeniyle sabit değildir. Bu 61 saniyelik periyotdaki fazladan olan bir saniyeye "artık saniye" denir.

UT0- Dünya'nın kutuplarının anlık konumu ile belirlenen anlık Greenwich meridyenindeki zaman olarak baz alınır ancak mevcutta kullanılmamaktadır (Şekil 9).

3.2.5. GPS Saati

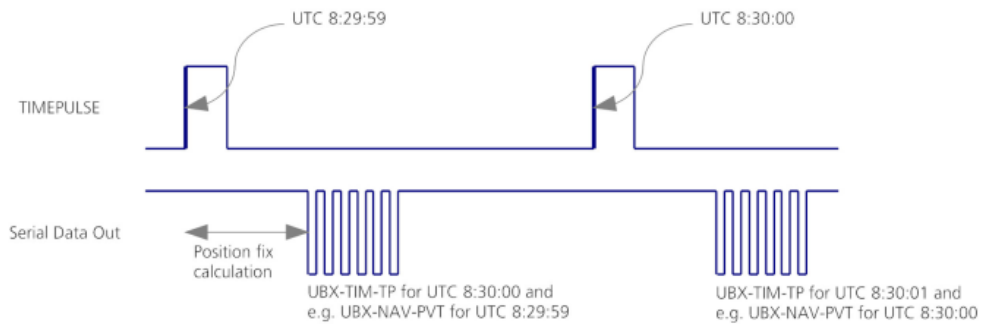
GPS uyduları, 1980-01-06'da UTC ile senkronize edilmiş bir zaman ölçeğini benimsemiştir ve o zamandan beri TAI ile yakın senkronize olarak yönetilmektedir. Bu nedenle TAI-GPS farkı 19 saniye gibi bir zaman değeri olmuştur. Pratik amaçlar için bu, GPS zamanının TAI zaman hesabı değişkenlerine güçlü bir şekilde benzemektedir (Şekil 9 ve Şelik 11).

GPS zamanı Kontrol birimi tarafından ayarlanmaka ve referans olarak da UTC zamanı benimsenmiştir. 6 Haziran 1980'de gece yarısından bu zaman dilimi sıfır

anı olarak baz alınmıştır. GPS sisteminde datalar haftalık olarak raporlanmakta ve GPS zamanında 1 hafta 604800 saniye olarak ele alınır ve artık saniyelerin düzeltilmesi gibi çeşitli düzenlemeleri vardır.

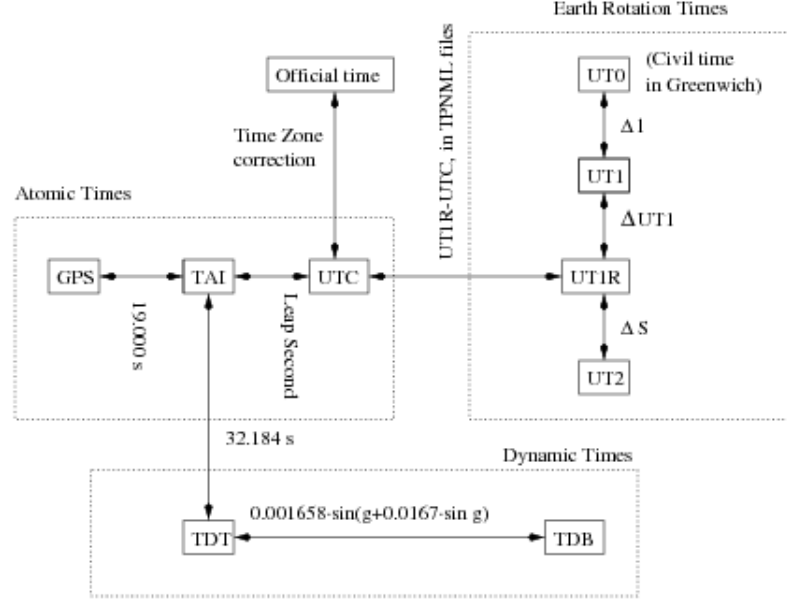
LNAV/CNAV verileri, GPS saatini UTC ile ilişkilendirmek için gerekli verileri içerir. Verileri iletim aralığı sırasında bu verilerin doğruluğu, GPS zamanını UTC ile 20 nanosaniyelik bir zaman aralığı içinde ilişkilendirecek şekilde olmalıdır. Bu veriler Kontrol Merkezi tarafından oluşturulur; bu nedenle, herhangi bir nedenle Kontrol Merkezi bir GPS uydusuna veri yükleyemezse, bu ilişkinin doğruluğu garanti edilemez.

Bu noktada, alternatif UTC kaynaklarının artık mevcut olmadığı ve GPS/UTC ilişkisinin göreceli doğruluğunun kullanıcılar için yeterli olacağı varsayılmaktadır. Menzil hatası, Yayılım gecikme hataları ve kullanıcıya özgü alıcı ekipman hataları bu zaman aktarımı belirsizliğine eklenir.



Şekil 10 : Timepulse ve Seri data yapısı [17]

Şekil 10'da gösterildiği gibi GPS'den alınan mesaj setleri üzerinden de zaman doğrulaması, süzülmesi ve güncellemesi yapılabilmektedir. Bu doğrultuda NAV-TP, NAV-PVT, TACC, TP Qerr gibi datalar üzerinden zaman hakkında yazılımsal olarak bilgi edinilmekte ve buradan hesaplama hataları hesaplanmaktadır.



Şekil 11 : Zaman İlişkileri [15]

3.2.6. GNSS/GPS Sistemlerinde Zaman Kayıklıkları

GPS uydularından alınan sinyalin zamanı ile alıcının sinyali aldığı zaman arasında fark vardır. Bu durum uydu sistemlerinden gönderilen sinyaldeki zaman, GPS zamanı ve alıcının bulunduğu zaman değerlerinin birbirinden farklı olmasındandır. Bu fark kayma olarak ele alınmaktadır ve nedeni uydulardaki saat bilgisi ile GPS alıcılardaki saat bilgisi arasında mükemmel senkronizasyon olmamasındandır.

Günümüzde uydudan gelen saat hataları dünyadaki uydu kontrol bölümü tarafından sürekli izlenmekte ve efemeris saat düzeltmelerini günlük olarak navigasyon mesajının bir bölümü olarak yüklemektedir. Önemli olan uydu-alıcı uzaklığının hesaplanmasındaki toplam hatayı azaltmak, bunun için uydu saati ile GPS zamanı arasında yaklaşık 30 nanosaniyelik senkronizasyonu sağlamaktır.

GPS alıcılar genel konsept olarak aldıkları sinyaller içerisindeki taşıyıcı dalga izleme düğümünü kontrol eder ve sonrasında bu kontrole göre gelen sinyal ile alıcı tarafından önceden alınıp kaydedilen sinyalin arasındaki frekans kayıklığı tespit eder.

Tespit edilen faz farkı uydu ve gözlemcinin birbirine göre hareketinin neden olduğu doppler etkisi nedeniyle doğal olarak nominal L1 ve L2 frekanslarından farklı olacaktır.

Yani, sinyal yayan kaynak (uydular) ile gözlemcinin (alıcı) birbirine göre göreceli hareketli olması durumundan dolayı, alıcı tarafından kaydedilen sinyal doppler etkisi nedeniyle kayık olacaktır [6].

Gözlenen zaman kayması ise iki saat arasındaki uyuşmazlığı göstermektedir. Dolayısıyla, uydu ile alıcı arasında oluşan zaman kayması yalnızca sinyalin uydudan alıcıya geçiş süresini içermekle kalmaz, aynı zamanda saat hatalarını ve diğer hataları da içerir [19]. Aslında, uydu saatleri ve alıcı saatleri, dikkatlice kontrol edilen GPS zamanına karşı kontrol edildiğinde, biraz sürüklendikleri görülür. Bu sürüklenme durumu saat osilatörlerinin ideal durumda olmaması ve genel etkilerin kümülatif şekilde zaman sinyaline etkimesinden kaynaklanmasındandır. Yani osilatörler ideal değildir. Bu durum GPS zamanını belirlemek için kullanılan istasyonlarda ve diğer birimlerdeki atomik saatler kadar kararlı olmamaları nedeniyledir. Sıcaklık, titreşim, radyasyon ve diğer istikrarsızlaştırıcı etkilere maruz kalırlar.

Örneğin, 2 ppm hata oranına sahip bir gps sinyali, zaman içerisinde 1.000.000 saniyede 2 saniyeye eşit bir ölçüm hatasına işaret eder. Bir günde 86400 saniye olduğuna göre bu hata durumu yaklaşık olarak her 11,5 günde 2 saniye yanlış olmaktadır. Bu zamansal yanlış ise nanosaniye hızında çalışan sistemlerde büyük bir soruna yol açmaktadır. Uydu sinyalinin temelindeki kod gözlemleri ile anında zaman belirleme amacı için bazı sistemlere yeterli doğruluk sağlanmakta ve pratik olarak büyük önem taşımaktadır. Ancak, mühendislik hizmetleri için çok daha duyarlı sonuçlara gereksinim vardır. Bu amaç için alıcıya gelen uydu sinyalindeki faz hareketlilik gözlemleri kullanılmaktadır.

Saat sapmaları bazında birçok etkenin mevcut olması sebebiyle PRN kodlar ile offset çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalar, saat sapmaları, atmosferik etkiler, alıcı/gönderici uyumsuzlukları, lokasyon değişikliği ve birçok etkenin oluşturduğu

bozucu olaylardan arınmak amacıyla yapılmaktadır. Bu doğrultuda PRN kod offset denklemi (2.4) kusurlu durumları düzeltmek amacıyla kullanılmaktadır.

$$p = \rho + d_p + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_{mp} + \epsilon_p \quad (2.4)$$

p = Pseudo mesafe ölçümü

ρ = Gerçek Mesafe

d_p = Uydu yörünge hatası

c = Işık hızı

dt = GPS zamanında Uydu saat farkı

dT = GPS zamanından alıcı saat farkı

d_{ion} = İyonosferik gecikme

d_{trop} = Troposferik gecikme

ϵ_{mp} = Dağılım

ϵ_p = Alıcı gürültüsü

Işığın hızı boşlukta sabittir, ancak yayılma gecikmesi, atmosferik gecikmeler, sinyallerin çoklu yollara dağılımı ve kusurlu osilatörler nedeniyle, GPS zamanından uydu saat ofset değeri ve GPS zamanından alıcı saat ofset değerleri de bu denklem içerisinde yerini almaktadır. Tüm bu çalışmalar ve hesaplamalar her ne kadar bütün faktörleri içerse de yine de GPS saatinde ve alıcıdaki kaymaların veya saat kaçıklıklarının artma veya değişikliklerini tam anlamıyla sıfırlanamamaktadır. Bu nedenle de mesafe üzrinden zaman hesaplamalarındaki hatalar da tam olarak giderilememektedir.

3.2.7. Hata Düzeltme Çalışmaları ve Senkronizasyon

Uydu ile alıcı arasındaki temel sorun senkronize bir yapıdan uzak olması ve bunu doğuran etmenlerin birbirinden farklı olmasıdır. Temel amaç hassas olarak lokasyon bulmak olsa da bu amacın haricinde farklı bir boyut olan ve herşeyin temelinde yatan kavramın zaman olduğu önceki bölümlerde ifade edilmişti. Bu açıdan bakıldığında çeşitli düzeltme ve senkronizasyon yöntemleri oluşturulmuştur.

Şekil 12'de gösterildiği gibi sinyal tabanlı, Inter Range Instrumentation Group (IRIG) tabanlı, IEEE-1588 tabanlı, NTP tabanlı, TCP/IP tabanlı birçok protokol senkronizasyon ihtiyacı nedeniyle oluşturulmuştur. Bu doğrultuda dünya üzerinde her noktayı en iyi şekilde kapsama ve gerekli iletişim hızı ile senkronizasyon alt yapısını güçlendirme kabiliyeti gelişen teknoloji ile GPS'e dayalı çözümler olmaktadır.

Öncelikle GPS alıcıların aldığı sinyalleri anlamlandırıp kullanıma uygun datalar haline getirmesi ve doğru paketleme ile farklı birimlere bu bilgileri iletmesi gibi çalışmalar bir gecikmeye sebep olması sebebiyle senkronizasyon sorununa yol açmaktadır.

Senkronizasyon uyumsuzlukları nedeniyle beklenen dataların gelmemesi ve gecikme nedeniyle işleme alınabilir zaman dışında kalmasından dolayı sistemin bir sonraki işleme devam edememesi gibi sayısız olumsuz etkilere sebep olmaktadır.

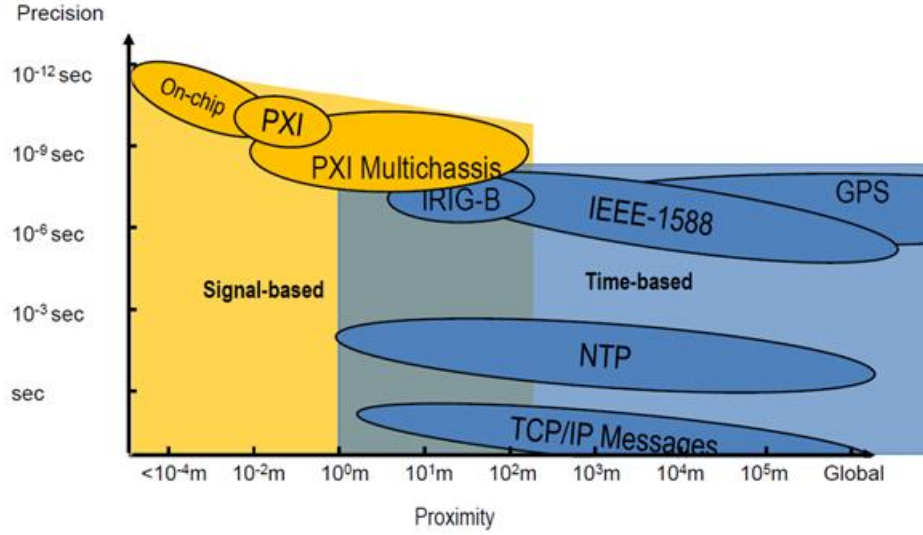
GPS almaçları kendi içlerinde çeşitli düzeltmeler yapsa dahi, o düzeltmeler yalnızca o an için doğru olduğundan zamanla yine hata oluşumu tekrardan başlayacaktır. Bu bağlam da yakın bir uyduyu ve GPS istasyonlarını referans alarak düzeltme ve senkronizasyon çalışmaları oluşturulmuştur. Ancak bu yapı uzak mesafe data iletimi veya haberleşme sistemlerindeki zaman uyumsuzluklarını yine tam olarak giderememiş ve gecikmeler devam etmiştir.

Basitçe çeşitli senkronizasyona dayalı sistemlerin durumu aşağıda belirtilmiştir.

- Sinyal tabanlı senkronizasyon, senkronize edilmesi gereken noktalar veya uçtan uca sistemler arasında çeşitli protokollerde zaman sinyallerinin doğrudan (kablolar aracılığıyla) iletilmesini kapsar.

- Zamana dayalı senkronizasyon, uçtan uca veya birbirine zaman kaynağı ihtiyacı nedeniyle ortak bir noktadan bağlı veya kendi bireysel saatlerini bir zaman kaynağına veya zaman referansına göre bağımsız olarak senkronize edilmesi durumu ifade eder.

IEEE 1588 standardı ile NTP gibi yaygın bir protokolün yetersiz kaldığı alanlarda, yüksek doğruluk gerektiren ancak bu doğruluğun NTP ile sağlanamadığı sistemler için tasarlanmıştır [20]. Ancak IEEE 1588 standart yapısı da, saat dağıtımı için hiyerarşik bir sunucu-istemci mimarisi ihtiyacı ile senkronizasyonda hızlı çözümler üretse de çeşitli sorunları da beraberinde getirmektedir (Şekil 12).



Şekil 12 : Senkronizasyon Teknolojileri [21]

NTP Zamanlama ve Senkronizasyonu, GPS sistemini başka bir sistem veya yapıda bir zaman referansı olarak kullanmak için, bir GPS saat sunucusu gereklidir. Bu cihazlar, GPS anteni vasıtasıyla gelen GPS zaman sinyalini dağıtmak için genellikle zaman protokolü NTP'ye (Ağ Zaman Protokolü) dayanır. NTP yazılımı ile GPS anteniyle zaman sinyali alınarak bunu zaman senkronizasyon sunucusu aracılığıyla, güvenilir bir zaman senkronizasyonu sağlanarak için referans olarak kullanır.

Data format yapıları düzenlemesi ile uygulanan yöntemler de zaman senkronizasyonu ve data senkronizasyonun sorunlarını çözmekte epey faydalı olmuşlardır. GNSS verisinin zamana göre değişimi ve bu değişimden dolayı etkilenmelerinin en aza indirilmesi için geliştirilmiş 2 temel standart kullanılmaktadır. Bunlardan ilki özellikle diferansiyel konumlamada ölçüm sonrası değerlendirme çalışmaları ile veri arşivleme için geliştirilmiş olan, gerçek zamanlı veri iletimi için uygun olmayan RINEX (Receiver INdependent EXchange)

formatıdır. İkincisi ise gerçek zamanlı uygulamalar için geliştirilmiş olan RTCM formatıdır. Bu standartların dışında gerçek zamanlı uygulamalar için GPS/GNSS alıcıları ile diğer cihazlar arasında veri iletimi için NMEA formatı kullanılmaktadır.

Özellikle farklı marka ve modeldeki alıcılardan oluşabilen GNSS/CORS ağlarının birlikte çalışması ve entegrasyonu ile bu ağlardan mobil kullanıcılara (gezici alıcılara) iletilen gerçek zamanlı verilerin bir protokol ve veri formatında gönderilmesi, kullanıcılar tarafından da bunların kabul edilebilir olması gerekmektedir. Bu nedenle uluslararası bir standart olarak geliştiren RTCM, başta DGNSS olmak üzere günümüzde RTK uygulamalarında etkin olarak kullanılan bir veri formatıdır [22].

Sonuç olarak bahsi geçen konular çerçevesinde ifade edilen tüm metodlar uydu ile yeryüzündeki sistemlerin arasındaki düzeltme ihtiyaçlarını belirli sınırlar içerisinde gidermeye yönelik oluşturulmuştur. Fakat bu oluşum içerisinde uydulardaki saat sinyalini oluşturan ve buradan tüm uydu takım ekosistemini etkileyen temel ünite olan uydunun içerisindeki yüksek hassasiyet ve doğruluklu osilatör biriminin ele alınması ihtiyacı doğmuştur.

3.3. Osilatör Karakterizasyonu

Osilatörler, stabil durumlarını koruyabilen ve sabit bir aralıkta salınım yaparak sinyal oluşmasını sağlayan bir elektronik devre veya cihazdır. Osilatörler, periyodik elektronik sinyaller üretmek için kullanılır [23].

Osilatörlerin temel çalışma mekanizması bir uyarılma sonucu veya üretim maddesinin doğal salınımlarının bir sinyal olarak elde edilmesi yöntemine dayanmaktadır. Bu doğrultuda osilatörü genel yapısını belirleyen bazı parametreler özelinde ele almak gerekmektedir.

Nominal Frekans : Osilatör üreticisi tarafından belirlenen osilatör tipi ve çıkış aralığına göre belirtilen çıkış frekansıdır (Örnek: 10MHz).

Doğruluk ve Kararlılık : Doğruluk, gerçek değerden ne kadar uzakta olduğunu gösteren bir ölçektir. Kararlılık, belirli bir süre boyunca doğruluktaki değişim ölçөгüdür. Genel olarak, bu ölçekler, nominal frekansın değerine göre ppm (parts per million): 10^{-6} veya ppb (parts per billion): 10^{-9} birimi cinsinden ifade edilir.

Frekans doğruluğu : Nominal frekans ile gerçek frekans arasındaki farkın nominal frekansa oranıdır. Aşağıdaki formül, frekans doğruluğunu hesaplamak için kullanılır.

Frekans doğruluğu = $(F-F_s) / F_s$, F_s : Nominal frekans, F : Gerçek frekans
Örneğin, nominal frekans 10.000.000Hz (10MHz) ve gerçek frekans 10.000.001Hz ise

Frekans doğruluğu = $(10000001-10^6) / 10^6 = 1 \times 10^{-7} = 0.1 \text{ppm} = 100 \text{ppb}$ 'dir.

Tutarlılık : İlk gönderilen sinyal ile daha sonraki gönderilen sinyaller arasında kayma, salınma, gecikme vb durumların olup olmasını baz alan parametredir.

Örneğin 10MHz frekansa sahip bir 1PPS'lik saat darbesi ile sonraki 1 Pulse Per Second darbesi arasındaki referans frekans dalgasının döngü sayısı sürekli olarak 10.000.000 (10M) ise, bu, saat darbesinin (1PPS) ve referans frekansının uyumlu olduğu anlamına gelir. Doğal olarak bu uyum zaman saati frekansı üreten osilatörün tutarlılığını ifade eden bir çalışma olur.

Bununla birlikte, frekanstaki bu değışiklik sadece birkaç PPM olsa da uydu, aviyonik gibi kesin frekans gereksinimleri olan sistemlerde çok önemli olabilir. Buna karşılık, kısa vadeli kararsızlıklar doğası gereği rastgele ve genellikle gürültü olarak adlandırılabilir.

Yaşlanma : Osilatördeki dahili değışiklikler nedeniyle uzun süre gözlenen frekansta sistematik bir değışiktir. Genelde osilatörde yapısal olarak atomik kütle transferi, kristal üzerindeki gerilim, termal genleşme, montaj kuvveti, bağlama elemanları ve kristalin uyarılma seviyesi gibi yaşlanmaya yol açan birçok faktör vardır.

Örneğin, bir uzay aracındaki bir osilatörün sürüklenmesi radyasyon, uzay aracındaki sıcaklık değişiklikleri ve güç kaynağı değişikliklerinden kaynaklanıyor olabilir.

Kısa süreli gürültü : Osilatörün sisteminde, rastgele gürültü veya titreme gürültüsü nedeniyle, sinyal frekansında değişme neden olan durumudur.

Isıl istikrarsızlık : Bir kristalin rezonans frekansındaki değişim, sıcaklık değiştikçe, nominal frekanstan farklılaşma başlar ve birkaç on ppm'ye kadar çıkabilir. Bu nedenle, bu tür uygulamalar için sistemde ek bir dengeleme elemanı gereklidir.

Ayarlanabilir istikrarsızlıklar : Bir osilatörün geniş bir frekans aralığında ayarlanabilmesi kararsızlıklara neden olabilir. Ayarlanabilirliği sağlamak için, istenmeyen frekans modlarını reddetmek için filtreler kullanılır, ancak bu ayarlanabilir osilatörlerin daha yüksek frekans kararlılığına ulaşmasını zorlaştırır. Çünkü yük reaktansı filtrelerde kullanılan varaktörlerin kaçak kapasitans ve endüktansından etkilenir.

Q faktörü : Rezonatörde depolanan enerjinin kaybedilen enerjiye olan oranını ifade eder. Yüksek Q'ya sahip olmanın avantajlarından bazıları şunlardır:

- Daha yüksek Q ile faz gürültüsü daha düşük olacaktır çünkü faz gürültüsü kristalin Q'suna güçlü bir bağımlılığa sahiptir. Bu, daha iyi frekans kararlılığı ile sonuçlanacaktır.
- Daha dar bant genişliği, daha yüksek Q'nun bir başka avantajıdır.
- Q, uyarmanın azalması için geçen süre ile orantılıdır.

Böylece, daha yüksek bir Q bozunma süresini artıracaktır. Döngü kazancı ile birlikte bozulma süresi, kristal başlatma süresinin azaltılmasına yardımcı olur.

3.4. Osilatör Çeşitleri

Osilatörler bazında kullanım amacı, boyut, kullanım alanları ve maliyet gibi etkenler mevcuttur. Bunlar haricinde osilatörün titreşim periyotları ve kararlılığı en önemli parametresini oluşturmaktadır. Bu kısımda osilatör çeşitleri anlatılacaktır.

3.4.1. Kristal Osilatörler

Yüksek hassasiyet ve doğruluk elde etmek için kullanılan telafi tekniklerine bağlı olarak, kristaller başka alt kategorilere ayrılabilir. En yaygın kullanılan kristal osilatör tipleri şunlardır:

- Dengelenmemiş kristal osilatör - XO
- Voltaj kontrollü kristal osilatör - VCXO
- Sıcaklık kontrollü kristal osilatör - TCXO
- Fırın kontrollü kristal osilatör - OCXO

3.4.2. Rubidyum Osilatör

Rubidyum atomlarının özelliklerini kullanarak çok doğru ve kararlı bir frekans çıkışı oluşturur. Bu osilatör, doğası gereği kristal osilatörlere göre çok daha doğrudur ve bazı durumlarda harici bir referansa ihtiyaç duymadan kararlı şekilde çalışmaktadır. Uzun vadeli olarak rubidyum atomlarından oluşturulan osilatörün kararlılık durumu kuvars kristal osilatörlerden önemli ölçüde daha iyidir. Fakat tipik olarak faz gürültüsü bazında (yani, 1 kHz ve daha büyük frekans kaymalarında) bir OCXO kadar iyi değildir. Bu nedenle bir OCXO modülü veya birimi Rubidyum osilatör çıkışına faz kilitlenebilir şekilde bir yapı ile entegre edildiğinde ideale yakın şekilde bir frekans çıkışı sağlayacaktır.

3.4.3. Maser Osilatör

Maser osilatörler uyarılmış bir atom veya molekül kaynağı gerektirir ve bu uyarılma sonucunda çok kararlı bir frekans sinyali oluşturur. Hem küçük hem de sinyalin gürültüsüz olarak alınması için mükemmel bir osilatör kaynağıdır.

3.4.5 Sezyum Osilatör

Sezyum atomu çok yüksek hassasiyet ve kararlılıktadır. Vakumlama yöntemi veya belirli ışınlarla etkinleştirilerek çok kararlı bir yapıda sinyal çıkışı sağlayan osilatördür.

3.5. Genel Osilatör Karşılaştırması

Frekans kaynakları, basit XO'dan sezyum atomunun sağladığı doğal frekans standardına kadar çeşitli kalite derecelerinde bir sinyal üretimi sağlar [37]. Osilatörlerde doğruluk, kararlılık ve hassasiyet arttıkça güç gereksinimi, boyut ve maliyet de artar (Tablo 2).

Frekans kararlılık aralığı her bir osilatör tipi için ayrı ancak birbirine yakın özellikler göstermektedir. Ancak bu yapılar içerisinde de sistemi ve sinyalleri etkileyen birbirinden farklı etkiler vardır. Bunlar temel olarak White Phase Noise, Flicker Noise, Random and Uncorrelated Frequency Noise ve Random Walk Noise [26].

Tablo 2 : Frekans standartlarının göze çarpan özelliklerinin karşılaştırılması [25]

	Kvartz Osilatör			Atomik Osillatör		
	TCXO	MCXO	OCXO	Rubidium	RbXO	Cesium
Doğruluk (bir yıl)	2×10^{-6}	5×10^{-8}	1×10^{-8}	5×10^{-10}	7×10^{-10}	2×10^{-11}
Yaşlanma (yıl)	5×10^{-7}	2×10^{-8}	6×10^{-9}	2×10^{-10}	2×10^{-10}	0
Isıl Kararlılık (derece °)	5×10^{-7}	2×10^{-8}	1×10^{-9}	3×10^{-10}	5×10^{-10}	2×10^{-11}
Doğruluk ($\tau = 1$)	1×10^{-9}	2×10^{-8}	2×10^{-12}	3×10^{-11}	5×10^{-12}	5×10^{-11}

Isınma Zamanı (dakika)	0.1	0.1	4	3	3	20
Güç (W)	0.05	0.04	0.25 - 4	20	0.35	30

Osilatör teknolojisinin tek bir "doğru tip osilatör kaynağı" seçimi yoktur ve bir uygulama için uygun bir teknoloji seçerken bir dizi faktör dikkate alınmaktadır. Genel olarak, zaman ve zamanlama uygulamaları için bir TCXO yeterli performans sağlayacaktır ve hassas frekans uygulamaları için bir OCXO iyi bir çözüm olacaktır.

4. GPS KONTROLLÜ SAAT

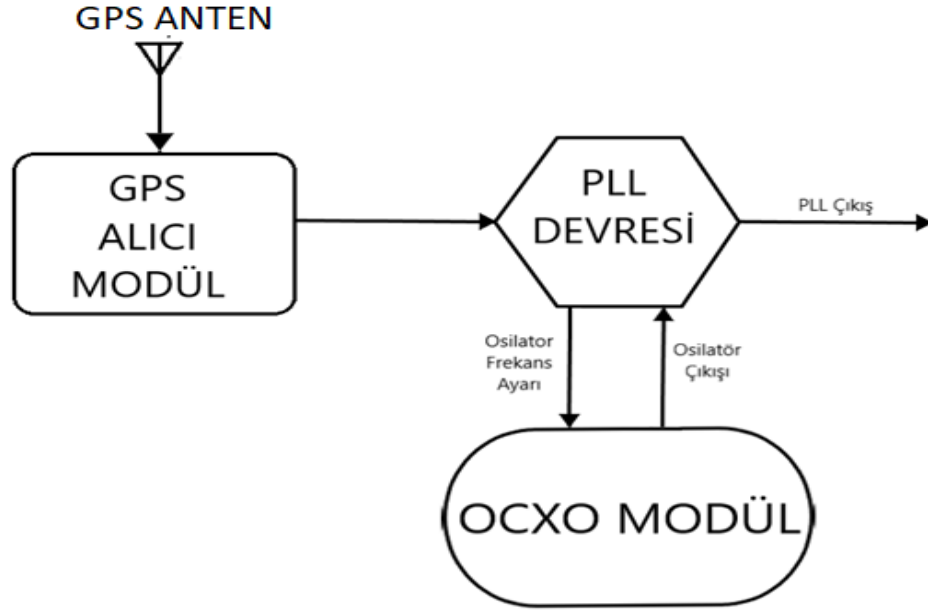
GPS alıcılarının referans zamanlama devrelerinin çözünürlüğünün sınırlıdır. Bunun haricinde devreye gelen girişim sinyallerinin etkileri, atmosferik koşullar ve diğer bozucu etkenler zamanlama devrelerinin çıkışındaki sinyalde sapma ve kümülatif olarak zamansal hata artışına sebep olurlar.

Fakat farklı özellikte iç osilatöre sahip GPS alıcı sistemleri (örneğin OCXO'e sahip sistemler) daha uzun zaman kararlı hallerini koruyabilirler. Ancak bunların da çalışma süreleri boyunca ısı ve genel yorgunluklar nedeniyle kararlılığı sınırlıdır. Bu nedenlerden dolayı iki hassas sistemin bir araya getirilmesiyle GPS kontrollü osilatör (GPS Disciplined Oscillator-GPSDO) yapıları oluşturulmuştur.

GPSDO yapıları uydu alıcının uydudan aldığı hasas zaman sinyalini temel alarak, ikinci bir osilatör sistemindeki üretilen sinyalin uydudan alınan sinyale eşgüdümlü şekilde çalıştırılması ve uydu içerisindeki atomik zaman saati hassaslığına yakın bir netlikte yeni bir sinyal oluşturmasını mümkün kılar. Sistemler ve birimler arasındaki zamansal sorunları, senkronizasyon uyumsuzlukları, frekans kaymaları, yavaşlık, gecikme etkileri gibi sorunlardan arınmış yeni bir referans zaman saati sistemi oluşturulur.

Bir GPSDO, yüksek kararlılık ve doğruluk özelliklerine sahip bir referans kaynağını kullanıcıya sunmak için mimari olarak: OCXO veya TCXO gibi osilatörlerin kısa vadeli kararlılık performansını GPS sinyallerinin uzun vadeli kararlılığı ile birleştirerek her iki kaynaktan en iyi şekilde yararlanmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmadaki ele alınan sistem Şekil 13'de gösterildiği üzere GPS kontrollü osilatör (GPSDO), GPS alıcısı ve PLL devresi ile oluşturulan yüksek kaliteli ve kararlı bir çıkış veren yapıdır. GPSDO'lar bir zamanlama kaynağı olarak iyi çalışır çünkü navigasyonda GPS için konumsal doğruluk sağlamak için uydu zaman sinyallerinin doğru olması gerekir. Bu sinyaller nanosaniye mertebesinde doğrudur ve zamanlama uygulamaları için iyi bir referans sağlar [28].



Şekil 13 : GPS Kontrollü Osilatör Yapısı

Çalışma kapsamında PLL yapıları bazında birçok seçenek ve yapı incelenmiştir. Bu doğrultuda analog, dijital ve hibrit olmak üzere çeşitli mimariler oluşturulmuştur. Mimarilerin oluşturulma kapsamı bazında özellikle kilitleme merkez frekansı temel alınmaktadır.

PLL yapısında frekans aralığı Hz~GHz seviyesindedir. Öncelikle PLL mantığında kilitleme noktası olarak sinyallerin yükselen kenar noktaları, düşen kenar noktaları, merkez noktası veya tasarımcı tarafından seçilen bir nokta çerçevesinde işlemler yapılmaktadır.

Bu doğrultuda sinyallerin kilitleme optimizasyon yapıları oluşturulmaktadır. Ancak tasarımda ve mimari seçimlerinde en kritik noktalardan biri ise kilitleme işleminde mimarinin sinyal üzerindeki geciktirici etkisidir. Bu kısımda iki veya daha fazla sinyalin başka bir sinyale kilitlemesi sonrasında mimarinin diğer sinyalleri referans sinyalle optimizasyonu için yapılan işlemlerde geçen süre çıkışa gecikme olarak yansımaktadır.

GPS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon çalışması kapsamında PLL devresi, sabit ve ayarlanabilir OCXO osilatör devresi, GPS alıcı modül ve devrelerin

besleme devreleri olarak farklı şekilde birçok birimi barındırmaktadır. Her bir birim birbiriyle aynı besleme hattını kullanarak gerilim farklılıklarının oluşmasını engellemektedir. Bu doğrultuda tüm yapı blokları sırasıyla anlatılacaktır.

4.1. Fırın Kontrollü Kristal Osilatör (OCXO)

OCXO'lar çok yüksek derecede frekans kararlılığı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bazen bu osilatörler, sıcaklık stabilize kristal osilatörler veya basitçe kristal fırınlar olarak da adlandırılabilir. Fırın Kontrollü Kristal Osilatörler (OCXO'lar), ± 1 ppb'den daha düşük stabiliteyle üst düzeyde piezo elektrik performans sunar.

Sıcaklık kayması nedeniyle kuvars kristalinin frekans kayması, kristalin bir fırında ısıtılması ve böylece kuvarsın sıcaklığının sabit bir noktada tutulmasıyla azaltılır. Geleneksel olarak bu teknoloji, yüksek güç tüketimine sahip fiziksel olarak büyük cihazlar anlamına geliyordu, ancak daha günümüzde küçük modüller olarak bulunabilmektedir. Kristal osilatörler, dış sıcaklık önemli bir aralıkta değiştiğinde bile yüksek derecede stabilite gösterirken, bazı uygulamalar daha yüksek seviyelerde sıcaklık kararlılığı gerektirir. Bu uygulamalarda OCXO'lar gerekli çözümü sağlamaktadır.

Kristal hammaddesi üzerinden oluşturulan osilatörü, termostatik olarak kontrol edilen bir ısıtıcıya sahip termal olarak yalıtılmış bir kaba yerleştirmek daha da iyi bir istikrar derecesi elde edilmesini sağlamaktadır.

Kristal osilatörü elektronik ekipman içinde normal olarak karşılaşılan sıcaklığın üzerinde bir sıcaklığa ısıtmak suretiyle, kristal osilatörün sıcaklığı sabit bir sıcaklıkta tutulmalıdır. Bu sayede, çok daha yüksek derecede bir sıcaklık kararlılığı ile daha kararlı bir çıkışa sahip osilatör elde edilmesiyle sonuçlanır.

Bir kristal fırının iç sıcaklığı yaklaşık 75 °C'de çalıştırılır. Bu referansın karşılaşılabilecek en yüksek sıcaklığın üzerinde olmaması gerekir, aksi takdirde sıcaklık kontrolü çalışmayacaktır. Bir OCXO için tipik özellik, derece başına $\pm 5 \times 10^{-8}$ (0,05 ppm) olabilir. Öte yandan, fırın kontrollü olmayan bir osilatör 10 ila

100 kat daha zayıf olabilir. Bunun yanında diğere bir önemli durum olan sinyal titremesi veya sapması da bu tür osilatörlerde minimum derece olmaktadır.

OCXO'lar fiziksel olarak basit bir kristal osilatörden çok daha büyüktür. Bunun nedeni:

- Bir ısıtıcı içerir
- Kontrol devresi içerir
- Kristal osilatörün etrafındaki ısı yalıtımı

Tipik olarak, ısıtıcı osilatörle farklı bir kaynaktan çalışacaktır. OCXO'nun ısıtıcısının kaynağı normal osilatörlerden biraz daha fazla akıma ihtiyacı vardır. Bazı üniteler, ısınma sırasında bir yükselteç veya farklı bir mimari yapı gerektirebilir. Bu nedenle kalın metal veya ısıyı içeride tutan malzemelerden yapılan bir kapalı bloktan oluşur. Biraz önce bahsedildiği gibi osilatör bloğu içerisindeki ısıtıcıya verilen akım değeri, OCXO içindeki sıcaklık arttıkça ve daha az ısıya ihtiyaç duyulduğunda bu rakam azalacaktır. Dolayısıyla osilatör bloğu içerisindeki sıcaklık termostatik olarak kontrol edilir.

4.2. GPS Sinyaline Kenetlenmiş Sinyal Oluşumu

Uydu sinyalleri her ne kadar bozunuma uğrasada çeşitli yöntemler ile GPS sinyalleri yüksek doğrulukta elde edilmektedir. Fakat zamansal veya faz kaymaları/sapmaları yine de sinyali etkilemektedir.

Faz kayması veya frekansın değişimi izleyerek ve bunu referans alarak yeniden bir sinyal üretilme sürecine GPS sinyaline kenetlenmiş/kilitlenmiş yeni sinyal oluşturma adı verilir. Bu işlem GPS sinyali ve frekans sinyal jeneratörü ile bu iki sinyal kaynağını birbirine eşgüdümlü şekilde ayarlamasını sağlayan faz kilitlemeli döngü devresi (PLL) ile gerçekleştirilir.

PLL Voltaj kontrollü osilatörün (VCO) çıkış frekansının güvenilir bir osilatör frekansı ile karşılaştırılarak VCO çıkış frekansının stabil kalmasını sağlayan bir geri besleme sistemidir. Bu işlem, VCO frekansını doğrudan veya dolaylı olarak frekans referansına kilitlemeye yönlendirerek gerçekleştirilir.

Bir PLL 'nin çalışması üç ayrı durumda incelenebilir; Giriş işareti uygulamadan önce; VCO "serbest çalışma" modundadır. Bir giriş uygulandığında VCO frekansı değişmeye başlar ve PLL "yakalama" moduna geçer. Faz dedektörünün girişlerindeki iki işaretin frekansları eşit olduğunda, PLL faz kilitlemeli moda çalışır. Kilitleme bölgesi, genelde giriş ve besleme voltajlarıyla değişir. Kilitleme bölgesinin merkez frekansı; VCO 'nun serbest çalışma frekansıyla belirlenir.

4.3. Uydu Sinyali Alıcı Modülü

U-BLOX NEO-M8 serisi GNSS modülü (Şekil 14), üç adede kadar GNSS sisteminin (BeiDou veya GLONASS ile birlikte GPS/Galileo) eşzamanlı data alımını baz alarak ortak bir metodoloji kullanır. Aynı anda birden fazla uydu takımını tanır ve zayıf sinyallerin olduğu durumlarda yüksek konumlandırma doğruluğu sağlar. U-BLOX NEO-M8 serisi, WAAS, EGNOS ve MSAS ile birlikte QZSS, GAGAN uydu takımlarından alınan mesajları da destekler.



Şekil 14 : U-BLOX M8N GPS Modülü ve Anteni [29]

U-BLOX M8N modülü, hassas konumlama ve uydu zaman saati referans bilgisine duyarlı uygulamalar için optimize edilmiştir. Özellikle zamanlama ve senkronizasyon uygulamaları için tasarlanmış olması tez çalışmasında önemli kolaylıklar ve avantajlar sağlamaktadır.

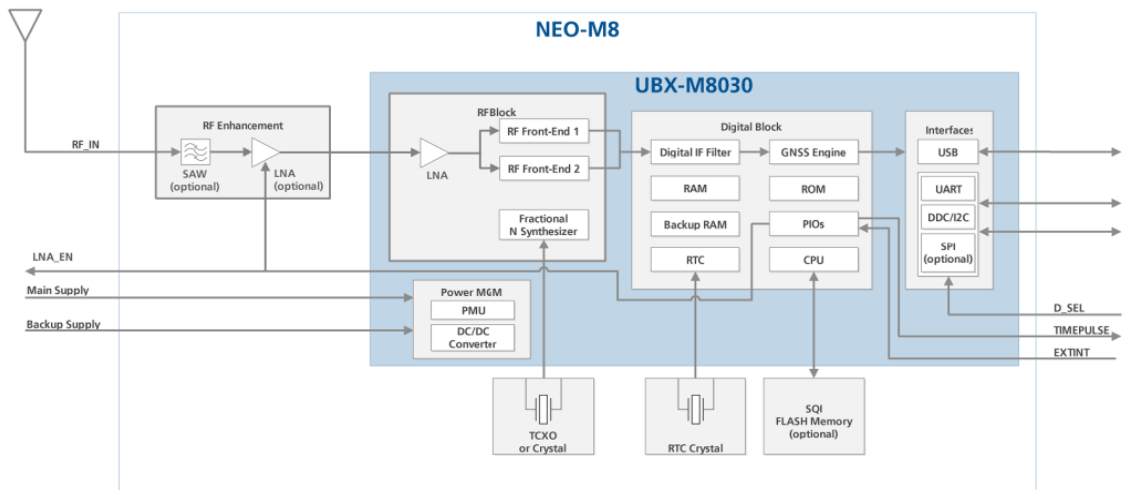
RF optimizasyonu için U-BLOX, NEO-M8N modülünde kolay anten entegrasyonu için ek bir LNA bulunur (Şekil 15). Bu da anten kaynaklı zayıflıklar ve diğer istenmeyen girişimlerin engellenmesini sağlamaktadır.

U-BLOX M8N Modülü minimal ve tümleşik tasarımı elektronik devre tasarım sürecinde önemli derecede zaman kazandırması ve tüm standartlara uygun bir modül olması sebebiyle askeri sistemlerden son kullanıcı olan tüketicilere kadar birçok alanda kullanılmaktadır.

Elektronik devre tasarımı ve projelendirilmesinde kolay kütüphane seçeneği sayesinde tasarımcıya kolay çözümler sunmaktadır. ALTIUM, EAGLE, PROTEUS, CADENCE gibi elektronik devre tasarımı platformlarında da desteklenmektedir.

Uydulardan edinilen bilgi/sinyal durumuna göre oluşturulan 1 Hz'lik PPS (Pulse Per Second) bilgisi alınmaktadır. Bu 1 Hz PPS bilgisi %50 duty cycle aralığında ve kare sinyal halindedir. Ancak bu 1PPS'ik aralıktaki sinyal PC tabanlı yazılım olan U-CENTER üzerinden ayarlanabilmektedir.

Sinyal karakteristiği modülün özelliği bazında çok hassas bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında referans sinyal olarak kullanılacak bir parametredir.



Şekil 15 : U-BLO M8N Alıcı Modül Blok Şeması [30]

Referans sinyalin kayma/salınım yapması/genlik değişimi gibi durumlar oluşturulacak yeni sinyali de etkilemektedir. Ancak bahsedilen olgular uydu bazlı bir mimariden edinildiği için standart sinyal üretelerinden çok çok daha kararlı bir haldedir.

4.4. CTI OSC-202 10MHz OCXO Modülü

Yüksek doğruluk ve kararlılık özelliklerine sahip olan CTI OSC-202 10 MHz OCXO seçilerek çalışmamız kapsamında sistemimize sabit bir kare dalga sinyal üreteci olan bir modül kullanıldı (Şekil 16).

Sabit sinyal üretetç modülümüz osilatör bloğu, besleme birimi, sinyal bölücü birimi ve geribildirim özelliği barındırmaktadır. Modül +12V DC gerilim ile çalışmakta ve üzerindeki +5V DC gerilim regülatörü ile tüm devre beslemesi yapılmaktadır. Aşağıdaki görselde bulunan RV1 trimpod veya bu trimpod'a bağlı Frequency adjust pin ile çıkış frekansı ayarlanabilmektedir.



Şekil 16 : 10Mhz OCXO Sinyal Üreteç modül [31]

- 1Khz - 10Mhz aralığında sabit çıkış frekansına imkan sağlamaktadır.
- -30°C ile +70°C arasında çalışma sıcaklığı
- +5V ile+12V Dc besleme gerilimi
- Yaklaşık 3 dakika ısınma süresi

- CMOS/TTL çıkış seviyesi
- Rise/Fall time 10ns
- MIL-STD-202 Titreşim ve Mekanik şok standardına uygun
- Hava geçirmez kaplama

4.5. PHASE LOCKED LOOP OPTİMİZASYON YAPILARI

PLL optimizasyon yapıları olarak üç grupta incelenmiştir. Analog, Dijital, Hibrit, Bilgisayar tabanlı PLL simülasyonları ve Simülasyon+Hibrit yapıları günümüzde kullanılmaktadır. Maliyet, çalışma frekansı, boyut, konsept farklılıkları ve gecikme değerleri optimizasyon yapılarının seçiminde temel rol oynamaktadır.

Analog olarak sunulan mimarilerde referans alınacak sinyal ve bu sinyalle aynı salınım veya karakteri sergilemesi gereken ikinci bir sinyalin faz karşılaştırmasına dayanır.

Bu iki sinyal arasındaki faz farkı bir gerilim oluşturur. Oluşturulan bu gerilim ise geri besleme gerilimi olarak ifade edilmektedir. Geri besleme gerilimi ise ikinci sinyalin kaynağına girdi olarak yansiyarak sinyalin fazının veya frekans aralığının artırılıp azaltılarak referans sinyal ile aynı faz değerine sahip olması sağlanmaktadır. Bu doğrultuda en yaygın örnek ev ve araçlarımızdaki radyo alıcılardır. Belirli bir radyo yayınına kilitlebilirler ve sürekli o yayını izlerler.

Dijital yani sayısal sistemlerde ise kilitleme işlemi daha çok matematiksel modellere veya algoritmalar üzerinden yapılmaktadır. Filtre yapıları, kazanç işlemleri, frekans bölücü işlemleri, karşılaştırma ve aritmetik işlem yapılarını barındırmaktadır. Referans ve ikinci sinyal dijital PLL yapılarında sinyallerin tipine göre çeşitli matematiksel çevrimlere tabi tutulurlar.

Bu süreçte filtre, kazanç ve frekans bölücü işlemler öncelikli olarak ele alınmaktadır. Bu işlemlerin işleme alınma periyodu referans ve ikinci sinyallerin periyotlarından çok çok daha kısa sürmektedir. Sayısal sistemlerde yukarıda bahsedilen tüm işlemler gecikmelere, matematiksel yapıların sınır olması dolayısıyla da kilitleme işlemlerinde kararsızlıklara neden olmaktadır.

Özellikle dijital sistemlerde yazılımsal bir kod yapısının çalışması esnasında işleme alınan kod sayısı, aritmetik işlem sayısı, döngü miktarları ve kararsızlık metodolojileri gibi argümanlar kilitlenen sinyalin sistemden çıkışa aktarımındaki süreçte gecikmeler yaratmaktadır. Gecikme süreleri tasarım içeriğine, konsept yapıdaki işlem sayısına ve sistemin iç çalışma saat hızlarına göre de değişiklik göstermektedir.

Hibrit yapılarda ise genelde analog mimarilerdeki olarak faz karşılaştırmacı konsepti ile dijital mimarilerdeki matematiksel kontrol algoritma yapısı birleştirilerek yapılmaktadır. Bu belirtilen konseptler haricinde çeşitli mimari çalışmalarda vardır ancak bu çalışma esnasında genel konsept incelenmiştir. Analog ve dijital yapılardaki en yüksek doğruluk ve en az gecikme istekleri ele alınarak kontrol mekanizmaları tasarlanmaktadır.

İntegral ve türev işlemleri ile yapılan kontrol yapısı kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bunların haricinde bilgisayar tabanlı simülasyon teknikleri sayesinde hibrit sistemler ile bağlantılı durumda iken sisteme giren referans ve ikinci sinyallerin merkez noktalarının bulunarak kilitlenme işlemini sağlamaktadırlar. Yukarıda bahsedilen tüm yapılar ve tasarımlar maliyet, sistemlerin frekans değerleri, boyut ve birçok parametreyi içeren yapılardır. Bununla birlikte çok daha iyi çözümler sunmasına rağmen yine de bir gecikme durumu da barındırmaktadırlar.

Çalışma kapsamında çalışma frekans değeri, en az gecikme süresinin olması ve yazılım gibi ekstra gecikmeler olmaması ve lojik konseptte oluşturulmuş olan CD4046 entegresindeki PLL mimari tercih edilmiştir.

4.5.1. CD4046 ENTEGRESİ

CD4046 entegresi Texas Instruments CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) Micropower Phase Locked Loop olarak üretilmektedir. DC +5V ile +15V aralığında çalışma gerilimi, sıcaklığa bağlı çok düşük frekans kayma oranı ve 1.4MHz'e kadar çalışma aralığı özelliklerini barındırmaktadır. Yüksek çalışma frekansı ve kararlı yapıda tasarımı olan bir mimariye sahiptir.

CD4046 konsept olarak girişine gelen sinyallerin fazlarını karşılaştırır. Daha sonra giriş sinyalleri arasında faz kayması durumunda bunları birbirine senkronize etmek için bir faz dedektörü ile birlikte gelen bir Faz Kilitlemeli Döngü (PLL) entegre devresidir (Şekil 17).

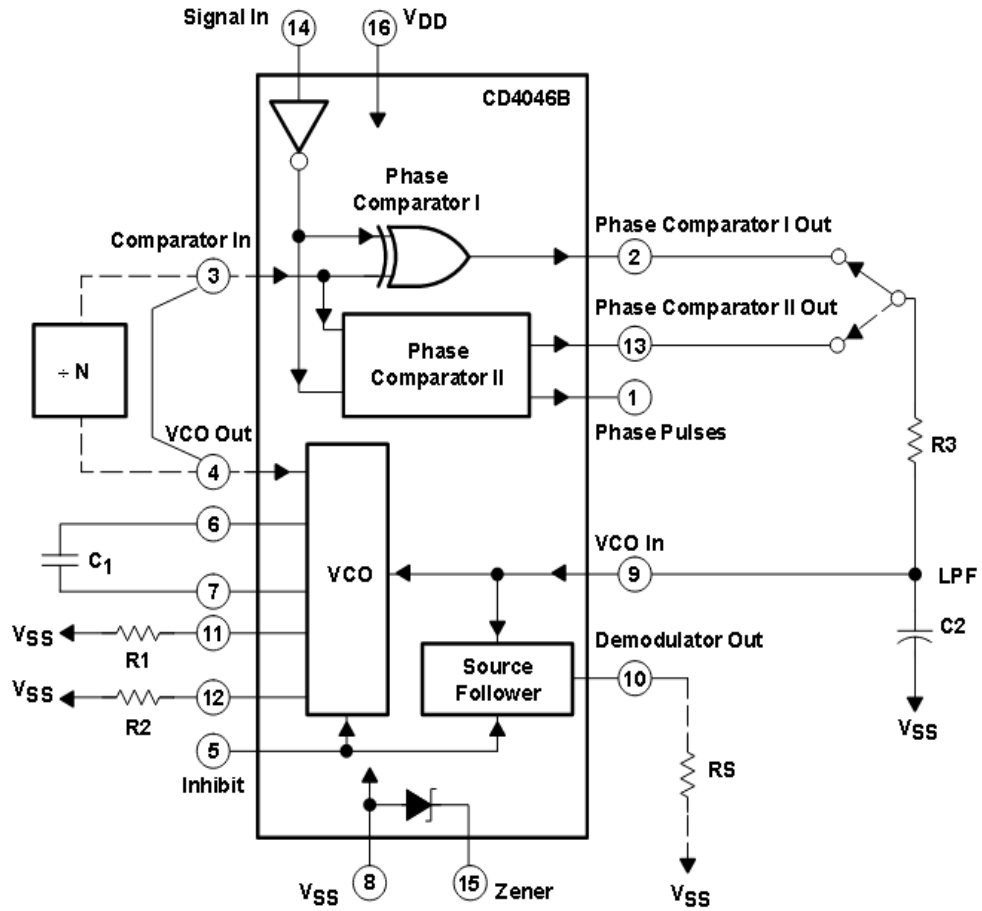
Entegre mimarisindeki yapı da kapı devreleri, voltaj kontrollü osilatör, OPAMP, JK-RS-D Tipi Flip Flop yapıları ve pasif devre elemanlarından oluşmaktadır. Entegre içerisinde, düşük güçlü lineer voltaj kontrollü osilatör (VCO) ve iki farklı faz karşılaştırıcı arasında ortak bir karşılaştırıcı girişi ve ortak bir sinyal girişi amplifikatöründen oluşur.

VCO (Voltaj Kontrollü Osilatör), entegre içerisinde bulunan ve voltaj girişine uygulanan gerilim değerine dayalı olarak frekans üreten yekpare bir birimdir.

XOR lojik yapısı ile oluşturulmuş dedektörlere Tip I veya Faz karşılaştırıcı I adı verilir ve entegre şemasında da görüldüğü üzere Phase Comperator I Out olarak görünmektedir. Bu lojik yapı, sinyaller zıt işaretli olduğunda 1 ve aynı işaretle olduğunda 0 olarak çıkış veren bir dışlayıcı veya (XOR) kapısıdır.

Sinyaller fazdayken (eşfazlı) çıkış 0, antifazdaysa (faz farkı) veya faz farkı π radyansa çıkış sabit yüksek bir değerdir.

İki sinyal farklı frekanstaysa, faz ilişkisi sürekli değişecek ve çıkış bir dizi darbe olacaktır. VCO üzerindeki etki sayesinde, sinyallerde frekansı önce birininkini, sonra diğerininkini değiştirmek olacaktır, ancak genel olarak doğru yöndeki değişiklikler biraz daha uzun olacak ve sonunda VCO frekansını giriş frekansına yükselterek kazanacaktır.



Şekil 17 : 4046 PLL entegresi bağlantı şeması [32]

Buradaki süreç sinyallerin fazlarını değiştirerek iki sinyalin fazlarının aynı olmasını sağlamaktır. Bu sayede faz ilişkileri kararlı ve sinyallerin fazlarını uygunlaştırma için gereken uzun süreç nedeniyle oluşan gecikme VCO için gerekli olan ortalama voltajı sağlamaya yeterlidir. Kalıcı durumda iki sinyal aynı frekansa ve aynı faza gelmektedir.

Benzer şekilde, Faz karşılaştırıcı II, kenar kontrollü dijital bellek ağı olarak bilinir ve sinyal girişi ile karşılaştırıcı girişi arasında 0°'lik bir faz kaymasını sürdürerek bir kilitleme ve dijital hata sinyali sağlar. Temel olay bir referans sinyale başka bir sinyali kitleme yani referans sinyalin karakterinin aynısı gösterme gerekliliğidir. Buradaki sorun referans sinyalle aynı karakterde olan bir sinyalin, elektronik malzemelerden sistem bütününe kadar olan yapıda sinyale gelen çok yönlü etkileyici unsur, bozucu karakterle etkileşime girmiş olmasıdır.

4.5.1.1. Faz Kenetlenme Metodu

PLL devresinin temel çalışması, bölüm 4.5.1 içerisinde Şekil 17'deki temel ve basite indirgenmiş PLL blok şeması üzerinden açıklanabilir.

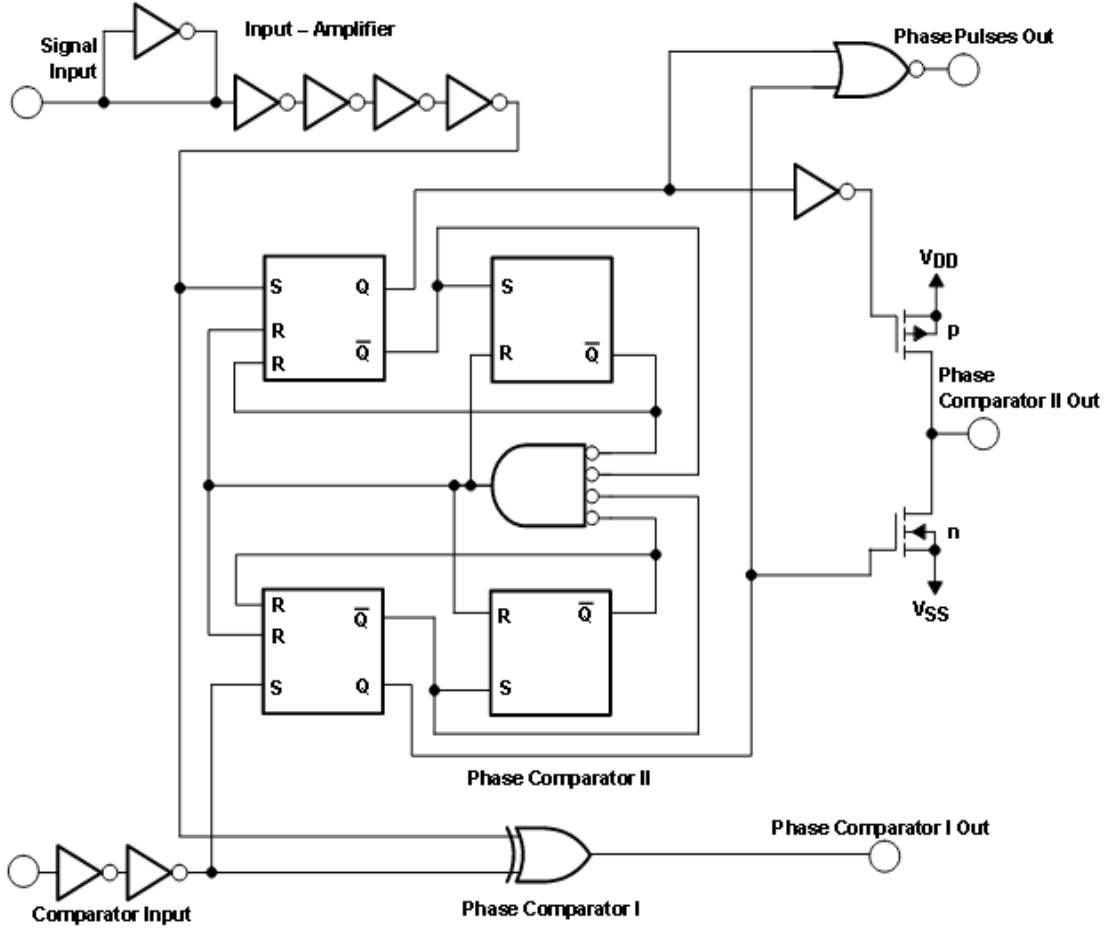
- İlk önce, döngü kilitlendiği zaman (giriş sinyal frekansı ile VCO'nun frekansı aynıdır). Giriş sinyal frekansı ile sinyal üreteç modülünden (10Mhz OCXO) gelen sinyal frekansı karşılaştırma devresine gelen frekans aynı olduğu zaman, çıkış olarak alınan Vd gerilimi, 10Mhz OCXO'yu giriş sinyali ile kilitli tutmak için gereken değerdir.
- Ardından 10Mhz OCXO, VCO_IN pinine gelen voltaja göre PLL devresine giriş frekansında sabit genlikli kare dalga sinyali üretir. Bu kare sinyal, kendi doğrusal çalışma aralığının ortasındaki DC ön gerilim noktasına ayarlanması ile elde edilir.
- Yükselteç, filtre devresinin çıkışı (*PC1_OUT/PC2_OUT*) olarak elde edilen DC gerilimin ayarlanmasını mümkün kılar (Şekil 17).
- $N = 1$ olarak alınmıştır (Şekil 17).
- Döngü kilitli olduğu zaman karşılaştırıcıya uygulanan iki sinyal aynı fazda olmasa da aynı frekanstadır. Çünkü anlık hareketlilikler olabilir.
- Karşılaştırıcıya uygulanan iki sinyal arasındaki sabit faz farkı, 10Mhz OCXO modüldeki VCO_IN girişi için sabit bir DC bir gerilimi oluşturur. Bu durumda giriş sinyali frekansındaki değişimler, 10Mhz OCXO'ya uygulanan DC gerilimin değişmesine neden olur.
- Yakalama ve kilitleme frekans aralığında oluşan DC gerilim, 10Mhz OCXO çıkış frekansının entegreye giren orjinal ve referans giriş sinyallerinin frekansıyla eşitlenmesini sağlar.
- Döngü, kilitleme durumuna geçmeye çalışırken, faz karşılaştırıcının çıkışı karşılaştırılan sinyallerin toplam ve fark sinyal bileşenlerini içerir.

- Alçak geçiren filtre, döngünün, giriş ile 10Mhz OCXO sinyalleri arasında kilitleme sağlayabilmesi için sinyalin sadece alçak frekans bileşenlerini geçirir.
- 10Mhz OCXO'nun sınırlı çalışma aralığı ve PLL devresinin geri besleme bağlantısından dolayı PLL için belirlenen iki önemli frekans bandı vardır.
- PLL'nin yakalama aralığı, döngünün giriş sinyali ile kilitleme sağlayabildiği 10Mhz OCXO serbest çalışma frekansı civarında merkezlenen frekans aralığıdır.
- PLL'nin yakalamayı gerçekleştirdikten sonra, kilitleme aralığı olarak adlandırılan biraz daha geniş bir frekans aralığında giriş sinyali ile kilitlemeyi sürdürür.

4.5.1.2. Faz Kenetliyci İç Yapısı

4.5.1 bölümünde bahsedilen sürecin entegre devredeki blok şema yapısı şekil 18'deki gibidir. Signal Input ile Comparator Input girişlerinden gelen referans ve OCXO'de üretilen kare dalga sinyaller, R-S flip flop yapısı ve XOR kapısı aracılığıyla karıştırıcı yapısında bir dizi lojik birimlerden geçer ve Lojik 0 ve 1 durumları sırasıyla $VDD \leq 30\%$ ve $VDD \geq 70\%$ oranlarına göre oluşur. Bu oranlar *Signal Input* girişindeki sinyalin gerilim değerinin entegrenin beslemesine oranı ile elde edilmektedir.

Tasarımda geri besleme döngüsünün en önemli kısmı döngü filtresidir. Temel olarak, VCO'ya giden kontrol voltajının nispeten sabit olması için sinyal frekanslarının çok altında olması gereken bir köşe frekansına sahip bir alçak geçiren filtredir. Ancak, PLL değişikliklere cevap verebilmelidir, bu nedenle köşe frekansı bu değişikliklerin frekansının üzerinde olmalıdır. Sıklıkla, gürültüyü ve istenmeyen varyasyonları sönmüleyici kabiliyetini sağlamak için oldukça yavaş tepki veren bir PLL yapısı kurulmalıdır.



Şekil 18 : PLL entegresi faz karşılaştırıcı iç blok şeması [32]

4.5.1.3. Faz Kenetlenme Fonksiyonu Analog Yapısı

Bu süreçte kenetleyici/kitleyici sisteme giren iki analog sinyal bir nevi çarpma işlemi yapılır. İşlem sonrasında entegrenin çıkışına aktarılır. PLL yapısında çarpma devresinde giriş büyüklüğü aynı frekanslardaki iki giriş işaretidir. Çıkış olarak faz farkını içeren çarpım terimi ele alınır. Böylece girişteki faz farkını değiştirerek gerilim izlenir. Girişlere:

$$V_1 = V_{m1} \cos(\omega_1 t + \phi) \text{ ve } V_2 = V_{m2} \cos(\omega_2 t), \quad \omega_1 = \omega_2 = \omega \quad (3.1)$$

giriş uçlarına 3.1 denklemi içerişinde genlikleri ve faz açıları farklı sinyaller uygulanınca çarpma devresi(işlemi) sonucunda 3.2 denklemi elde edilir;

$$V_d = k(V_{m1} V_{m2})[\cos(\phi) + \cos(2\omega t + \phi)] \quad (3.2)$$

3.2 denkleminde elde edilen bu sinyal daha sonra devre içerisindeki alçak geçiren filtreden geçirilir ve uygun frekans aralığındaki sinyaller işleme alınarak 3.3 denklemindeki değer çıkışa yansıtılır,

$$V_k = k(V_{m1}V_{m2}/2) \cos(\phi) \quad (3.3)$$

Buradan da 3.4 denklemindeki faz dedektörünün kazancı elde edilir,

$$K_d = k(V_{m1}V_{m2}/2) \quad (3.4)$$

Gerilim kontrollü osilatör birimi entegre içerisinde sinyallere uygulanan işlemler sonrasında elde edilen gerilimin osilatöre girerek kapalı çevrim tasarım yapısı sayesinde iki sinyal arasındaki farklılıkları giderilerek çıkışta, referans sinyale kitlenmiş bir sinyal elde edilir. Bu kitlenme referans sinyalin faz hareketliliklerini temel olarak işlem alınan bir yapıdan oluşmaktadır.

İki sinyal arasındaki faz farkı sayesinde 4.5.1.2 bölümündeki Şekil 18'de gösterildiği gibi her bir derecelik faz farkı için bir DC gerilim seviyesi oluşarak Gerilim kontrollü osilatörün çıkış frekansı ve faz aralığı değişir bu değişim iki sinyal arasındaki faz farkı sıfır olana kadar gerçekleşerek referans sinyaline kitlenme işlemi gerçekleşmektedir.

4.5.1.4. Faz Kenetleyici Tasarımı

CD4046 entegresi PLL mantığı kullanımı bazında entegre parametreleri ayarlama ve buradan da entegre devresinde kullanılacak devre elemanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda CD4046 entegresinin datasheet bilgileri ve grafiksel hesaplamalar kullanılacaktır. Devre şeması bazında bölüm 4.5.1 içerisinde şekil 17'deki yapı baz alınmıştır. Devre elemanları bazında R_1 , R_2 , R_3 , C_1 ve C_2 değerleri belirlenecektir.

Değerler PLL devresinin merkez frekansı (f_o veya f_c) ve bu frekansa yakın maksimum (f_{max}) ve minimum (f_{min}) frekans değerleri üzerinden hesaplanmaktadır. Merkez frekansı olarak entegrenin çalışma aralığı içerisinde

ve kararsızlık bölgesinde olmaması baz alınarak en yüksek kararlılıkta olduğu frekans aralığındaki bir değer olan 10KHz'lik çıkış veren değer seçilmiştir.

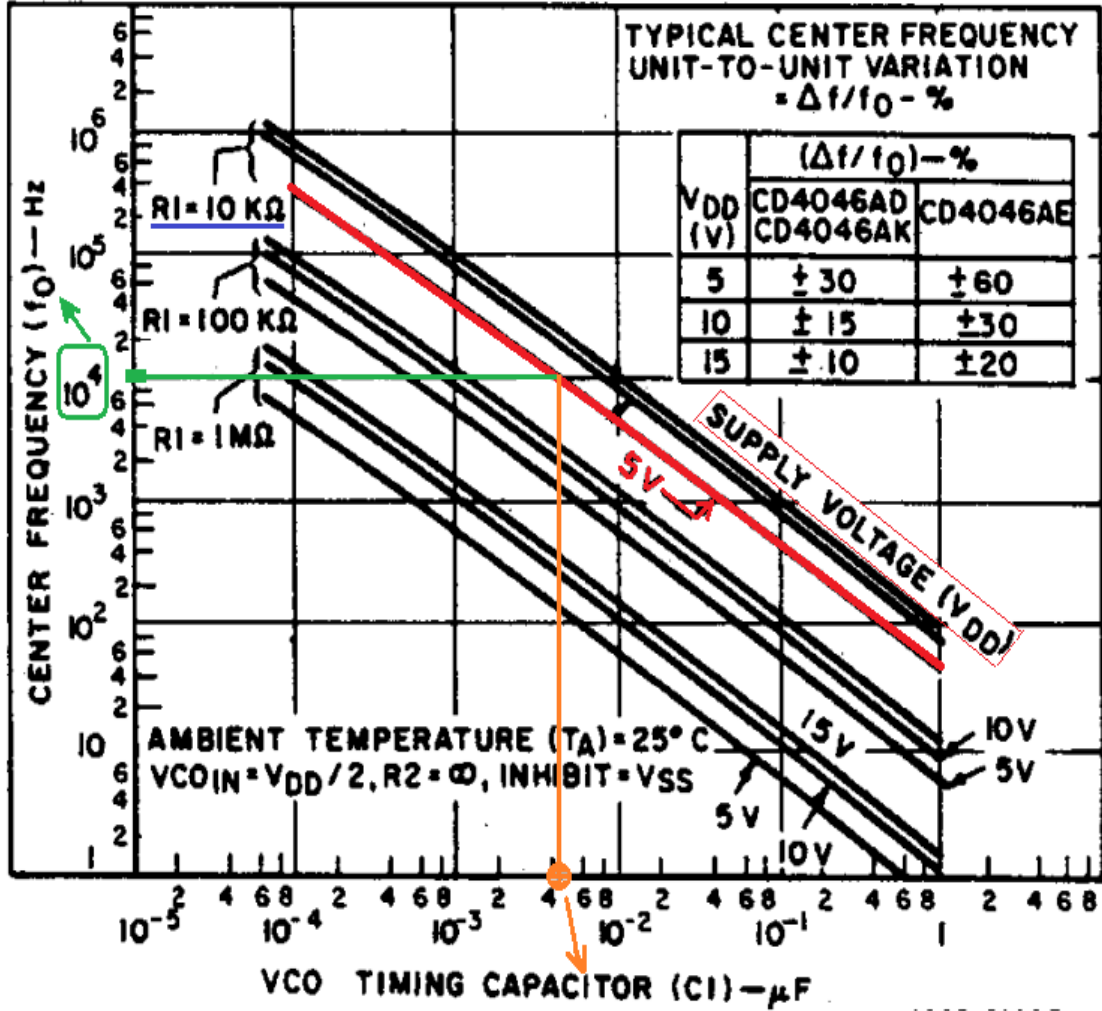
Bu değer devreye giren referans sinyal ile entegre içerisindeki dahili clock sinyal frekansının arasındaki frekansın faz farkını temel alarak kilitleme mekanizmasında ayarlanmaktadır. Bu şekilde kenetlenme işlemi ardından PLL devresinin çıkış frekansını edinilmesi sağlanmaktadır. Temel mantık önceki aşamalarda anlatılan frekansın faz farkından edinilen DC gerilimin CD4046 içerisindeki voltaj kontrollü osilatörün çıkışını ayarlamasıyla oluşmaktadır.

PLL sistemindeki CD4046 entegresine bağlanacak olan pasif devre elemanlarının seçimi konusunda aşağıdaki grafikten yararlanılmıştır. Şekil 19'daki grafik içerisinde temel parametre bazında merkez frekansı 10KHz (f_o veya f_c) olarak belirlenmişti.

Daha sonra Şekil 19'daki grafik kullanılarak ikinci aşamada $R_1 = 10K\Omega$ seçilerek ve besleme voltajına (V_{DD}) göre kırmızı doğru üzerinden göre C_1 kapasitesinin değeri elde edilmiştir [36]. Şekil 19'daki grafik üzerin edinilen değer yaklaşık olarak 50nF olarak kapasite değeri elde edilmiştir. Burada R_1 ve R_2 değerleri haricinde merkez frekansının 10KHz olması ise PLL entegresinin yüksek kararlılıkta olduğu bir değer olduğu için seçilmiştir.

Ancak çalışma kapsamında genel mimari içerisinde 10Mhz OCXO modülündeki VCO yapısı kullanılacağı için $f_{capture} = f_c = f_L$ olduğu için 10Mhz OCXO modülündeki kilitleme aralığı otomatik olarak bulunmaktadır.

Bu kenetlenme kabiliyeti referans sinyal ile 10Mhz OCXO modülündeki VCO tarafından oluşturulan sinyalin yükselen kenarları arasındaki faz farkının 10Mhz OCXO modülündeki VCO'ya geri bildirim sayesinde, 10Mhz OCXO modülünden çıkan sinyalin yükselen kenarı referans sinyalin yükselen kenarı ile aynı olana kadar ayarlama yapılacaktır. Bu sayede kenetlenme sağlanacak ve iki sinyalin arasındaki faz farkı 0 olacaktır.



Şekil 19 : PLL devre direnç ve kapasitans hesap grafiği [32]

PLL yapısında CD4046 entegresi bazında 10Mhz OCXO modülündeki VCO'ya geri bildirim şeklinde Pin9'dan gelen sinyaller bir "Alçak geçiren filtre" yapısı kullanılarak girdi oluşturur. Bu girdi genel çerçevede çıkış sinyali ile giriş sinyali arasındaki farkı algılamak amacıyla kullanılmaktadır. Hesaplamalar Şekil 19'daki grafik mantığı çerçevesinde oluşturulmuştur [33]. Alçak geçiren filtre bazında kesim frekansı (3.5) denklemindeki $f_{cut-off}$ formülü ile hesaplanmaktadır.

Değerler $C_2 = 50nF$ ve $R_3 = 315K\Omega$ seçildiğinde;

$$f_{cut-off} = \frac{1}{2\pi R_3 C_2} \quad (3.5)$$

$f_{cut-off} \cong 10.105Khz$ olarak elde edilmektedir.

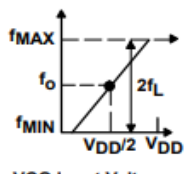
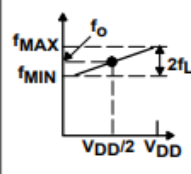
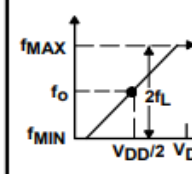
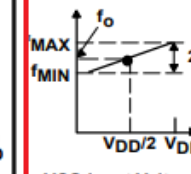
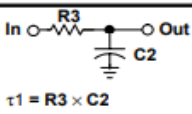
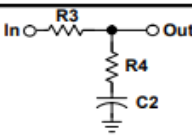
Ayrıca XOR lojik yapısı ile oluşturulmuş dedektörlere Tip I adı verilir ve entegre şemasında da görüldüğü üzere Phase Comperator I Out olan yapıdaki yakalama frekansı ($f_{Capture}$) olarak da eşitlik 3.6 kullanılmaktadır.

$$f_{Capture} \cong \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_o}{\tau_1}}, \quad \tau_1 = R_3 C_2 \quad (3.6)$$

$$f_{Capture} \cong \mp 317.8 \text{ Hz}, \quad f_o = 10 \text{ KHz}$$

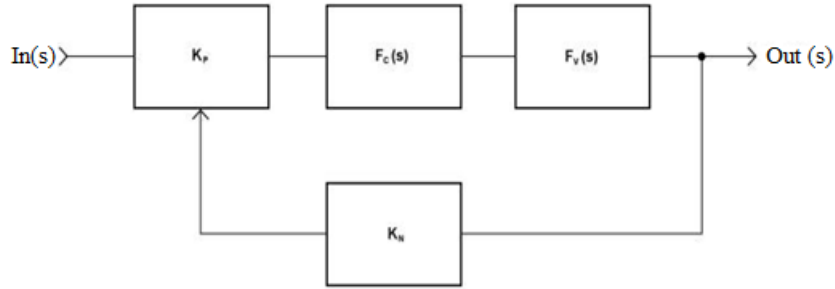
317.8Hz'lik yakalama aralığı ele alındığında 9682.11Hz ile 10317.8Hz frekansındaki elde edilen değer 10Khz'lik istenen sinyalle arasında normale göre yüksek sayılabilecek değerde bir sapma değeri olduğu görülmüştür.

Tablo 3 : PLL tipine göre hesaplama klavuz tablosu [32]

CHARACTERISTICS	USING PHASE COMPARATOR I		USING PHASE COMPARATOR II	
	VCO WITHOUT OFFSET R2 = ∞	VCO WITH OFFSET	VCO WITHOUT OFFSET R2 = ∞	VCO WITH OFFSET
VCO frequency				
For no signal input	VCO in PLL system adjusts to center frequency, f_o		VCO in PLL system adjusts to lowest operating frequency, f_{min}	
Frequency-lock range, $2f_L$	$2f_L = \text{full VCO frequency range}$ $2f_L = f_{max} - f_{min}$			
Frequency capture range, $2f_C$	 $\tau_1 = R_3 \times C_2$ $2f_C = \frac{1}{\tau_1} \sqrt{\frac{2\pi f_L}{\tau_1}}$		<div style="border: 1px solid blue; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;"> $f_C = f_L$ </div>	
Loop filter-component selection	 For $2f_C$, see Note 2			
Phase angle between signal and comparator inputs	90 degrees at center frequency (f_o), approximating 0 degree and 180 degrees at ends of lock range ($2f_L$)		Always 0 degrees in lock	

Tablo 3 üzerinden ve elde edilen pasif devre elemanlarının değerleri ile PLL yapısının genel çerçevesi belirlenmiştir. PLL yapısında kazanç durumunun incelenmesi PLL devresinin tüm yönleriyle ele alınmasında büyük önem

oluşturmaktadır. Bunun için PLL devresi içerisindeki CD4046 entegresinin blokları arasında transfer fonksiyonu yapısı analizi gerekmektedir (Şekil 20).



Şekil 20 : PLL entegresi kazanç ve transfer fonksiyon yapısı

PLL yapısının kazanç ve transfer fonksiyon parametreleri şunlardır:

K_p : Faz detektörü

$F_C(s)$: Döngü kontrolü fonksiyonu

$F_V(s)$: Gerilim kontrollü osilatör fonksiyonu

K_N : Geri bildirim frekans bölücü

Temel olarak kapalı döngü transfer fonksiyonunu (3.7) ele alırsak:

$$\frac{G(s)}{1+G(s).H(s)} , G(s): \text{Transfer fonksiyonu}, H(s): \text{Geri Bildirim} \quad (3.7)$$

transfer fonksiyonu 3.7 formülü şeklinde tanımlanır.

PLL devresinin transfer fonksiyonu ise denklem 3.8'de verilmiştir:

$$T(s) = \frac{K_p.F_C(s).F_V(s)}{1+K_p.F_C(s).F_V(s).K_N} \quad (3.8)$$

Ayrıca kapalı döngü PLL yapısının 2.derece transfer fonksiyonu denklem 3.9'da verilmiştir:

$$\frac{2.\zeta\omega_n.s+\omega_n^2}{s^2+2.\zeta\omega_n.s+\omega_n^2} , \zeta : \text{Sönümlleme oranı}, \omega_n : \text{Doğal açısal frekans} \quad (3.9)$$

K_p faz dedektörü değeri entegre içerisinde iki sinyal arasındaki faz farkını ele almaktadır. Bu oran gerilim başına radyan değeri olarak hesaplanmaktadır. Faz farkı 0 ile 2π arasındadır ve entegrenin besleme gerilimine göre bu oran 3.10 denklemini üzerinden elde edilmektedir.

$$K_p = \frac{V_{DD}}{4\pi} = \mp \frac{V_{DD}}{2\pi} = 0.398 \text{ V/rad} \text{ olarak elde edilir.} \quad (3.10)$$

$F_V(s)$, gerilim kontrollü osilatör transfer fonksiyonu çıkış frekansına bağlıdır. Çıkış fonksiyonu üzerinden elde edilen geri bildirim değeri ile osilatörün kontrol girişindeki gerilim aralığı 0V ile V_{DD} arasındadır. Ancak CD4046 entegresi özelinde bu aralıktaki nominal çalışma frekansı $f_{max}/2$ olarak seçilmektedir.

$F_V(s) = (2\pi \cdot f_{max}) / (V_{DD} \cdot s)$ olarak ele alınır ve buradan osilatörün çıkışını frekanstan faza çevirir. Bu çevrim ise K_v olarak tanımlanır.

$$K_v = (2\pi \cdot f_{max}) / V_{DD} \quad (\text{rad/s})/V \quad (3.11)$$

$$K_v = 12567.62 \text{ (rad/s)/V}, \quad f_{max} = 1000 \text{ Hz}$$

K_N , ise frekans çoğullayıcı veya sentezleyici olarak kullanılan PLL yapısındaki geribildirim döngüsündeki programlanabilir bir sayaçtır. Bu sayaç değeri genelde 1 olarak ele alınır.

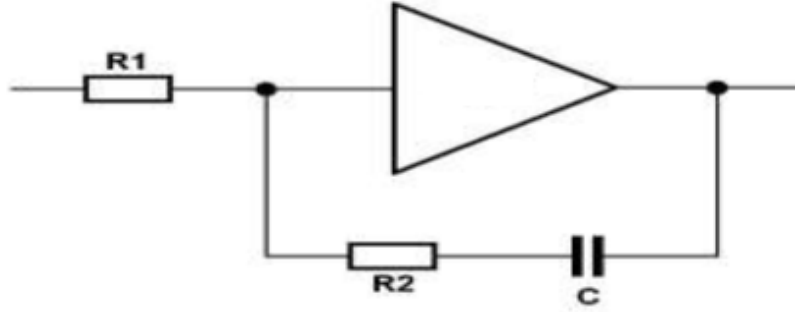
N ifadesi bölme sayısının oranını ifade etmektedir. N ifadesinin 1 seçilmesinin nedeni PLL entegre devresi içindeki VCO yerine OCXO modülünün kullanılmıştır. OCXO modülünden tam 10KHz'lik sinyal çıkışı olması nedeniyle herhangi bir bölme yani N tam sayısı tanımlama ihtiyacı doğmamıştır.

$$K_N = \frac{1}{N} = 1 \quad (3.12)$$

$F_c(s)$, döngü fonksiyonunun elde edilmesi için olarak PLL devresinin transfer fonksiyonu ile kapalı döngü PLL yapısının 2.derece transfer fonksiyondaki

denklemlerin incelenmesi ve birleştirilmesi, bu transfer fonksiyonunun ($F_c(s)$) elde edilmesini sağlar.

Temel olarak bir kazanç devresini (operasyonel yükselteç-opamp) baz alarak transfer fonksiyonu oluşturulur (Şekil 21).



Şekil 21 : Kazanç transfer fonksiyon yapısı

$$F_c(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{s + \frac{1}{R_2 C}}{s} \quad (3.13)$$

denklem 3.13 elde edilir ve buradan da:

$$K_c = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.14)$$

şeklinde 3.14 denklemindeki kazanç bilgisine ulaşılır.

$$K_c = -\frac{1}{1} = -1$$

Sonuç olarak PLL devresinin transfer fonksiyonu matematiksel olarak açıldığında $F_c(s), F_v(s)$ gibi parametreler PLL devresinin transfer fonksiyonuna entegre edildiğinde aşağıdaki yapı elde edilir.

$$T(s) = \frac{(1 / K_N) \cdot (K_p \cdot K_c \cdot K_v \cdot K_N \cdot s + K_p \cdot K_c \cdot K_v \cdot K_N / [R_2 \cdot C])}{s^2 + K_p \cdot K_c \cdot K_v \cdot K_N \cdot s + K_p \cdot K_c \cdot K_v \cdot K_N / [R_2 \cdot C]} \quad (3.15)$$

3.15 denklemi ile daha açık şekilde ifade edilmiş olan PLL devresinin transfer fonksiyonu ile Kapalı döngü PLL yapısının 2.derece transfer fonksiyonu birbirine eşitlenerek diğer bilinmeyen değişkenler elde edilmektedir.

Kapalı döngü PLL yapısının 2.derece transfer fonksiyonunun içerisindeki ω_n ve ζ parametreleri önceden ele alınan denklemler üzerinden aşağıdaki gibi

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p \cdot K_v}{N \cdot R_1 \cdot C}} \quad (3.16)$$

3.16 denklemindeki parametreler 3.17 denkleminde de kullanılır ve 3.17 denklemini elde edilir.

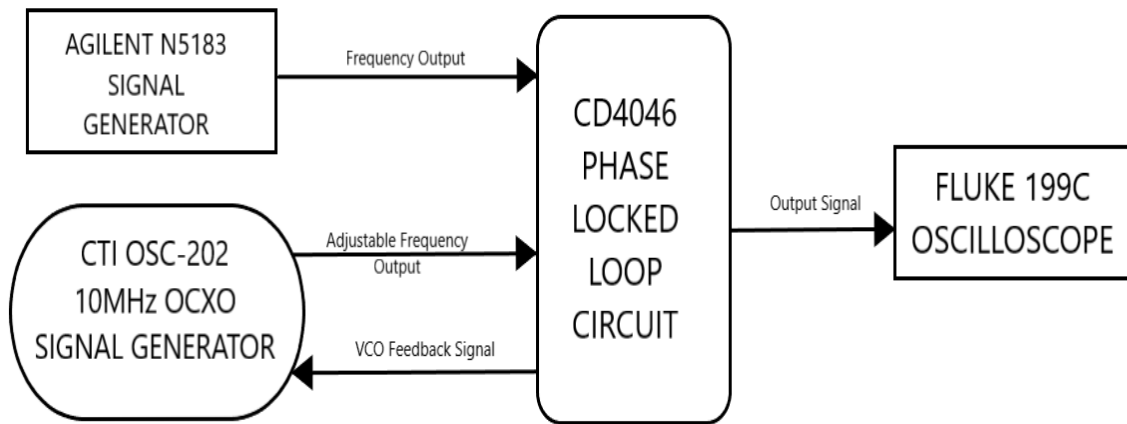
$$\zeta = \frac{K_p \cdot K_v \cdot R_2}{2 \cdot \omega_n \cdot N \cdot R_1} \rightarrow \frac{1}{2} R_2 \sqrt{\frac{K_p \cdot K_v \cdot C}{N \cdot R_1}} \quad (3.17)$$

Daha sonra N, K_p, K_v, R_1, R_2 ve C değerleri de denklemlerde yerine koyulduğunda aşağıdaki:

$$\omega_n = 55.2 \text{ rad/s}$$

$\zeta = 0,79$ değerler elde edilir.

PLL devresi, pasif elemanların ve çalışma aralığı ile ilgili hesaplanan değerlere göre oluşturulmuştur. Devre +5V besleme ile bir sinyal jeneratör (AGILENT N5183) ve OCXO modülünden çıkan (2 farklı kaynak) sinyaller PLL devresine bağlanmıştır (Şekil 22). Tasarımda 10Khz'lik iki sinyalin birbirine kenetlenme işlevini yerine getirmesi planlanmıştır.



Şekil 22 : PLL devresi test düzeneği(kalifikasyon)

Tasarım bir breadbord üzerine kurulmuş halde ve sinyal jeneratöründen değiştirilen (9,8Khz-10,2kHz aralığı ve $0-\pi$ arasında faz değişimleri

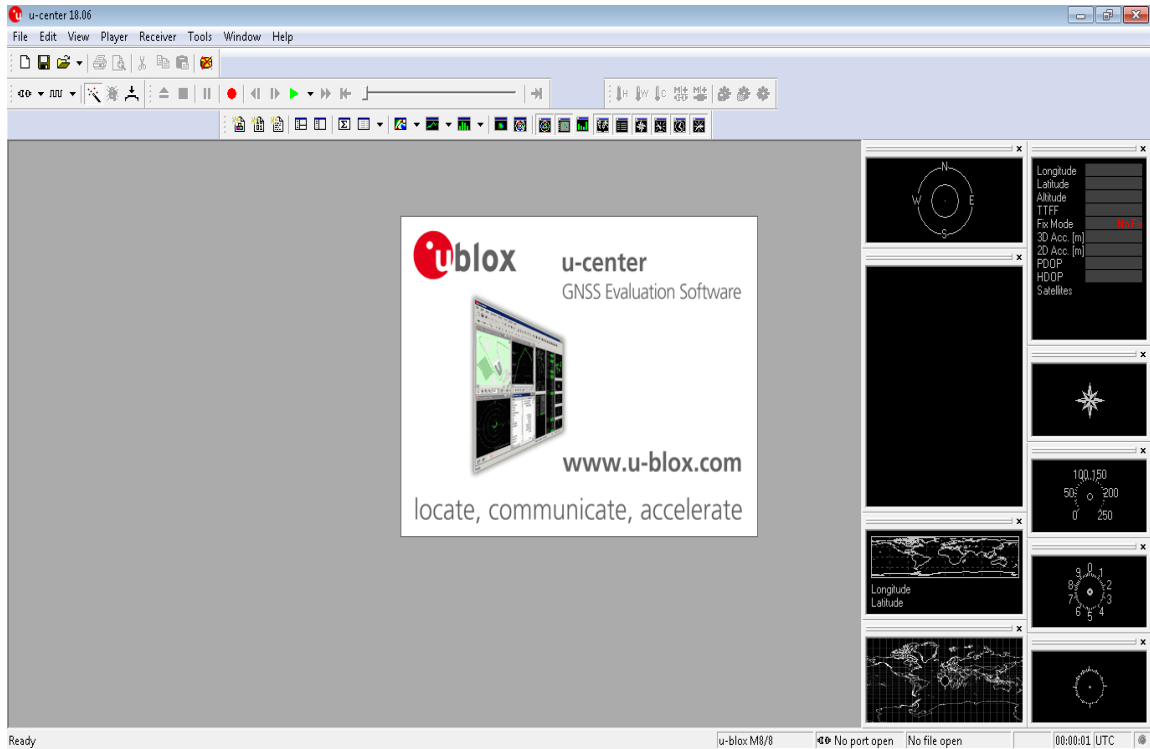
uygulanmıştır) referans sinyaldeki değişimlerin, PLL devresince algılanıp çıkış sinyalinin kendini güncellediği ve referans sinyalden sapma (faz ve frekans bazında) yapmadığı görölmüştür. Bu şekilde iştenen durum elde edilmiştir.

5. DENEYSEL BULGULAR

Çalışma kapsamında U-BLOX M8N GPS alıcı modül, CTI 10MHz OCXO Osilatör modlü ve PLL devresi birbirleri ile bitişik halde kurulmuştur. Modüllerin birbiri ile aynı besleme kaynağı ve aynı gerilim seviyesi kullanılmıştır. Modüller ve devre arasındaki sinyal bağlantıları SubMiniature Version A Connector (SMA Connector) konnektörlü ve dış izolasyonlu koaksiyel kablolar ile yapılmıştır. Çalışma kapsamında tüm ölçümler 15 m² üzeri ve yan duvar kısımları açık alanda alınmıştır. OCXO modülünün ısıl değişim durumları bir kararsızlığa girip girmediği öğrenmek amacıyla belirli aralıklarla kontrol edilmiştir.

5.1. GNSS Almaç (U-BLOX M8N) Ayarlaması

U-BLOX M8N GPS alıcı modülü USB üzerinden U-CENTER PC arayüzü ile bağlantı kurulup modülün çalıştırılması sağlanmaktadır. Temel yapı olarak U-BLOX GPS alıcı modül üzerinden edinilen 1saniyelik bir periyotta belirli frekans aralığına kadar çıkış verebilen hassas zaman bilgisi verebilmektedir. U-blox GPS alıcının bilgisayar arayüzü olan U-CENTER üzerinden GPS almancının ön ayarlamaları yapılmaktadır (Şekil 23).



Şekil 23 : U-CENTER Yazılım arayüzü

Öncelikle GPS almacının koordinat ve diğer dataları hesaplaması amacıyla referans noktanın ayarlanması için DATUM ayarlaması yapılmaktadır. Kısaca Datum, herhangi bir noktanın yatay ve düşey konumunu tanımlamak için başlangıç alınan referans yüzeyidir. Bir datum; elipsoidi, enlem-boylam oryantasyonu ve fiziksel bir orijin ile tanımlanır [34].

Bu tanımlama bazında U-CENTER arayüzünde DATUM için WGS84 hesaplama referansı seçilmiştir. WGS84, Küresel Konumlama Dizgesi'nin kullandığı koordinat yöntemlerinden birisidir. WGS84, üç boyutlu kartezyen yerlem dizgesi ve ilişkili elipsoit'ten oluşur.

WGS84 konumları ya X-Y-Z kartezyen koordinat olarak ya da enlem, boylam ve elipsoit yükseklik yerlemleri olarak tanımlanırlar. Yer kütesinin merkezi bu dizgenin orijini olarak alınmıştır. Günümüzde araçlarda kullanılan seyir sistemlerinin haritalarındaki konumlar WGS84 olarak aygıtın belleğinde tutulur [35].

U-BLOX M8N GPS almacının hassas ve zamanlama özellikli üretilmiş olması nedeniyle GPS almaç modülünde dahili osilatör, çoklu uydu kapasitesi, time offset özelliği ve hata ayıklayıcı gibi birçok özelliği bulunmaktadır. Ş U-CENTER arayüzü üzerinden uydu sistemlerinin algılanması ve uydu takımı dataları seçimi ayarlaması yapılmalıdır.

U-CENTER arayüzü aracılığıyla U-BLOX GPS modülündeki en önemli özelliklerden biri de 1 saniyelik GPS zamanının periyodunun içerisinde üretilecek olan 1PPS ayarlamasına izin vermesidir.

Bu bağlamda OCXO modülüne paralel olarak PLL devresinde kenetlenecek bir referans sinyal haline gelmesi için de aşağıdaki görselde olduğu gibi "Pulse Period" alanından 1PPS periyodunun zamanını istenilen şekilde girerek GPS zaman saati hassaslığında pals oluşmasına imkan vermektedir. Ayrıca üretilen 1PPS modu artan kenar veya azalan kenar referanslı şekilde oluşmasını da desteklemektedir.

Bu oluşan sinyal U-BLOX modülü üzerinde 1PPS (pulse per second) olarak tanımlanmış pinden ölçümler alınmıştır. 1PPS'ik aralıktaki sinyal frekansı PC tabanlı yazılım olan U-CENTER üzerinden View>Configuration View>Time Pulse sekmesinden ayarlanabilmektedir.

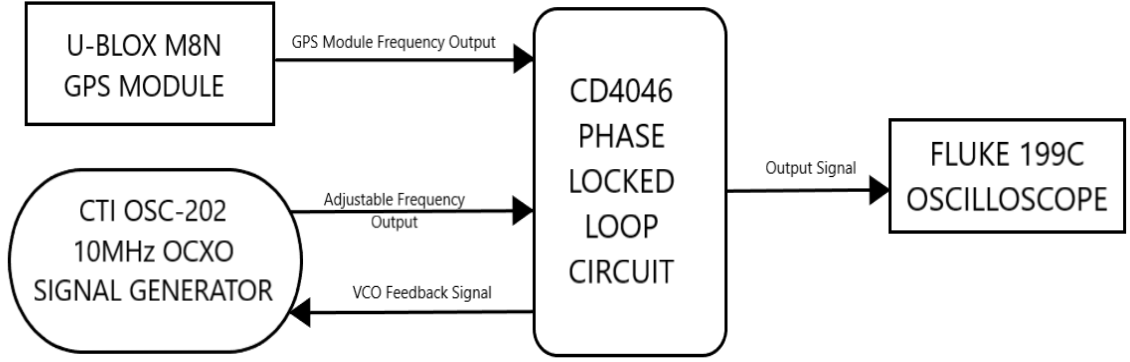
GPS alıcı modül ve ayarlamalar sonrasında uydulardan alınan sinyallerin yapısı bazında yeterli uydu sayısı ve uydudan gelen sinyallerin alımı sonrasında belirli bir süre uyumlandırma ve optimizasyon için zaman geçmektedir.

Her 30sn'lik zaman dilimi içerisinde GPS düzeltmeleri ve diğer dataların alınması sonrasında GPS alıcı modül GPS datalarından anlamlı veri elde edebilmektedir. Burada hem U-CENTER programı hem de U-BLOX GPS alıcı modülün koordinasyonu ile tüm yapı optimal şekilde çalışması sağlanmakta ve GPS uyduları algılanmaktadır.

GPS sinyali üzerinden 1. ve 4. subframe dataları aracılığıyla UTC ve saat düzeltmeleri gibi belirli doğrulayıcı data seti alınmaktadır. 1. subframe her 30 sn de güncellenmektedir. 4.subframe ise her 15,5dk da bir güncellenmektedir. GPS sinyali üzerinden akan data bilgileri bazında bölüm 2.3'deki Şekil 7'de detaylı olarak gösterilmiştir.

5.2. GPS Kontrollü Zamanlama Ölçümü

GPS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon kapsamında oluşturulan devre tasarımı sonucunda tüm modül ve devrelerin çalışması incelenmiş ve değerler kaydedilmiştir. Bu değerler GPS sinyalinin tam olarak alındığı (en az 4 uydunun görülmesi) durumdan itibaren açık alanda ve sıcaklık değişiminden etkilenmeyecek şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 24'te verilen blok diagram kapsamında mimari oluşturulmuştur.



Şekil 24 : GNSS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon devresi deney düzeneği

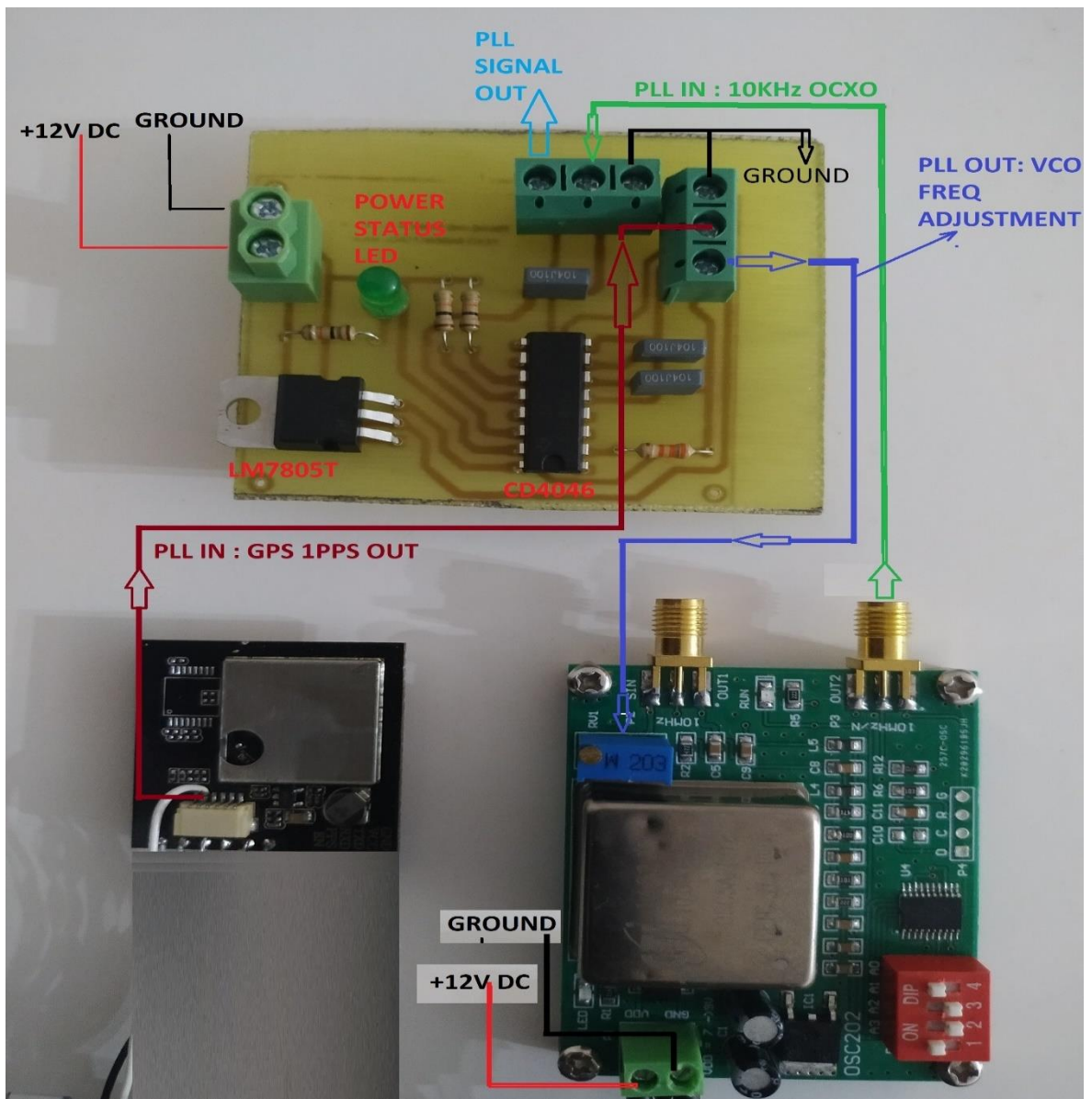
Alınan ölçümler de FLUKE 199C Osiloskop kullanılmıştır. Osiloskopun özellikleri aşağıda verilmiştir:

- İki kanal 200 MHz
- Kanal başına 2.5 GS/s gerçek zamanlı örnekleme
- Kanal başına en fazla 3000 noktalık yüksek dalga formu çözünürlüğü
- Kompleks dinamik dalga formları için Digital Persistence özelliği ile analog osiloskop efekti.
- Harici tetikleme özelliğine ek olarak zengin manuel tetikleme
- Son ölçülen 100 ekranın otomatik kaydı ve görüntülenmesi
- ScopeRecord modunda kanal başına 27500 noktalı hafıza
- 1000 Volt'a kadar izole girişler
- Referans dalga formu karşılaştırma yeteneği ile görsel geçti/kaldı testi imkanı
- PWM fonksiyonu ile motor sürücüleri ve frekans invertör ölçümleri
- Dalgaformu matematik işlemleri: Toplama, çıkarma ve çarpma
- FFT tabanlı frekans spektrum analizi

Şekil 25'de görüldüğü üzere deneysel düzeneğe bir PLL devresi, 10MHz OCXO sinyal üreteci modülü ve GPS alıcısı dahildir. Devre üzerindeki direnç ve diğer elemanların tolerans değeri %0.1 olacak şekilde seçilmiştir. PLL entegresi ise 4046 olarak bilinen ve Texas Instruments firması üretimi elektronik devre elemanıdır. Besleme devresi için SGS-THOMSON firmasının gerilim regülatör

entegresi LM7805T modeli seçilmiştir. 40V DC'e kadar giriş voltajı, ısıl kararlılık, 1.5A maksimum çıkış akımı ve çok düşük sızıntı voltaj özelliklerine sahiptir.

Şekil 24'teki blok bazında daha önceki bölümlerde verilen bilgiler ışığında önce GPS alıcısından edinilen 10Khz'lik sinyal ile OCXO modülünden alınan sinyallerin frekansı aynıdır. Aynı frekanstaki bu iki sinyalin PLL devresinde kullanılmaktadır. PLL entegresinin çalışma aralığındaki optimal bir değer olan 10Khz'lik bir sinyal elde etmek için bu iki sinyal 10Khz mertebesinde işleme alınmıştır.



Şekil 25 : GNSS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon devresi tasarım montajı

PLL devresi kapsamında, GPS modülünde üretilen zaman sinyali referans sinyal olarak baz alınıp, OCXO modülünden üretilen sinyal ise referans sinyale kenetlenme işlemi yapılmaktadır.

Kenetlenme işlemi iki sinyalin faz farkını temel alarak PLL devresine giren OCXO sinyalini, referans sinyalin ilerisinde veya gerisinde başlayacak şekilde çıkış sinyalini ayarlayarak GPS sinyaline kenetlenmiş ve bu sinyalin hareketine, kaymasına ve durum değişmesine göre yeni bir sinyal oluşturmaktadır. Buradaki temel prensip GPS sinyali varken PLL devresinde bu sinyal baz alınarak üretilen sinyalin zaman içerisinde kayma durumu, kararsızlık hali ve GPS sinyali olmadığındaki durumunun analizi yapmaktır.

Şekil 25'de gösterilen modüller üzerinden yapılan çalışmada hem referans (GPS modülünden alınan sinyal) hemde Phase Comparator Out II yani PLL Signal Out noktasından alınan sinyaller osiloskop aracılığıyla incelenmiştir.

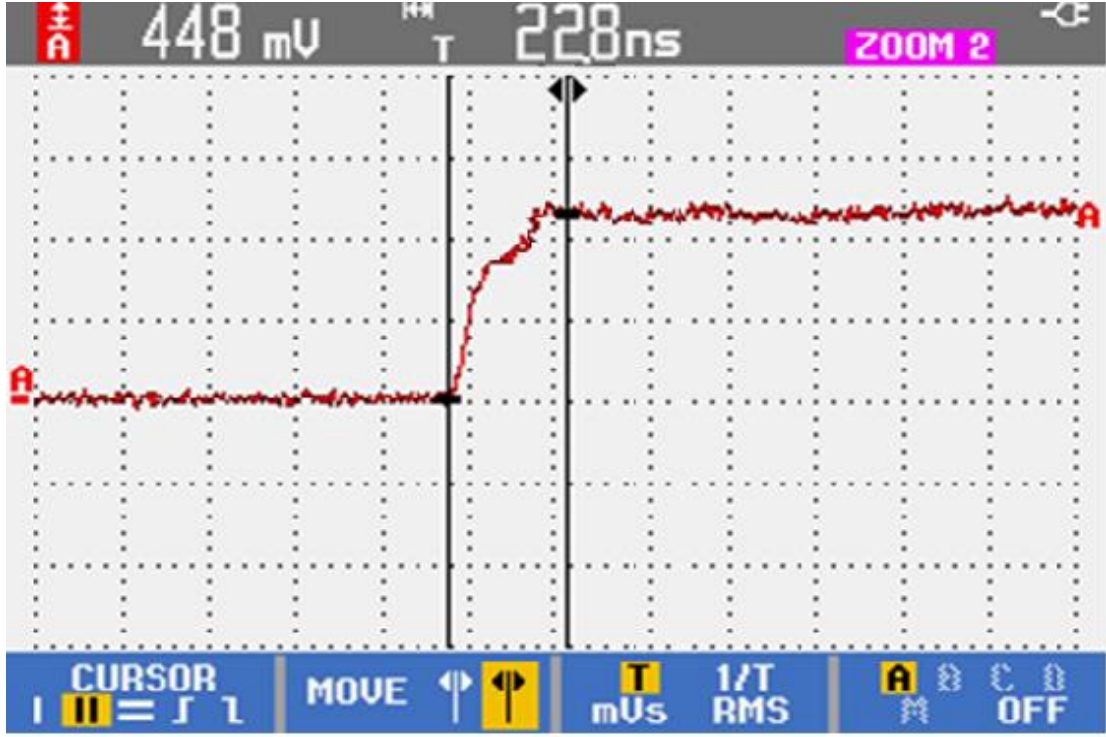
Ölçümler kapsamında açık alanda ve normal sıcaklık değerlerinde ölçümler belirli zaman aralıklarında alınmıştır. Ölçümler ve alınan değerler bazında çeşitli senaryolar denenmiştir.

Öncelikle GPS Modülü var iken GPS'den gelen zaman sinyaline göre kilitlenmiş bir sinyalin zamana göre ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra GPS sinyali varken ölçümler esnasında ilk kilitlenmiş sinyal elde dildikten sonra PLL devresinden GPS modülünün bağlantısı kesilerek mevcut kararlılığını koruma süresi ve durumu incelenmiştir.

Ölçüm Metodu 1: GPS Sinyali Var iken PLL Devresi ve Üzerinden Alınan Ölçümler

Ölçüm metodu olarak Şekil 24'te verilen blok yapı üzerinden ölçümler alınmıştır. PLL devresinde olduğu gibi GPS modülü içerisinde de bulunan devre elemanlarının tetikleme süreleri ve kapasiteleri nedeniyle sinyallerin yükselen (Şekil 26) ve düşen kenaların (Şekil 27) bir süreleri olmaktadır.

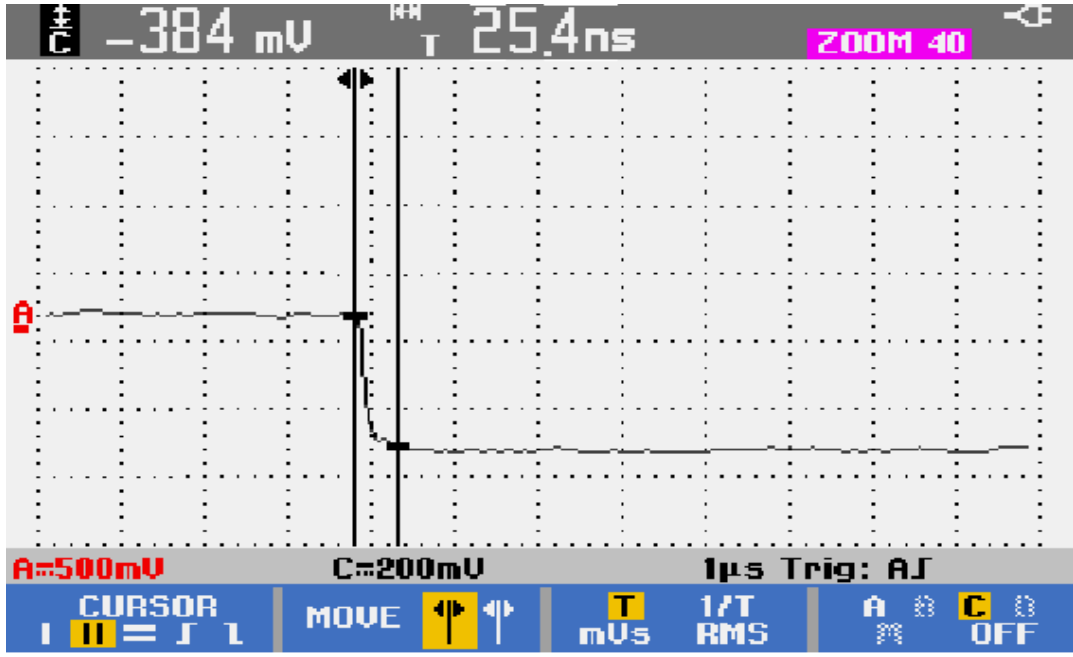
U-BLOX M8N GPS alıcı modülünün sinyal karakteristiğinde düşme ve yükselme zamanlarının toplam maksimum 100 ns olarak verilmiştir. Ancak bu doğrultuda Şekil 26 ve Şekil 27'de olduğu gibi yükselen kenar zamanı (RISE TIME) 22.8 nsec ve düşen kenar zamanı (FALL TIME) da 25.4 nsec olarak ölçülmüştür. Yükselen ve düşen kenar zamanı birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.



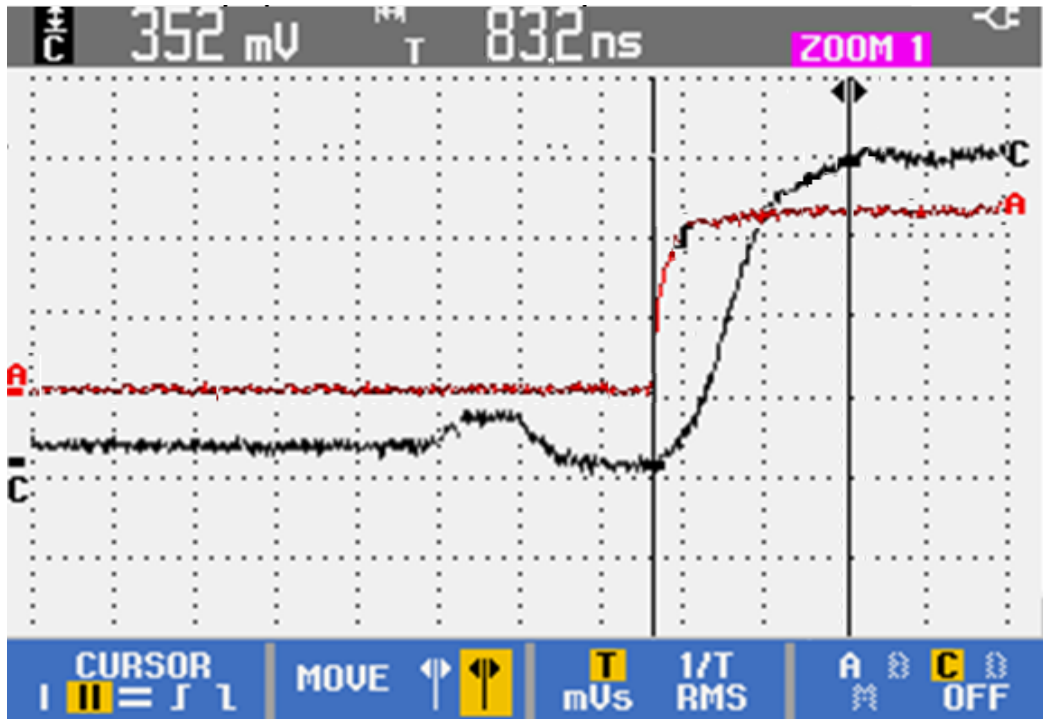
Şekil 26 : Referans sinyal (1PPS) yükselen kenar süresi

Daha sonra Şekil 28'de gösterildiği gibi GPS tabanlı tüm devre yapıları çalıştıktan 15dk sonra, +5V DC besleme geliriminde çalışmıştır.

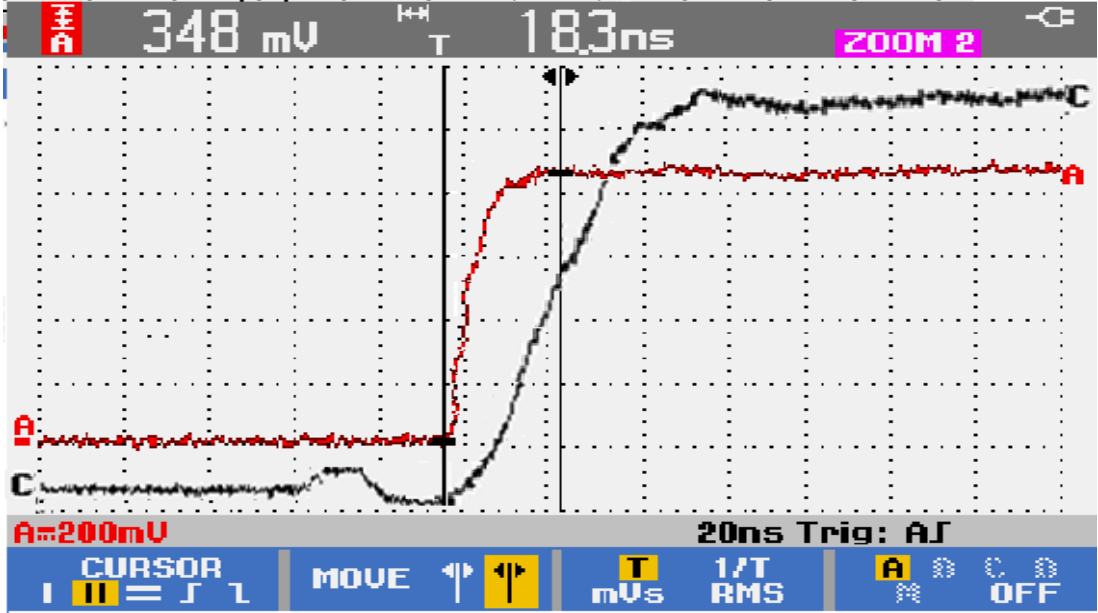
PLL devresinin çıkışındaki (Siyah renkli C ile gösterilmiş sinyal) sinyalin yükselen kenarının RISE TIME değeri 83,2 nsec olmuştur ve hem GPS modülünü tam anlamıyla kararlı şekilde kendini sürekli düzeltmesi hemde PLL devresine bağlı 10Mhz OCXO modülünün kararlı çalışma sıcaklığına ulaşması ile yükselen kenarının RISE TIME değerinin 22,8 nsec den 18,3 nsec' düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 29).



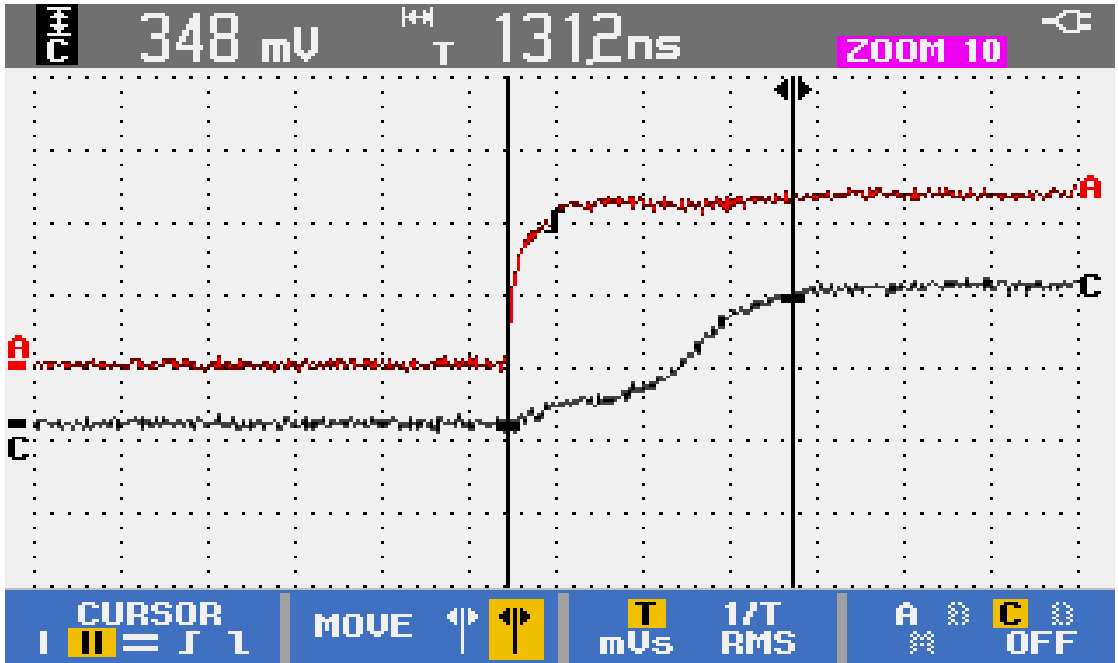
Şekil 27 : Referans sinyal (1PPS) düşen kenar süresi



Şekil 28 : GPS sinyali (A) varken ve 15dk sonra PLL devresi çıkışı sinyal (C) yükselen kenar süresi



Şekil 29 : 15dk sonra GPS Modülü çıkışı sinyali (A) yükselen kenar süresi



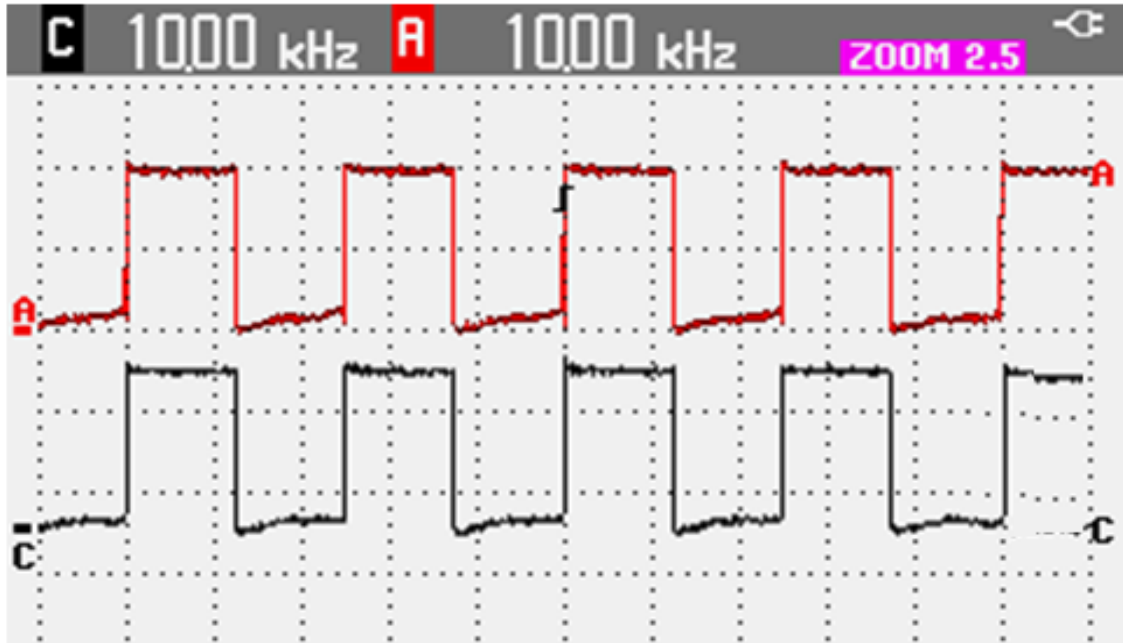
Şekil 30 : PLL devresinin ilk açılış durumundaki çıkış sinyalinin (C) yükselen kenar süresi

PLL devresi içerisinde aktif ve pasif elemanlar olması nedeniyle giriş ile çıkış sinyalleri arasında bir gecikme yaratacaktır. Bu gecikme referans sinyali bozmadan sadece küçük bir gecikme ile çıkış sinyalini üretmesi durumu kaçınılmazdır. +5V DC besleme geliriminde PLL devresinin çıkışındaki (Siyah renkli C ile gösterilmiş sinyal) sinyalin yükselen kenarının RISE TIME değeri

ulaştığında daha iyi bir performans sağladığı görülmüştür. Ayrıca açılış anında GPS sinyali ile PLL devresi çıkışındaki sinyalin yükselme zamanları arasındaki fark da zamanla azalmıştır. Yani PLL devresi çıkışındaki sinyalin yükselme zamanı ile GPS sinyalinin yükselme değerleri arasındaki fark açılış anında 108,4 nsec olarak gözlemlenmiştir. 15 dakika sonra PLL devresi çıkışındaki sinyalin yükselme zamanı ile GPS sinyalinin yükselme değerleri arasındaki fark yaklaşık 61 nsec olarak gözlemlenmiştir. Böylece iki sinyal arasındaki fark zamanla azaldığı gözlemlenmiştir.

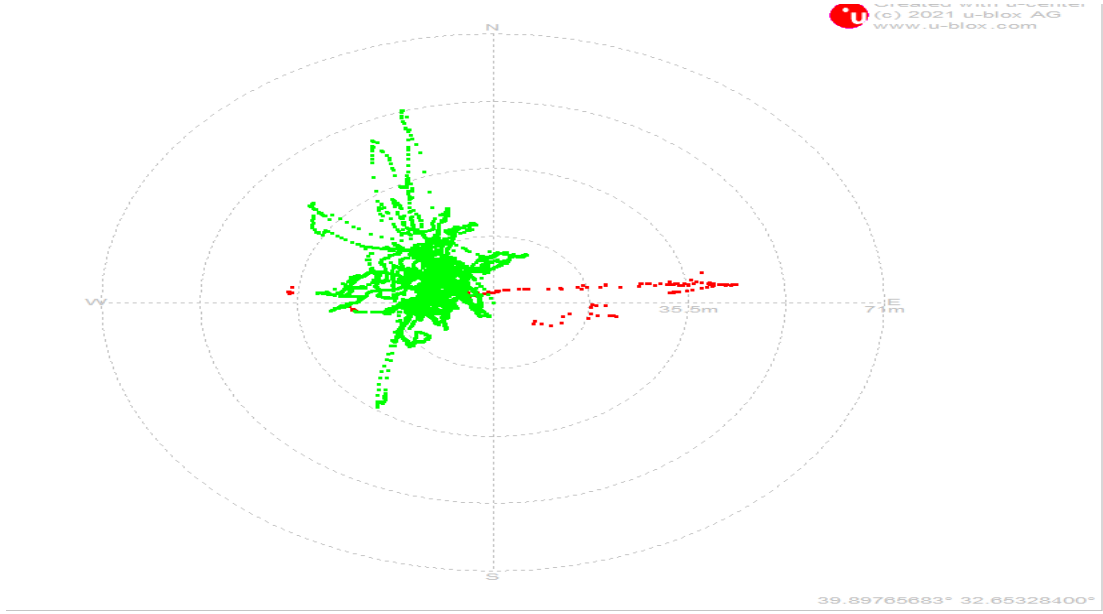
Tablo 4 : GPS ve PLL Çıkış Sinyallerinin Yükselme Süreleri

GPS Sinyali Yükselme Zamanı (Şekil 38)	Açılış Anında	22,8 nsec
GPS Sinyali Yükselme Zamanı (Şekil 41)	15 dk sonra	18,2 nsec
PLL Çıkış Sinyali Yükselme Zamanı (Şekil 40)	Açılış Anında	131,2 nsec
PLL Çıkış Sinyali Yükselme Zamanı (Şekil 42)	15 dk sonra	83,2 nsec



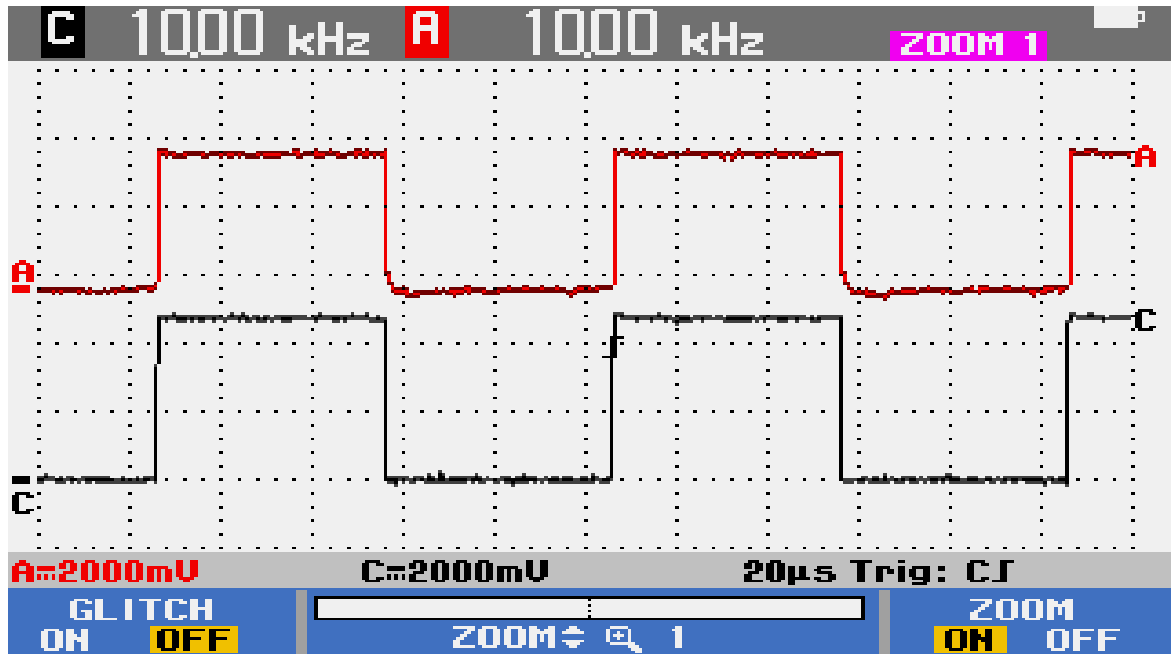
Şekil 32 : GPS modülünün uydulara tam senkronize olmadığı durumda referans sinyal ile PLL ile oluşturulan sinyal karşılaştırması

Şekil 32, ilk başlatma esnasında GPS modülünden gelen sinyalde (Siyah renkli C ile gösterilmiş sinyal) düşen kenar ile yükselen kenarlar arasında küçük bir bozulma görülmüştür. Bu bozulma 3dk sonra GPS modülünün algılayabildiği tüm uydulara senkronize olmasından sonra ideal kare dalga formuna ulaşmıştır.



Şekil 33 : GPS modülü yeterli uydu sayısı varkeni konumun sapma durumu

Şekil 33'de görüldüğü gibi ilk açılış esnasında alınan konum bazlı sapma oranı düzelmiş haldedir.



Şekil 34 : GPS modülünün uydulara tam senkronize olduğu durumda referans sinyal ile PLL ile oluşturulan sinyal karşılaştırması

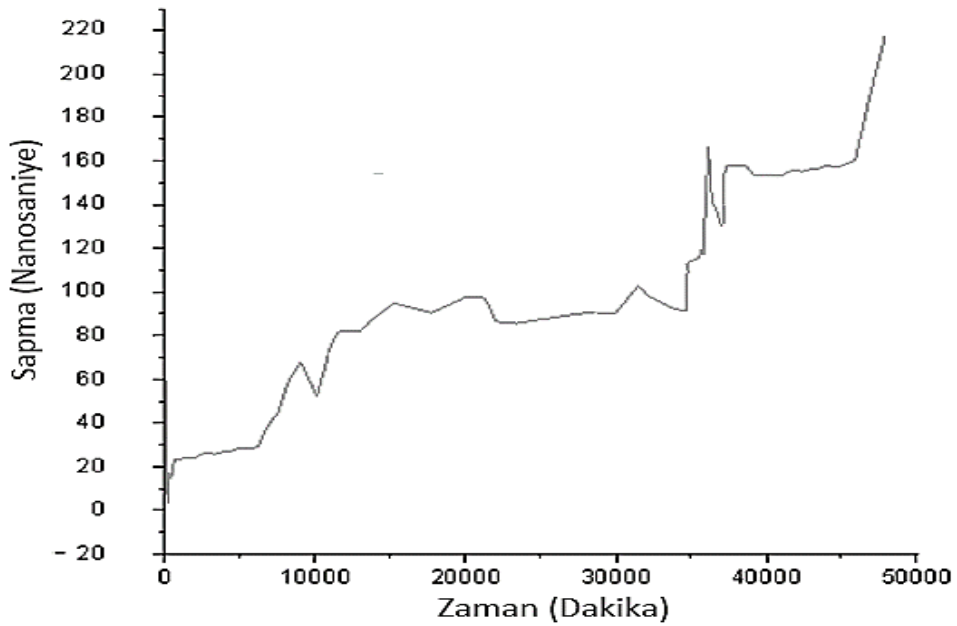
Şekil 34'de olduğu için referans olarak ele alınan sinyal (Siyah renkli C ile gösterilmiş sinyal) ile 10Mhz OCXO ve PLL modülleri üzerinden oluşan sinyal (Kırmızı renkli A ile gösterilmiş sinyal) karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak referans

- 1-10dk arasında GPS alıcı ve PLL devresinin senkronizasyonu olduğu anda 7~15nanosaniye oranında sapma değerinden başladığı görülmektedir. Bu durum ilk açılış ve kenetlenme mekanizmasının devre girmesi gibi olguların değerlendirmemize imkan sağlayan bir veridir. Buna göre birkaç dakika içerisinde GPS alıcı modül uydular ile senkronize olup referans sinyali ürettiği ve yapının çalışmaya başladığı bilgisi elde edilebilmektedir.
- 10-240dk arasında sistemin çalışma durumu incelendiğinde yaklaşık 4 saatlik süre sonunda sapma oranı önemli ölçüde azaldığı bu oran yaklaşık öğle saatlerine denk geldiği de göz önüne alındığında hava durumunun (ısı, nem, bulutluluk) etkisi direkt olarak görülmektedir. Bu periyot süresince PLL devresine bağlı olan osilatörün sıcaklığı sık sık kontrol edilmiş ve ısıl bir değişim veya kararsızlık görülmemiştir. Doğal olarak sistemimizin çalışma yapısının doğru kurulduğu devre elemanlarında ısıl kayıp/kararsızlık görülmediği de teyit edilmiştir. Tasarım olarak GPS sinyali kararlılığında ve hassaslığında sabit bir sinyal elde edildiği de netleştirilmiştir
- 240-300dk aralığında ise sapma oranı anlık bir artış ve azalış gerçekleştirmesine rağmen mevcut durumda çok aşırı bir sapma durumu yaratmamış ve bu ani değişimi algılayıp sistemin çıkışında görülmesi de sistemin lineerlik bazında yüksek karakteristiğe sahip olduğunu göstermektedir.
- 300-500dk aralığında zamansal olarak değişim küçük değişimleri içermektedir. Bu değişimler GPS uydularından gelen sinyalin zamanla sürekli değişim halinde olduğu zamana ve dış etkenlere göre sapma değerlerinin değiştiğini net şekilde gözlemlenmiştir.
- 500-700dk aralığında ise değişim durumu çok hızlı şekilde artış ve azalmalar göstermiştir. Bu aralık incelendiğinde GPS alıcının aldığı uydu

sinyali sayısı ve alınan sinyallerin bazılarında kopmalar/iletişimsizlikler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hem GPS alıcı modülde hemde PLL devresindeki malzemelerin ısı ve gerilim değişimleri incelendiğinde kararlı halde olduğu görülmüştür. Görülen bu sapma değişimi tüm sistem ele alındığında GPS sinyalinin yeryüzündeki alıcılar açısından önemli ölçüde olan bir sapma miktarı olarak görülmemektedir.

- 700.dk sonrasında sapma değerleri sürekli olarak artış veya azalış eğiliminde değişmiştir. Bu değişim esnasında GPS uydu alıcısının aldığı sinyal yoğunluğu değişimi olsa da yaklaşık 24 saatlik çalışma sonunda sapma oranlarında artış gözlemlense de zamanla sapma oranı azalma eğiliminde olmuştur.

24 saat içerisinde GPS ve PLL sinyali arasındaki fark ortalama 10 ns olsa da, bu seviye etrafında yaklaşık $\pm 3,19$ ns oynama olduğu görülmüştür. Bu oynamaların sebebi GPS alıcıya aktif deaktif uydu sayılarının zamanla artıyor-azalıyor olmasındandır. Sonuç olarak 24 saat içinde GPS zaman ile OCXO modülü maksimum 10 ns'lik hata ile PLL devresi aracılığıyla senkronizasyon sağlamıştır. Aynı gözlemler 30 gün boyunca devam ettirilmiştir Şekil 37.



Şekil 37 : 30 gün boyunca PLL devresi sapma grafiği

Şekil 25'de gösterildiği gibi GPS Modülü, PLL devresi ve OCXO sinyal üretici 30 gün boyunca kesintisiz olarak çalıştırılmıştır. Devrelerde fazladan ısınma vb herhangi aksi bir durum gözlemlenmiştir. Şekil 37 grafiği incelendiğinde oranlarının 30 gün boyunca referans sinyalin zamanla kayma durumu açısından çok yüksek oranda sapma olmadığını ortalama değişimler gösterdiği ve kayma oranında lineere yakın artış tipi gözlemlenmiştir;

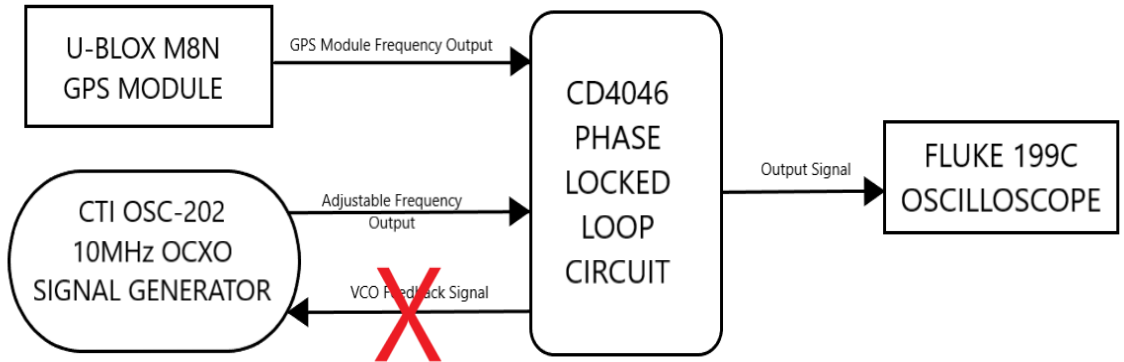
- 1-8000dk arasında GPS alıcı ve PLL devresinin senkronizasyonu olduğu anda 25nanosaniye oranında sapma olduğu ve bu sapmanın uzun sürede ve lineer şekilde artması durumu PLL devre yapısındaki senkronizasyon ve kararlılık açısından oldukça iyi olduğu görülmektedir. Ancak belirli süre kararlılık sağlamaya çalıştığı ancak sonrasında az da olsa değişimin olduğu görülmektedir.
- 8000-12000dk arasında 4000 dakikalık süre sonunda sapma oranı önemli ölçüde arttığı bu artışın zamansal yaşımsal zaman aralığı açısından ele alındığında yaklaşık 5,5 günlük süreden sonra hızlı bir artış ve azalış seyiri göstermiştir. Bu durum geçen süre sonunda GPS alıcının mevcut konumunun zamana (dünya dönüş durumuna bağlı olarak) göre kapsadığı uydu ağının değişmesine ve hava koşullarına bağlı olarak değişmiştir. Bu periyot süresince PLL devresine bağlı olan osilatörün sıcaklığı sık sık kontrol edilmiş ve ısı bir değişim veya kararsızlık görülmemiştir.
- 12000-22000dk aralığında ise sapma oranı daha yavaş şekilde artma ve azalma durumları gösterse de nihai olarak artmıştır. Genel olarak yaklaşık 10000 dakikalık (7 gün) süreçte PLL devresinde GPS değişimini algılayıp sistemin çıkışında görülmesi ve nanosaniye mertbesinde değerler elde edilmesi de sistemin lineerlik bazında yüksek karakteristiğe sahip olduğunu göstermektedir.
- 22000-35000dk aralığında zamansal olarak değişim küçük bir azalma görülmüştür. Azalma değeri yaklaşık 12~15 nanosaniye mertbesindedir. Genel olarak olumlu bir olarak karşımıza çıkmaktadır. Hem PLL devresi hemde GPS alıcı modülün kabiliyeti kapsamında sürekli olarak uydu

taraması ve maksimum hassasiyete göre sapma oranlarında azalma olması sistemin sürekli artan hata oranında olmadığını mevcut durum nezdinde sapmalarda azalma olabileceği de gözlemlenmiştir.

- 35000-38000 dk aralığında 8000-12000dk'lık aralıkta olduğu gibi yüksek bir sapma artışı eğiliminde olması ve sonrasında yine durağan duruma geldiği görülmektedir. GPS alıcının aldığı uydu sinyali sayısı ve alınan sinyallerin bazılarında kopmalar/iletişimsizlikler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hem GPS alıcı modülde hemde PLL devresindeki malzemelerin ısı ve gerilim değişimleri incelendiğinde kararlı halde olduğu görülmüştür.
- 38000-46000dk aralığında stabil bir durum sergilenmesine karşın sapma az da olsa görülmüştür. 46000dk dan sonra yüksek oranda bir sapma artışı görülmüştür.

30 gün boyunca GPS ve PLL sinyali arasındaki kayma değerinde yaklaşık 220 ns seviyesine kadar bir artma olduğu görülmüştür.

Ölçüm Metodu 2: GPS Sinyali Yok iken PLL Devresi Üzerinden Alınan Ölçümler

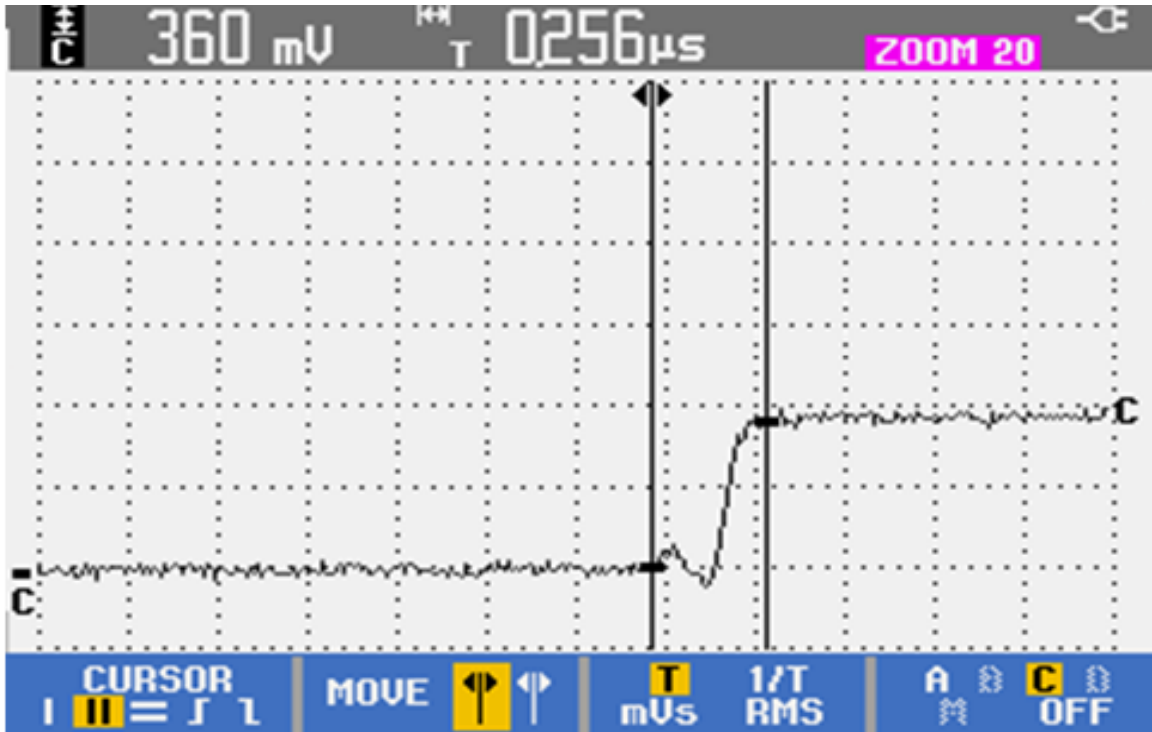


Şekil 38 : GPS yok iken PLL devresi zamanlama ve senkronizasyon deney düzeneği

Şekil 38'deki deney düzeneği temel alınarak ölçümler alınmıştır. Ölçüm düzeneğinde tüm modüller aktiftir. Ancak PLL devresinden OCXO modülüne giden VCO Feedback Signal (Frequency adjustment) bağlantısı kesilmiştir. Bu

şekilde yapıma amacı çalışma kapsamındaki mimaride GPS sinyalinin alınamaması durumunda oluşan sapmayı gözlemlemektir. Yani PLL devresinin doğal olarak OCXO devresi bir geri besleme yapamaması böylece sadece OCXO modülün ürettiği saat sinyalinin zamana göre sapma değerlerinin ölçümü yapmaktır.

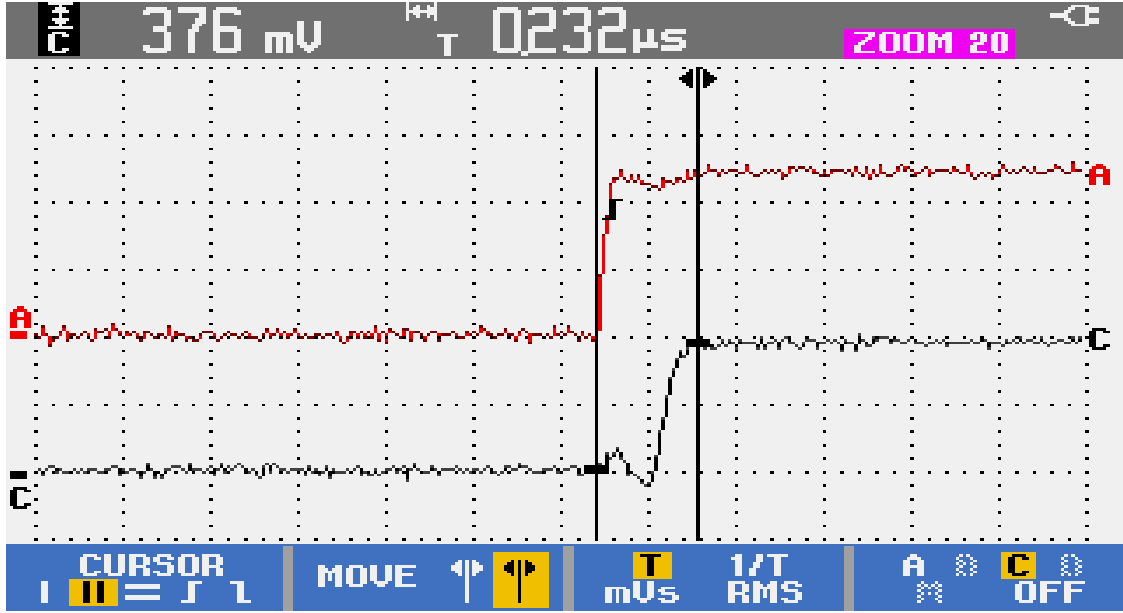
Şekil 50'de +5V DC besleme ile GPS modülü, PLL ve OCXO devresi çalışmaya başladıktan 15dk sonra PLL devresinin çıkışındaki sinyalin (Siyah renkli C ile gösterilmiş sinyal) yükselen kenarının RISE TIME değerini göstermektedir. Bu değer entegrenin kendi kararlılığı da göstermektedir. Yaklaşık iki katlık bir değişim olmasına karşın zamanla sinyal frekans değerlerinde bir değişim veya fazlarında bir oynama görülmemiştir. Bu durum ise PLL devresinin kararlı bir yapıda olduğu göstermiştir. Şekil 39'deki PLL devresinin çıkışındaki sinyalin yükselen kenarının RISE TIME değeri 256 ns'dir.



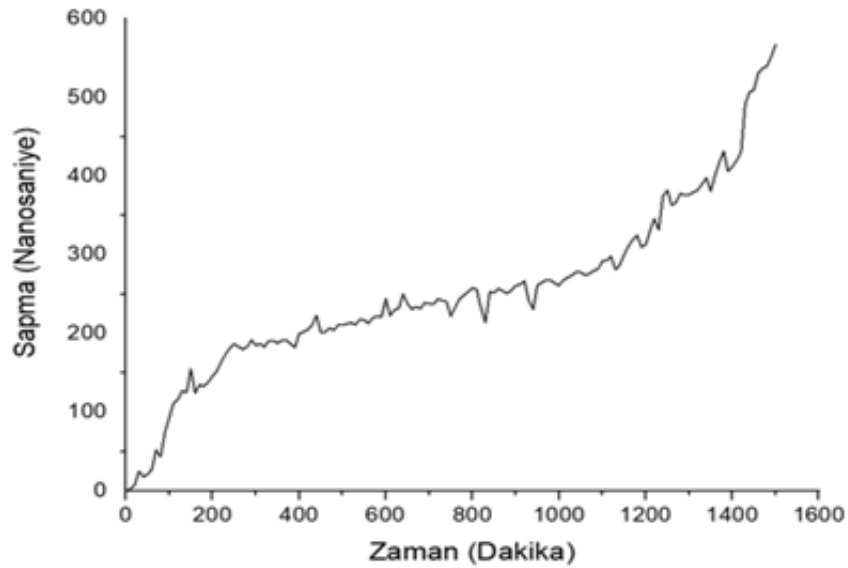
Şekil 39 : GPS modülü, PLL ve OCXO devresi çalışmaya başladıktan 15dk sonraki çıkış sinyalinin yükselen kenar süresi

Şekil 40'de GPS Modülünden gelen sinyal (kırmızı renkli) var iken osiloskop üzerinden bu kanalın ölçümü dondurulmuştur. İkinci yani sadece PLL ve OCXO modülü ile üretilen sinyal arasındaki değer(fark) 24 saat sonrasında artmış

şekilde gözlemlenmiştir. Test başladıktan 24 saat sonra ölçüm alındığında eldedilen bir değerdir. Bu değer ölçüldüğünde GPS Modülü, PLL devresi ve 10Mhz OCXO sinyal üretici 24 saat boyunca çalıştırılmıştır. Devrelerde fazladan ısınma vb herhangi bir aksi durum gözlemlenmiştir. Şekil 41'de ise sadece alınan ölçümler grafik haline getirilmiştir.



Şekil 40 : Sadece PLL ve OCXO devresi çalışmaya başladıktan 12 saat sonraki çıkış sinyalinin zaman kayması



Şekil 41 : 24 saat boyunca sadece PLL ve OCXO devresi sapma grafiği

Şekil 41 grafiği 24 saat boyunca GPS modülü, PLL devresi ve OCXO sinyal üretici yapısı sonucu oluşan kayma grafiğidir. Tüm yapıda GPS olmasına rağmen PLL devresi ile OCXO arasındaki frequency adjusment (Şekil 39) sinyali olmadığı için GPS sinyaline kilitlenmemiştir.

Böylece GPS sinyaline göre PLL çıkışındaki sinyalin zamanla sapma değişimlerinin ciddi oranda artmış olduğu gözlemlenmiştir;

- 1-100dk arasında PLL ve OCXO devresi ilk anda sapma oranı yavaş bir seyir izlemiştir.
- 100-300 dakikalık süre sonunda sapma oranı önemli ölçüde arttığı bu artışın temelinde OCXO sinyal üretici modülünün ısı kararlılığının olmaması nedeniyle sapma oranının hızlı bir şekilde arttığı düşünülmektedir.
- 300-1200dk aralığında ise sapma oranı ilk birkaç yüz dakikalık sürece göre daha yavaş şekilde ama başlangıç dönemine göre yaklaşık 4 kat artmış şekilde sapma olduğu görülmüştür.
- 1200-1500dk aralığında zamansal olarak değişim logaritmik dereceye yakın bir seyirde artış göstermiştir. Yaklaşık olarak sapma durumu ilk başlangıç zamanına göre 6 kat yükselmiştir.

Şekil 38'deki deney düzeneğinde PLL devresinden OCXO modülüne giden VCO Feedback Signal (Frequency adjustment) bağlantısı kesilmiştir. Bu şekilde yapılan çalışmada 24 saat içerisinde sapma değeri 600 ns seviyesine kadar ulaşmıştır ve normal aralığın üstüne çıkmıştır.

Bu değer 30 gün sonunda sistemleri büyük ölçüde hataya sürükleyecek derecede saptmaya uğratacağı düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması kapsamında; GPS sisteminin genel çalışma ilkeleri çalışılmış, GPS sinyal yapısı incelenmiş, GPS alıcı yapıları ve bileşenleri araştırılmıştır. Modüler GPS alıcılarından elde edilen zaman sinyalinin zamansal sapma/kayma performansları incelenmiş GPS kontrollü saat tabanlı zaman sinyali referans tutularak yeni bir zaman sinyali elde edilmiştir.

GPS modülü, PLL devresi ve OCXO sinyal üreteç birimlerini kapsayan bir yapıdır. GPS uydusundan gelen bilgiler ile U-CENTER arayüzü ve modül üzerindeki zaman bilgisini veren bir çıkış ile tam olarak 1sn'lik periyotlarda bilgi akışı almamızı sağlamıştır. Bu 1 sn'lik sinyal ile OCXO modülünden alınan sinyal PLL devresi ile GPS sinyali üzerinden disipline edilmiş yeni bir atomik saat hassaslığında saat sinyali elde edilmesi sağlanmıştır.

GPS üzerinden disipline edilmiş zamanlayıcı yapıları bazında bakılacak olursa: GPS sinyali alınan uydulardaki zaman saati her biri ile senkronizedir. GPS komuta merkezi tarafından güncellendiği için modüle gelen sinyal hangi GPS uydusundan gelirse gelsin mesaj/data setleri arasında ve içeriğindeki zaman bilgisi aynı olacaktır.

Benzer şekilde GPS komuta merkezi ile güncellenen zaman bilgileri NTP vb ethernet altyapılarında da kullanılmaktadır ancak bölgesel mesafeler nedeniyle yine uydu tabanlı zamanlama ve senkronizasyon ihtiyacı doğduğu için bu ele alınan yapı ethernet altyapısı olmayan veya zaman kaçıklığı olan yerlerde/sistemlerde daha kullanılabilir bir mimari olanağı sunmaktadır.

PLL devresinde az sayıda lojik yapı sayesinde sinyallerin işlenmesi noktasında minimum zaman kaybı olması amaçlanmıştır. Bu sayede GPS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon sistemlerinde istenen ve maliyet etkin yapısı da elde edilmiştir. Yapılan ölçümlerde nanosaniyeler mertebesinde sapma/zamansal kaymalar gözlemlenmiş kabul edilebilir doğruluk ve hassaslıkta sonuçlar alınmıştır.

GPS modüllerinde özellikle zamanlama ve senkronizasyon özelliği olması, yazılımsal GPS zamanı elde etme haricinde birçok algoritmayı da barındırması nedeniyle GPS modülü üzerinden alınan 1pps'lik sinyal kalitesi zamanlama doğruluğunu yüksek oranda etkilemektedir. Çünkü hem GPS sinyalleri üzerinden zaman hesaplaması hem de UBX-NAV-DOP mesajı üzerinden 3 boyutlu hassas konumlama kalitesi ve UBX-TIM-TP üzerinden de GPS zamanı elde edilebilmesi çift yönlü şekilde doğrulama imkanı sağlamaktadır.

GPS modülü ile OCXO modülünden gelen sinyallerin kenetlenmesi sonucu oluşan yeni sinyalde herhangi bir gürültü veya bozulma olmadığı, seçilen 10Khz'lik çalışma frekansının PLL devresini uzun zamanda bile herhangi bir kararsızlık bölgesine sürüklediği görülmüştür.

Buradan hareketle; GPS modüllerinde özellikle ayarlanabilir pulse (1PPS) verme kabiliyeti olan modüllerin bu tasarımda ek bir frekans dönüştürücüye ihtiyaç kalmadan kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

PLL devresi temelinde ilk etapda 10Khz'lik iki sinyalin birbirine kenetlenme işlevini yerine getirdiği ve referans GPS sinyalindeki değişimlerin algılanıp çıkış sinyalinin kendini güncellediği ve referans sinyalden sapma (faz ve frekans) yapmadığı görülmüştür.

İkinci etapta yine ölçüm düzeneğindeki tüm modüller aktiftir. Ancak tasarımdaki PLL devresinden OCXO modülüne giden VCO Feedback Signal (Frequency adjustment) bağlantısı kesilmiştir. Böylece GPS sinyalinin alınamaması durumunda oluşan sapma incelenmiştir.

GPS sinyallerinin kesilmesi durumu dahil olmak üzere saat ve gün bazında ölçümler alındığında OCXO modülünün aylık bazda yaklaşık 30 ppb yani 1.000.000.000 atımda(pulse) sadece 30 ppb sapma olacağı (yani her 37 ay 21 günde 3 saniye) üretici bilgilerinde verilse de bu sapma verilen değerlerin biraz üzerinde çıkmıştır.

Zamansal sapma bazında oluşan artışın seyri çok fazla lineer olmamakla birlikte belirli zaman aralıklarında yavaş artışlarla devam etmiştir. Bunun nedeni modülün üretim sonrası karakteristik değişimi veya ortam farklılığından olduğu düşünülmektedir. Bu duruma rağmen alınan veriler bazında oldukça az seyiren sapma durumları oluşmuştur.

GNSS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon çalışması kapsamında bu alanda birçok uygulama, yazımsal ve donanımsal sistemler/mimariler mevcuttur. Tüm bunların kullanılabilirliği değişken olmakla birlikte maliyet odaklılık gibi harici parametreler de her sisteme/ekipmana ulaşmayı kısıtlamaktadır. Bu durum dikkate alınarak, daha da geliştirilebilir bir mimari bakışının ilklendirmesi sayılabilecek bu çalışmanın genel olarak hassaslık ve doğruluk ölçümleri bazında havacılık ve astronomik mimariler olmak üzere birçok noktada referans zaman sinyali üretici ihtiyacını gidermek için oldukça iyi bir platform olduğu değerlendirilmektedir.

GNSS tabanlı zamanlama ve senkronizasyon anlamında kullanıcılar ortak zaman sağlayıcı ihtiyacı temel alınmıştır. Çalışma kapsamında bu ihtiyacı gidermesi açısından oldukça iyi sonuçlar verdiği ve kayma ve faz değişimi gibi durumlarda da beklenen aralığın içinde kaldığı görülmüştür.

GPS sinyali olmadan mimarideki zaman sapmaları belirli bir süre atomik saate yakın değerler göstermiştir. Ancak OCXO yapısı dolayısıyla 1 günlük süre sonunda sapmalarda artış gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sayesinde GPS sinyali olmadığı durumlarda çalışmadaki yapının uzun süreli olarak zaman sinyali sağladığı görülmüştür. Zaman sinyali tabanlı sistemler ve birçok noktada kullanılabilir bir sistem olduğu değerlendirilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] B. H. Wellenhopf, H. Lichtenegger, and E. Wasle. GNSS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Wien, New York, 2008.
- [2] GPS Yapısı, <https://tr.wikipedia.org/wiki/GPS> (Temmuz, 2020), Erişim tarihi: **27/03/2021**
- [3] Kaplan, Elliott D., Understanding GPS, Principles and Applications, Boston – London, Artech House, 1996
- [4] Kahveci, Doç. Dr. Muzaffer, Yıldız, Prof. Dr. Ferruh, Global Konum Belirleme Sistemi, Teori – Uygulama, Nobel Yayın Evi, 2005
- [5] GPS Uydu Yapısı ve Bileşenleri, <https://www.elektrikport.com/universite/gps-nedir-yapisi-ve-uygulamalari/4276#ad-image-0>, Erişim tarihi: **12/03/2021**
- [6] GPS Yapısı ve Detayları, <https://320volt.com/gps-incelemesi-ozellikleri-kullanim-alanlari-detaylar/>, Erişim tarihi: **02/04/2021**
- [7] GNSS Uydu Yapıları, <https://jeodezi.boun.edu.tr/sites/jeodezi.boun.edu.tr>, Erişim tarihi: **27/03/2021**
- [8] DAGR- Defense Advanced GPS Receiver, https://en.wikipedia.org/wiki/Defense_Advanced_GPS_Receiver, Erişim tarihi: **15/05/2022**
- [9] GPS Arayüz Yapısı, <https://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/icd200/ICD200Cw1234.pdf>, Erişim tarihi: **10/09/2021**
- [10] L1 GPS Taşıyıcısının Yayılmış Spektrumu ve Kod Modülasyonu, <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1753>, Erişim tarihi: **03/07/2021**
- [12] Legal Time of the Republic of Colombia and its international traceability using the Cesium Atomic Clock – Time and Frequency National Standard, 5th Colombian Conference of Engineering Physics (V CNIF), June 2017

- [13] GPS Sinyali Yapısı, <https://www.sharetechnote.com/html/LBS.html>, Erişim tarihi: **03/07/2021**
- [14] P. Rochat, F.Droz, Q.Wang, S.Froidevaux :Atomic Clocks and Timing Systems in Global Navigation Satellite Systems, April 2012
- [15] Zaman Ölçekleri, <https://stjarnhimlen.se/comp/time.html>, Erişim tarihi: **10/10/2021**
- [16] Koordineli Evrensel Zaman ,
https://stringfixer.com/tr/Universal_Time_Coordinated, Erişim tarihi: **22/06/2021**
- [17] Osilatör Sinyal Yapısı, <https://portal.u-blox.com/s/question/0D52p00008LPqmICAT/at-the-pulse-time-will-be>, Erişim tarihi: **10/04/2021**
- [18] Osilatörler ve Yapıları, <https://www.education.psu.edu/geog862/node/1738>, Erişim tarihi: **23/04/2021**
- [19] Osilatörler ve Saat Düzeltmeleri, <https://www.education.psu.edu/geog862/node/1758>, Erişim tarihi: **22/06/2021**
- [20] Hassas Zaman Protokolü Yapısı,
https://tr.wikipedia.org/wiki/Hassas_Zaman_Protokolü, Erişim tarihi: **19/04/2021**
- [21] Zaman ve Senkronizasyon,
<https://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS3240/v19/lecturenotes/I11--time-and-synchronization.pdf>, Erişim tarihi: **10/10/2021**
- [22] Tusaga-Aktif Sistemi İletişim Yapısında Kullanılan NTRIP Ve RTCM Formatları İle Veri Setleri Yapısı
- [23] Osilatörler ve Yapıları, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Osilator>, Erişim tarihi: **08/03/2021**
- [24] GPSDO Özellikleri, <https://www.furuno.com/en/gnss/technical/gnssdo>, Erişim tarihi: **14/04/2021**
- [25] Osilatör Çeşitleri ve Karşılaştırmaları,
http://www.interfacebus.com/Temperature_Controlled_Oscillator_Manufacturers.html, Erişim tarihi: **23/04/2021**
- [26] Legal Time of the Republic of Colombia and its international traceability using the Cesium Atomic Clock – Time and Frequency National Standard, 5th Colombian Conference of Engineering Physics (V CNIF)

- [27] OCXO 10MHz Oscillator Performans Analizi,
<https://www.quartzpro.com/tcxofacts.html> Erişim tarihi : 23/04/2021
- [28] GPSDO Yapısı ve Kapsamı,
https://en.wikipedia.org/wiki/GPS_disciplined_oscillator, Erişim tarihi:
08/03/2021
- [29] U-BLOX GPS Receiver, <https://m.n11.com/gy-gpsv1-ublox-neo-8m-gps-modul-P508887714?magaza=crobotic>, Erişim tarihi: **01/05/2021**
- [30] U-BLOX GPS Receiver, <https://forum.arduino.cc/t/neo-6m-i2c/682600/2>,
Erişim tarihi: **01/05/2021**
- [31] OCXO 10MHz Oscillator Circuit, <https://turkish.alibaba.com/product-detail/10MHz-2-5M-1M-100K-10K-160021-0433369>, Erişim tarihi: **04/05/2021**
- [32] CD4046 Integrated PLL Circuit, <https://www.ti.com/product/CD4046B#tech-docs> Erişim tarihi : 03/08/2021
- [33] Pasif Filtreler, <https://www.electronicshub.org/passive-low-pass-rc-filters/>
Erişim tarihi : **23/08/2021**
- [34] DATUM Sistem Yapısı, https://jeodezi.boun.edu.tr/sites/jeodezi.boun.edu.tr/JEODEZI_BUKRDAE_GED.Pdf, Erişim tarihi: **20/04/2021**
- [35] WGS84 Yöntemi, <https://tr.wikipedia.org/wiki/WGS84>, Erişim tarihi:
20/04/2021
- [36] CD4046B Phase-Locked Loop: A Versatile Building Block for Micropower Digital and Analog Applications, Application Report SCHA002A - February 2003, page 16
- [37] J. Roy, T.L. Venkatasubramani, B.C. Joshi : Phase Stability and GMRT's Frequency Standards-2004, Chapter 2