

GPS L1 Signal Simulation and Interface Design

 Ahmet Esat SÜZER^{1,*} Hakan OKTAL¹
¹Eskisehir Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Avionics, 26470, Tepebaşı/ESKİŞEHİR

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 25/01/2019

Revision 02/04/2019

Accepted: 16/04/2019

Highlights

- GPS civil signal simulation.
- Satellite signal processing.
- Flexible interface design

Keywords

 GPS
 Satellite Based Positioning
 Satellite Signal Simulation
 User Interface Design

The use of satellite-based positioning systems such as Global Positioning System (GPS) has become increasingly popular and these systems are becoming more and more common in all transportation modes, especially in air transportation. In this study, the simulation of GPS L1 civil signal is implemented and the user interface is designed to visualize the results and signal outputs. Signal processing techniques used in the simulation are implemented by means of MATLAB (Matrix Laboratory) R2015b and finally an interface is designed by using MATLAB-GUI (Graphical User Interface) to display the analyses results and the calculated receiver position. It is possible to analyze the signal output of each stage from the generation of the satellite signal to the decoding of the navigation message at the receiver. Since the developed user interface is flexible, it can also be used for testing and analyzing the performance of new signal processing technics on satellite-based navigation systems.

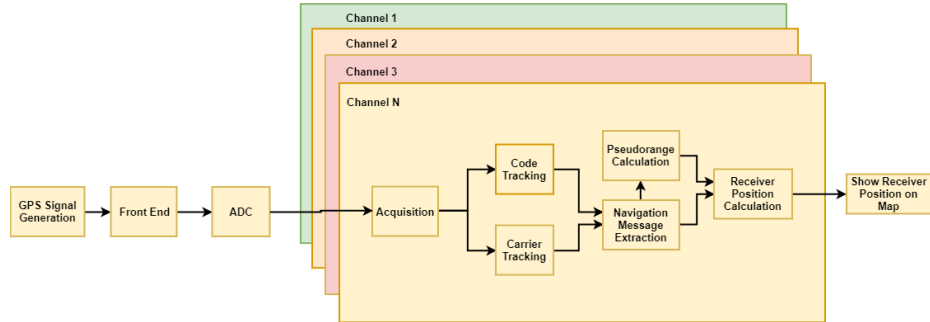


Figure A. Block diagram of GPS L1 signal simulation

Purpose: The aim of this study is to simulate GPS L1 civil signal and to design the user interface in order to explore working principle of the system and to analyze the effects of receiver clock error, Doppler frequency shift and medium noise on the accuracy of calculated receiver position.

Theory and Methods: GPS L1 signals are generated and broadcasted by the satellites. These signals reach to the receivers from the satellites in a noisy environment with Doppler frequency shifted and with delay. In receiver stage, after the coming signals are demodulated, navigation message which contains the data for the calculation of receiver position is obtained.

Results: In order to investigate the effect of noise on position error, the receiver position is calculated by adding the various signal to noise ratio (SNR) values to the GPS L1 signal. The simulation results show that, as the SNR of the signal decreases, the receiver position error increases. Also, the receiver position cannot be calculated after the specific SNR value.

Conclusion: In this study, almost all stages of GPS L1 signal processing are comprehensively simulated in MATLAB environment. In this framework, each stage from the generation of the satellite signal to the decoding of the navigation message at the receiver is implemented. When the simulation process is evaluated, it is observed that the receiver position error changes directly depending on SNR value of the received signal, also the receiver clock error and Doppler frequency shift contribute to this error partially. This study also enables to test new technologies and to analyze performance of different signal processing techniques used in satellite-based global positioning systems such as GPS, GLONASS, Galileo and Beidou.



GPS L1 Sinyal Simülasyonu ve Arayüz Tasarımı

Ahmet Esat SÜZER^{1,*} Hakan OKTAL¹

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, 26470, Tepebaşı/ESKİŞEHİR

Öz

Bu Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System-GPS) gibi uydu tabanlı konum belirleme sistemlerinin, başta hava taşımacılığı olmak üzere, tüm taşımacılık türlerinde kullanımı her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmanın amacı, GPS L1 sinyalinin simülasyonu ve kullanıcı arayüzü tasarımını gerçekleştirerek sistemin çalışma prensibinin tanıtılması yanında ortam gürültüsü, Doppler frekans kayması, alıcı saat hatası gibi faktörlerin alıcıda konum hesaplama hassasiyeti üzerine etkilerini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda öncelikle uydulardan yayınlanan L1 sinyali üretilmiş ve daha sonra üretilen sinyallere ortam gürültüsü eklenerek alıcıya ulaşması sağlanmıştır. Alıcıya gelen sinyallerin demodülasyon işlemi sonucunda kullanıcının konum belirlemesine yardımcı olacak bilgileri içeren seyrüsefer mesajı elde edilmiştir. Simülasyonda kullanılan sinyal işleme teknikleri, MATLAB (Matrix Laboratory) R2015b programlama dili aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise alıcının gelen sinyallerden elde ettiği sonuçların ve konum bilgilerinin sunulabilmesi amacıyla MATLAB-GUI (Graphical User Interface) kullanılarak bir arayüz tasarlanmıştır. Geliştirilen arayüz ile kullanıcının hesaplanan ve gerçek konumunu harita üzerinde gösterilebilme ve alıcıda farklı sinyal işleme adımlarına ait dalga formlarını inceleyebilme imkânı sunulmuştur. Geliştirilen arayüz esnek bir yapıya sahip olup, uyduya dayalı küresel konum belirleme sistemlerinde yeni sinyal işleme tekniklerinin denenmesi ve performanslarının analiz edilmesi amacı ile de kullanılabilir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 25/01/2019
Düzeltilme: 02/04/2019
Kabul: 16/04/2019

Anahtar Kelimeler

GPS
Uyduya Dayalı Konum Belirleme
Uydu Sinyal Simülasyonu
Kullanıcı Arayüz Tasarımı

Keywords

GPS
Satellite Based Positioning
Satellite Signal Simulation
User Interface Design

GPS L1 Signal Simulation and Interface Design

Abstract

The use of satellite-based positioning systems such as Global Positioning System (GPS) has become increasingly popular and these systems are becoming more and more common in all transportation modes, especially in air transportation. The aim of this study is to simulate GPS L1 civil signal and to design the user interface in order to explore working principle of the system and to analyse the effects of receiver clock error, Doppler frequency shift and medium noise on the accuracy of calculated receiver position. In this framework, first of all, L1 signal transmitted by the satellites is generated and then these signals are transferred to the receiver by interfering with the noise. In receiver stage, after the coming signals are demodulated, navigation message which contains necessary information for the calculation of receiver position is obtained. Signal processing techniques used in the simulation are implemented by means of MATLAB (Matrix Laboratory) R2015b and finally an interface is designed by using MATLAB-GUI (Graphical User Interface) to display the analyses results and the calculated receiver position. By using designed interface, it is possible to display the calculated and the real receiver positions on the map and to analyse the signal waveforms related to different signal processing stages in receiver. Since the user interface developed is flexible, it can also be used for testing and analysing the performance of new signal processing technics on satellite-based navigation systems.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1990'lı yılların başından itibaren popüler olmaya başlayan küresel uydu seyrüsefer sistemleri (Global Navigation Satellite Systems-GNSS) günümüzde hem sivil, hem askeri birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Önceleri sadece askeri amaçlı kullanılan uydu temelli seyrüsefer sistemleri, zaman içerisinde sivil kullanıma da açılmış, tüm ulaşım türlerinde küresel boyutta seyrüsefer yardımcısı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Farklı ülkeler tarafından geliştirilmiş uydu temelli küresel konum belirleme sistemlerinden birisi de ABD tarafından geliştirilen GPS'tir. Başlangıçta 21 operasyonel 3 yedek toplam

24 uydu ile hizmet vermesi planlanan sistem, şimdilerde toplam 31 operasyonel uydu ile kullanıcılarına hizmet vermektedir. Günümüzde GPS uyduları, mevcut L1 (1575,42 MHz) ve L2 (1227,60 MHz) frekansına ilave olarak L5 (1176,45 MHz) frekansının da eklenmesi ile toplam üç farklı frekanstan yayın yapmaktadır.

GPS uzay, kontrol ve kullanıcı olmak üzere üç temel bölümden meydana gelir. Uzay bölümü, kullanıcılara üç boyutlu konum ve hızlarını hesaplamalarına yardımcı olan seyrüsefer bilgilerini gönderen uydulardan oluşur [2]. Kullanıcı bölümü sivil ve askeri amaçlı zaman, konum ve hız bilgilerini sağlayan alıcılardan oluşur. Kontrol bölümünün ana işlevi uydu saatlerini ayarlama, uydu yörüngelerinde meydana gelen sapmaları düzeltme, GPS uydularını izleme, seyrüsefer mesajının içeriğinde oluşan hataları düzeltip güncelleme, uyduların saat hatalarını belirleme ve düzeltme, batarya şarj durumunu, yörünge bilgilerini, uydu sağlık durumunu ve doğru çalışıp çalışmadığını kontrol etme olarak sıralanabilir [3]. Diğer görevi ise uydularda herhangi bir problem yaşandığında yedek uyduyu devreye sokmaktır [4].

Bu çalışmanın amacı, uydudan yayınlanan GPS L1 sivil sinyalinin üretiminden faydalı seyrüsefer bilgisine dönüştürülene kadar geçen süreçteki işlem adımlarını içeren bir kullanıcı arayüzü tasarlayarak ortam gürültüsü, alıcı saat hatası, Doppler frekans kayması gibi hesaplanan konum bilgisinin hassasiyetini etkileyebilecek faktörlerin analiz edilmesidir. Bu doğrultuda öncelikle kullanıcı tarafından seçilen dört uyduda L1 sinyali üretilmiş ve daha sonra üretilen sinyallere ortam gürültüsü, alıcı saat hatası ve Doppler frekans kaymaları eklenerek konum hesaplama işlemi başlatılmıştır. Alıcıya gelen sinyallerin demodülasyon işlemi sonucunda kullanıcı için son derece önemli bilgiler içeren seyrüsefer mesajı elde edilmiştir. Simülasyonda kullanılan sinyal işleme teknikleri, MATLAB R2015b programlama dili aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Son aşamada da alıcının gelen sinyallerden elde ettiği sonuçlar ve konum bilgilerinin sunulabilmesi amacıyla MATLAB-GUI kullanılarak, elde edilen analiz sonuçları görselleştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen arayüz ile kullanıcının hesaplanan ve gerçek konumunun harita üzerinde karşılaştırılabilmesi imkânı sağlanmış, uydu sinyalinin üretiminden alıcıda seyrüsefer mesajının elde edilmesine kadar olan süreçte gerçekleştirilen işlemlere ait sinyal çıktılarını inceleme imkânı sunulmuştur.

GPS sinyali ile ilgili yazılım tabanlı çalışmalar incelendiğinde, çoğunlukla gerçek GPS sinyali için alıcı tasarımı, alıcıda seyrüsefer mesajının elde edilmesi, uydu sinyalini yakalama ve izleme konuları üzerine odaklanılmıştır. Elango vd. [5], çalışmalarında çoklu yol etkisini de dikkate alarak gerçek GPS sinyalinden yazılım tabanlı seyrüsefer mesajını elde etmişlerdir. Abhishek vd. [6], Zubaroğlu [7], Akopian vd. [8], Günaydn [9] ve Dong [10], GPS L1 C/A sinyali için gerçek GPS sinyallerini kullanarak sinyal yakalama ve izleme aşamalarını da kapsayan yazılım tabanlı bir alıcı tasarlamışlardır. Kassas vd. [11], LabVIEW programlama dilini kullanarak GPS sinyal yakalama ve izleme aşamalarını yazılım tabanlı olarak gerçekleştirmiş, Ma vd. [12] ise yaptığı simülasyon ile gerçek ve yazılım tabanlı oluşturulan GPS sinyallerini kullanarak yakalama ve izleme performanslarını incelemiştir. Bright [13], GPS L2 C sinyalinin yakalama ve izleme aşamalarını MATLAB ortamında gerçekleştirmiş ve L1 alıcısına göre performansını karşılaştırmıştır. Rao vd. [14], GPS ve Galileo sinyallerini eş zamanlı olarak işleyebilen yazılım tabanlı bir alıcı geliştirmiştir. Campana vd. [15], GPS/Galileo için SIMULINK ortamında gürültü etkisini de dikkate alarak verici ve alıcı aşamalarını gerçekleştirmiştir. Borre vd. [16], GPS ve Galileo L1 sinyalini SIMULINK ortamında, Aguilar [17] ise MATLAB ve VHDL kullanarak üretmiştir. Guo vd. [18], donanımsal olarak elde edilen Ara Frekans (Intermediate Frequency-IF) sinyalini gecikme zamanı, Doppler frekans kayması, gürültü gibi etkileri dikkate alarak üretmiş ve gerçek GPS IF sinyali ile karşılaştırarak simülasyonun doğruluğunu test etmiştir.

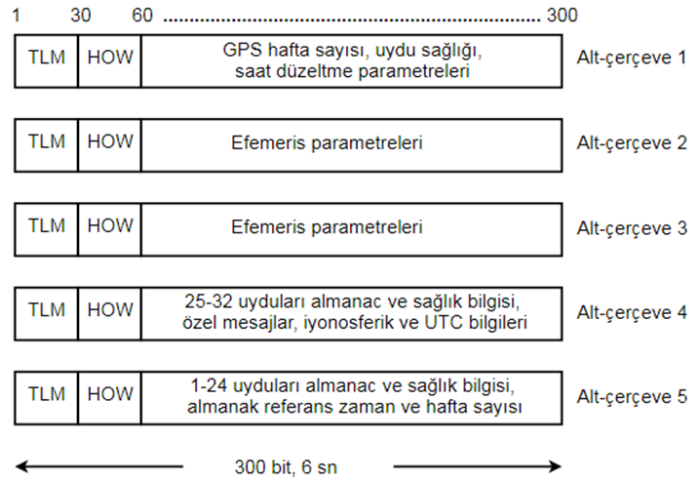
Yapılan çalışmalardan da görüleceği üzere, uydu seyrüsefer sistemlerinin verici ve alıcılarında yazılım tabanlı sinyal üretimi ile ilgili olarak sinyal simülasyonundan çok, gerçek uydu sinyali kullanılarak alıcı tasarımı üzerine odaklanılmıştır. Yapılan bu çalışmada ise GPS L1 sinyalinin üretimi ve alıcıda çözümlenmesi yanında geliştirilen arayüz sayesinde deneysel bir analiz ortamı yaratılarak farklı sinyal işleme tekniklerinin ve algoritmalarının denenmesi imkânı yaratılmıştır.

2. GPS SİNYAL YAPISI (GPS SIGNAL STRUCTURE)

GPS kullanıcılarına, dünya üzerindeki her noktada, her türlü hava koşulunda, kesintisiz olarak ve yüksek doğrulukta 3 boyutlu konum, hız ve zaman bilgilerini sağlar [7]. Her GPS uydusu L1 ve L2 frekansında yayın yapar. L5 ise yeni nesil Block IIF uydularından yayınlanan sivil amaçlı yeni bir sinyal olup, hava araçlarının güvenliği amacıyla kullanılması planlanmaktadır. GPS uydularının kullanıcılarına gönderdiği sinyal, herhangi bir bilgi içermeyen Sözde Rasgele Gürültü (Pseudo Random Noise-PRN) kodu ve seyrüsefer mesajından oluşur.

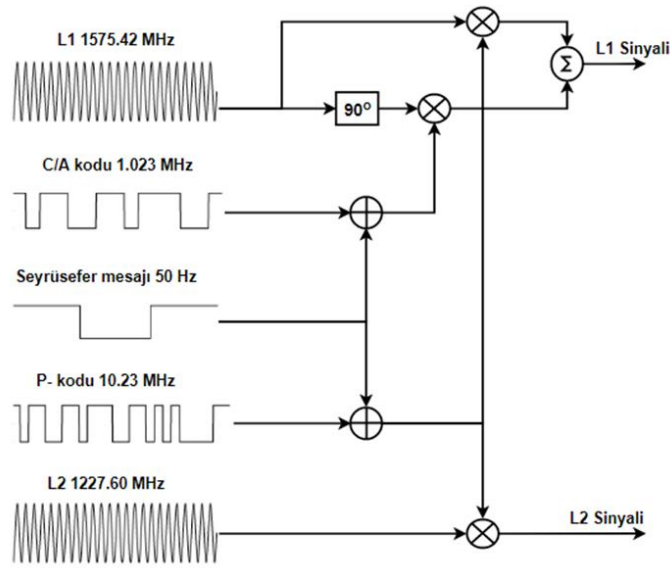
0 ve 1 sayılarından meydana gelen PRN kodu, rasgele bir sayı dizisine benzemekte olup belirli bir algoritma veya kurala göre kayan yazmaç (shift register) kullanılarak üretilir [19]. Uydularda PRN kodları kayan yazmaçlardaki farklı hücrelerden alınan çıkış bitleri sayesinde birbirinden farklılık gösterir [19]. PRN kodları sadece sinyalin alındığı uyduyu belirlemez, bunun yanında alıcı ve uydu arasındaki mesafeyi hesaplamak için de kullanılır. Geleneksel GPS uydularında iki farklı PRN kodu bulunur. Birincisi sivil kullanıcılar için C/A kodu (Coarse Acquisition), diğeri ise askeri uygulamalar için P- (Precision) kodudur. L1 taşıyıcı frekansı üzerine sözü edilen iki PRN kodu ve seyrüsefer mesajı bindirilir. L2 taşıyıcı frekansı ise yalnızca P kodu ve seyrüsefer mesajından oluşur [2,7].

Seyrüsefer mesajı, kullanıcıya görünür uyduların hassas konumunu ve iletilen sinyalin zamanını hesaplamak için önemli bilgiler sağlar, aynı zamanda mesafe ölçüm hatasını etkileyen birçok hata kaynağı ile ilgili düzeltmeler içerir [4]. Veri hızı 50 bps (bit per second) olan seyrüsefer mesajı, 1500 bit uzunluğa sahip çerçevelerden (frame) oluşur. Bir çerçevenin iletim süresi 30 saniyedir. Her bir çerçeve beş alt-çerçeveye (sub-frame) ayrılır. Bir alt-çerçeve 300 bit uzunluğunda ve süresi 6 saniyedir. Her bir alt-çerçeve 30 bit uzunlukta on kelimededen (word) oluşur [2]. Alt-çerçeve 1, 2 ve 3 her çerçevede sürekli olarak tekrar eder. Fakat alt-çerçeve 4 ve 5'de aynı yapıya sahip farklı veriler içeren toplam 25 sayfadan (page) oluşur. Seyrüsefer mesajının tamamının alınması için gerekli süre 12,5 dakikadır [16]. Şekil 1'de çerçeve, alt-çerçeve ile kelimelerin yapısı ve içerdikleri seyrüsefer mesajı gösterilmektedir.



Şekil 1. Seyrüsefer mesaj yapısı

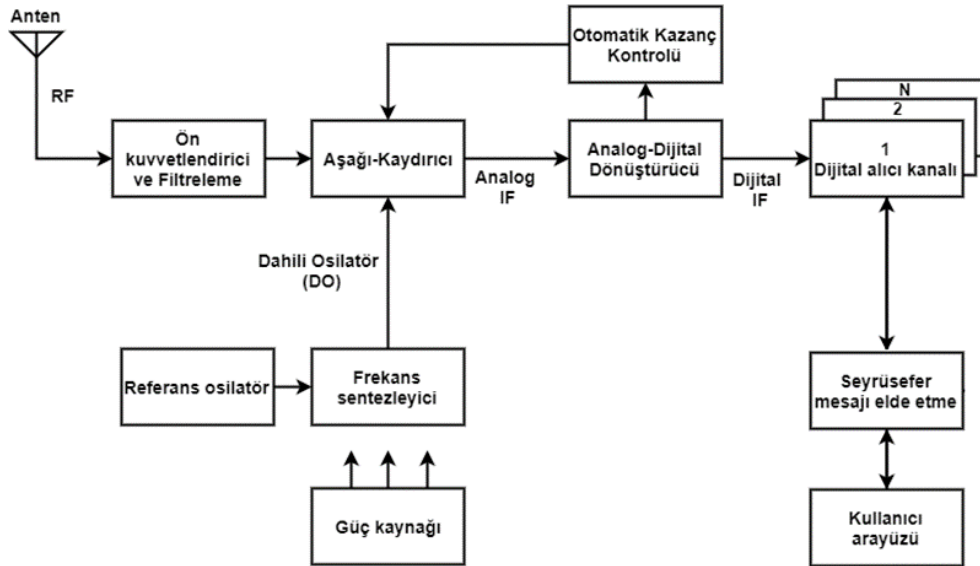
GPS uydularında PRN kodu ve seyrüsefer mesajından oluşan L1 ve L2 sinyalini kullanıcılarına iletmek için bir faz modülasyonu türü olan İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying-BPSK) tekniği kullanılır. Kısaca BPSK, giriş sinyalinin 0 ve 1 olmasına bağlı olarak taşıyıcı sinyalin fazının 180° değiştiği modülasyon türüdür. Taşıyıcı sinyalin fazında değişim gerçekleşebilmesi için BPSK modülasyonunda 0 ve 1 ikili sayılarının Sıfıra Dönmeyen Kodlama (Non-Return-to-Zero Encoding) ile -1 ve 1 sayılarına çevrilmesi gerekir. Söz konusu dönüşüm gerçekleştiği takdirde 1 değeri -1 olarak, 0 değeri ise +1 olarak elde edilir. GPS L1 sinyali C/A ve P-kodları ile seyrüsefer mesajından oluşurken, L2 sinyali sadece P-kodu ve seyrüsefer mesajından oluşur. GPS sinyalinin üretimini gösteren blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere, L1 sinyali hem C/A kodlu, hem de 90° faz farklı P- kodlu seyrüsefer mesajından oluşurken, L2 sinyali sadece P- kodlu seyrüsefer mesajını içerir.



Şekil 2. GPS bileşke sinyal üretimi

3. GPS ALICI YAPISI (GPS RECEIVER STRUCTURE)

GPS alıcısı, GPS uydularının yayınladığı sinyali alıp kullanıcının konum, hız ve zaman bilgilerini hesaplayan aygıtlardır. Geçmişte GPS alıcıları sadece donanımsal olarak üretilirken, günümüzde yazılım tabanlı alıcıların üretimi de her geçen gün artmaktadır. Alıcıda, uydulardan gelen sinyali kullanıcı açısından faydalı bilgiye dönüştürme işlemi çeşitli basamaklardan oluşur. Bu basamaklar genellikle bütün alıcı yapılarında aynı olmasına rağmen tasarım kriterlerine göre bazı farklılıklar gösterebilmektedir. Şekil 3’de genel bir GPS alıcı blok şeması verilmiştir.



Şekil 3. GPS alıcı blok şeması

GPS sinyalleri dairesel polarizasyonlu olup, sağ el polarizasyona sahip antenler ile alınır. Antenden gelen sinyalin gücü oldukça düşüktür. Bu yüzden alıcılarda genellikle antenden sonra sinyal gücünü artırmak için ön kuvvetlendiriciler kullanılır. Radyo frekans (Radio Frequency-RF) sinyalinin frekansı çok yüksek olmasından dolayı alıcıda işlem yapmak oldukça zordur. Bunun üstesinden gelmek için Aşağı Kaydırıcı (Down-Converter) kullanılarak aynı sinyal daha düşük frekans değeri olan IF sinyaline dönüştürülür. Bu işlem sonucunda sinyalin içeriğinde bir değişiklik olmayıp sadece gelen sinyal, daha düşük bir frekans değerine indirilir.

Analog bir sinyalin işlenmesi çok karmaşık ve donanım gerektiren bir durum olduğu için Analog-Sayısal Dönüştürücüler (Analog to Digital Converter-ADC) aşağı kaydırma işleminden gelen analog IF sinyalini sayısala dönüştürür ve sinyal işleme tekniklerinin daha rahat kullanımına olanak sağlar [20]. Otomatik Kazanç Kontrolü (Automatic Gain Control-AGC) ise, ADC'deki bit sayısını en etkili şekilde kullanmak üzere giriş dalga formunun seviyesini ADC'ye göre ayarlamak için kullanılır [20]. ADC çıkışında elde edilen sayısal IF sinyalin hangi uydudan geldiğinin belirlenmesi ve takibi için alıcının kapsama alanındaki her bir sinyal bir kanala alınarak analiz edilmeye başlanır. Alıcı tarafından görünür durumdaki uydulardan gelen sinyallerin kod gecikmesinin ve taşıyıcı frekansının belirlenmesi aşaması, sayısal alıcı kanalları içerisinde gerçekleştirilir [16]. Uydudan gelen sinyalin frekansı Doppler etkisinden dolayı nominal değerinden farklılık gösterir. Uydular açısından dünya üzerindeki sabit kullanıcı için en fazla ± 5 kHz, mobil kullanıcı için ise ± 10 kHz frekans kayması meydana gelir.

Uydu ile kullanıcı arasındaki mesafeden dolayı gelen sinyal belirli bir gecikme ile alınır. Bunun sonucunda gelen sinyal içerisinde yer alan PRN kodunda gecikme meydana gelir. Bu durum kod gecikmesi olarak adlandırılır. Sinyalin alıcıya ulaştığı anda 1023 çip uzunluğundaki PRN kodunda meydana gelen gecikmenin belirlenmesi hem sinyalin doğru olarak çözülmesi, hem de alıcı ile uydu arasındaki mesafenin doğru olarak hesaplanması açısından son derece önemlidir [8]. Uydudan gönderilen sinyal frekansındaki değişim ve kod gecikmesini belirlemek için farklı korelasyon teknikleri kullanılır [16]. Uyduların yakalanması işlemi esnasında her uydudan gelen sinyalin taşıyıcı frekansı, PRN kodu ve kod gecikmesi bulunduktan sonra sinyal izleme aşamasına geçilir. İzleme işleminin amacı, zamanla değişen sözü geçen bilgileri daha hassas bir şekilde bulmak, takip etmek ve sinyaldeki kullanıcı açısından önemli olan seyrüsefer bilgisini elde etmektir [16,19]. Bu amaç için kod ve taşıyıcı frekans/fazı olmak üzere iki izleme döngüsü kullanılır.

Alıcıda ilgili uyduya ait C/A kodu yakalandıktan sonra faz değişimleri takip edilerek ilk bit değişiminin olduğu (+1'den -1'e ya da tam tersi) yer bulunur ve buradan başlanarak her 20 milisaniyelik bölümden bir seyrüsefer mesaj biti elde edilir [7,16]. İzleme döngüsünden gelen sinyal anlatılan işlemler sonucunda 50 Hz'lik bit dizisine çevrilerek seyrüsefer mesajı elde edilir.

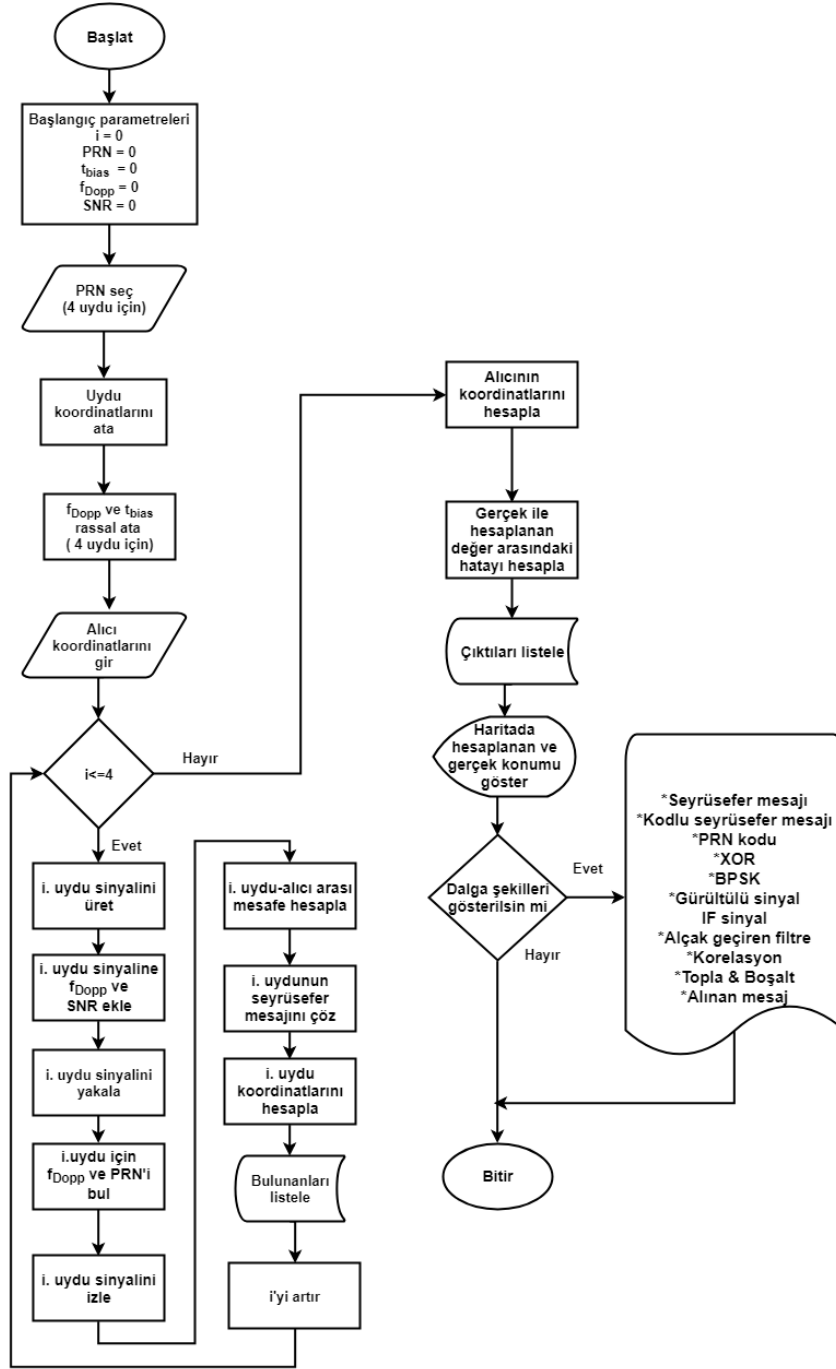
Konum hesaplamadan önce belirlenmesi gereken en önemli büyüklük alıcı ve uydu arasındaki mesafedir. Alıcı ve uydu saatlerinin senkronize olmamasından kaynaklanan hatadan dolayı alıcı ile uydu arasındaki uzaklık olması gerekenden farklı çıkmakta ve bu büyüklük de sözde-menzil (pseudorange) olarak ifade edilir. Pseudorange, uydudan gönderilen sinyalin çıkış zamanı ile alıcıya varış zamanı arasında geçen sürenin ışık hızı ile çarpılması sonucu hesaplanır. Pseudorange değeri hesaplandıktan sonra, uyduların yörünge üzerindeki koordinatlarını bulmaya yarayan ve seyrüsefer mesajı ile yayınlanan yörünge parametreleri (efemeris) kullanılarak kullanıcının konumu belirlenir.

4. GPS SİNYAL SİMÜLASYONU (GPS SIGNAL SIMULATION)

GPS L1 sinyalinin simülasyonu için MATLAB ortamında gerçekleştirilen adımlar Şekil 4'deki akış diyagramında gösterilmiştir. Simülasyonda başlangıç parametreleri olan PRN kodu PRN , alıcı saat hatası t_{bias} , Doppler frekans kayması f_{Dopp} , Sinyal-Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio) SNR değişkenleri tanımlanır. Daha sonra kullanıcı tarafından keyfi olarak 1'den 32'ye kadar olan PRN kodları arasından seçim yapılır. Oluşturulan veri tabanından, seçilen uydulara ait anlık (X,Y,Z) koordinatları otomatik olarak atanır. Tanımlanan aralık çerçevesinde f_{Dopp} ve t_{bias} rassal olarak atanırken SNR kullanıcı tarafından belirlenir. Daha sonraki adımda alıcının gerçek konum bilgisi, enlem ve boylam olarak derece cinsinden girilir.

Ön hazırlık aşamasında belirlenen büyüklükler kullanılarak her bir uydu için GPS L1 sinyali üretilir. Sinyale alıcıda kullanıcı tarafından atanan f_{Dopp} , t_{bias} ve SNR değerleri eklenir. İlgili uyduya ait PRN kodu ve f_{Dopp} belirlendikten sonra uydu-alıcı arası mesafe hesaplanır. Seyrüsefer mesajı çözülerek ilgili uyduya ait koordinatlar belirlenir. Sinyal üretimi ve alıcıda çözümlenmesi işlemi 4 uydu için tekrarlanır. Uyduların konumu belirlendikten sonra alıcının koordinatları hesaplanarak gerçek ve hesaplanan konum arasındaki hata saptanır. İstendiği takdirde her bir aşamadaki sinyal yapıları görselleştirilir.

Akış diyagramı referans alınarak simülasyonda gerçekleştirilen işlemler, kullanılan parametreler ve teknikler, başlıklar halinde ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 4. GPS sinyal simülasyonu akış diyagramı

4.1. Başlangıç Ekranı (Input Screen)

Dört farklı uydunun kullanıcı tarafından keyfi olarak seçilen PRN kodları, dB cinsinden SNR ile gerçek uydular referans alınarak rassal atanan Doppler frekansı ve alıcı saat hatasının belirlendiği bölümdür. Simülasyonun gerçek dünya ile tam olarak uyumlu olabilmesi için kullanıcı 1'den 32'ye kadar olan PRN kodları arasında tercih yapabilir. Uygun olmayan uydu koordinat bilgisi girilmesinin önüne geçmek için kullanıcı tarafından seçilen PRN koduna bağlı olarak, gerçek GPS uydularına ait kartezyen koordinat bilgileri referans alınarak oluşturulmuş veri tabanından ilgili uyduya ait anlık (X,Y,Z) koordinatları otomatik olarak atanır. Kullanıcının aldığı GPS sinyalinin ortalama SNR değeri -29 ve -21 dB arasında değişir [21]. Bu durum dikkate alınarak başlangıç parametrelerinde gerekli olan SNR değerinin skalası -40 ile 0 dB arasında geniş bir aralık alınarak istenilen gürültü seviyesinde sinyal üretme ve bu sayede gürültünün sinyale olan etkisini inceleme imkânı sunulur. 4 uydu için PRN kodları ve SNR değerleri

belirlendikten sonra alıcının enlem ve boylam bilgilerinin girilmesi gerekir. Böylece uydulardan gelen sinyalleri çözüp seyrüsefer mesajını kullanarak hesaplanan konum bilgisi ile gerçek konum bilgisi arasındaki hata karşılaştırılır.

Simülasyonu başlatmadan önceki son adımda, Doppler frekansı ve alıcı saat hatasını belirler. Bu çalışmada kullanıcının mobil olduğu varsayılarak Doppler frekansı ± 10 kHz arasında alınmıştır. Uydu ve alıcı hareketine bağlı olarak değişiklik gösteren Doppler frekansı, 'Seç (Select)' butonuna basıldığında her bir uyduya ± 10 kHz aralığında rassal olacak şekilde atanır. Uydu ve alıcı saat senkronizasyon hatası büyüklüğün etkisi de göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında alıcı saat hatası, başlangıç parametrelerinde yer alan 't_bias' bölümünde gösterilir. Alıcı saat hatası, alıcının kullandığı dahili saatten kaynaklanan bir hatadır. Bu yüzden de alıcı saat hatası için herhangi bir tipik değer söz konusu değildir. Bu durum dikkate alınarak alıcı saat hatası, 10 ile 50 mikro saniye arasında makul bir aralık belirlenmiştir. Seç butonuna basıldığında 't_bias' bölümüne 10 ile 50 mikro saniye aralığında rassal bir sayı, alıcı saat hatası olarak atanır. Simülasyonun ön hazırlık evresi olan başlangıç parametrelerinin tamamı girildikten sonra 'Başlat (Start)' butonuna basılarak simülasyon çalıştırılır. Şekil 5'de simülasyon için gerekli parametrelerin seçildiği başlangıç ekranı verilmiştir.



Şekil 5. Başlangıç ekranı

4.2. GPS Sinyal Üretimi (GPS Signal Generation)

Başlangıç parametrelerinin girilip simülasyonun çalıştırılması sonrası gerçekleştirilen ilk adım, uydulardan yayınlanan GPS L1 sinyalinin üretilmesidir. Bu aşamada sinyal üretimi için gerekli parametreler, seyrüsefer mesajını oluşturan uydu koordinat bilgileri ve PRN kodudur. Seyrüsefer mesaj yapısı uydu koordinatları, iyonosferik hata düzeltmesi, saat düzeltmesi gibi detaylı bilgiler içerir. Bu yüzden seyrüsefer mesajını oluşturmak için bazı matematiksel dönüşüm ve hesaplamaların yapılması gerekir.

Simülasyon çalışmasında işlem kolaylığı olması açısından seyrüsefer mesajı sadece uydunun koordinat bilgileri kullanılarak oluşturulur. Onluk tabanda girilen kartezyen koordinat (X,Y,Z) bilgileri, ikilik (binary) tabana dönüştürülerek seyrüsefer mesajı elde edilir. GPS'te kullanılan Hamming tekniği, alınan sinyalde herhangi bir hata olup olmadığını tespit etmek için kullanılan hata ayıklama yöntemlerinden birisidir. Seyrüsefer mesajının Hamming ile kodlanması sonucu 5,040 saniye uzunluğunda kodlu seyrüsefer mesajı elde edilir. Daha sonra kodlu sinyale, aynı süreye sahip PRN kodu ile Özel Veya (Exclusive OR-XOR) işlemi uygulanıp, oluşan sinyal BPSK modülasyonu kullanılarak 1575,42 MHz frekanslı taşıyıcı sinyal üzerine bindirilerek alıcılara gönderilir.

4.3. Alıcı Kanalı (Receiver Channel)

GPS uydularının gönderdiği sinyaller uzay boşluğundan alıcıya ulaşana kadar birçok bozucu etkiye maruz kalır ve bunun sonucunda da kullanıcı gürültülü bir sinyal alır. Kanal aşaması, üretilen sinyale gürültü, alıcı-uydu arasındaki mesafeden kaynaklanan gecikme süresi ve Doppler frekansının eklendiği bölümdür. Gürültü eklemek için sinyale Toplanır Beyaz Gauss Gürültü (Additive White Gauss Noise-AWGN) kanal modeli uygulanır. Simülasyonda başlangıç parametrelerinde her bir uyduya rassal olarak atanan Doppler frekansı, uydudan gönderilen sinyal frekansının (1575,42 MHz) Doppler frekansı kadar değiştirilmesi ile sisteme dahil edilir. Uydu ile alıcı arasındaki mesafeden dolayı uydudan gönderilen sinyal alıcıya belirli bir gecikme süresi ile ulaşır. Belirli gecikme süresi, başlangıçta girilen alıcı ile uydu arasındaki uzaklığın ışık hızına bölünmesi ile gecikme süresi hesaplanır. Daha sonra bu gecikme süresine denk gelecek şekilde PRN koduna çip gecikmesi uygulanır.

4.4. Sinyal Çözümleme (Signal Decoding)

Uydulardan gelen sinyalin alıcı tarafından çözülmesinden seyrüsefer mesajını elde etme sürecine kadar gerçekleşen aşamaları içerir. Uydudan gelen sinyalin (1575,42 MHz \pm Doppler frekansı) frekansının çok yüksek olması ve temel bant işlemlerinin kolay yapılabilmesi için daha düşük frekansa sahip IF sinyaline dönüştürülmesi gerekir. Uygulamalarda donanım elemanları ile gerçekleştirilen aşağı kaydırma işlemi, yazılım tabanlı simülasyon çalışması çerçevesinde yapay olarak MATLAB ortamında gerçekleştirilir. Aşağı kaydırma işlemi tamamlandıktan sonraki ilk adım sinyal yakalamadır. Yapılan çalışmada, diğer metotlara göre daha hızlı ve uygulaması açısından daha kolay olan Paralel Kod Fazı Arama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde 500 Hz aralıklarla üretilen taşıyıcı sinyal ve PRN kodları kullanılarak 41 (10 kHz / 500 Hz +1) adımda sinyal yakalama aşaması tamamlanır. Bu işlem sonucunda en yüksek korelasyon değerine sahip olan sonuç dikkate alınır ve buna göre gelen sinyalin PRN kodu, Doppler frekansı ve taşıyıcı frekansı belirlenir. Daha sonra belirlenen PRN kodu ile dahili olarak üretilen aynı PRN kodu arasında oto korelasyon işlemi uygulanması sonucu kod gecikmesi tespit edilir. Elde edilen gecikme süresi ışık hızı ile çarpıldığında alıcı-uydu arası mesafe hesaplanır.

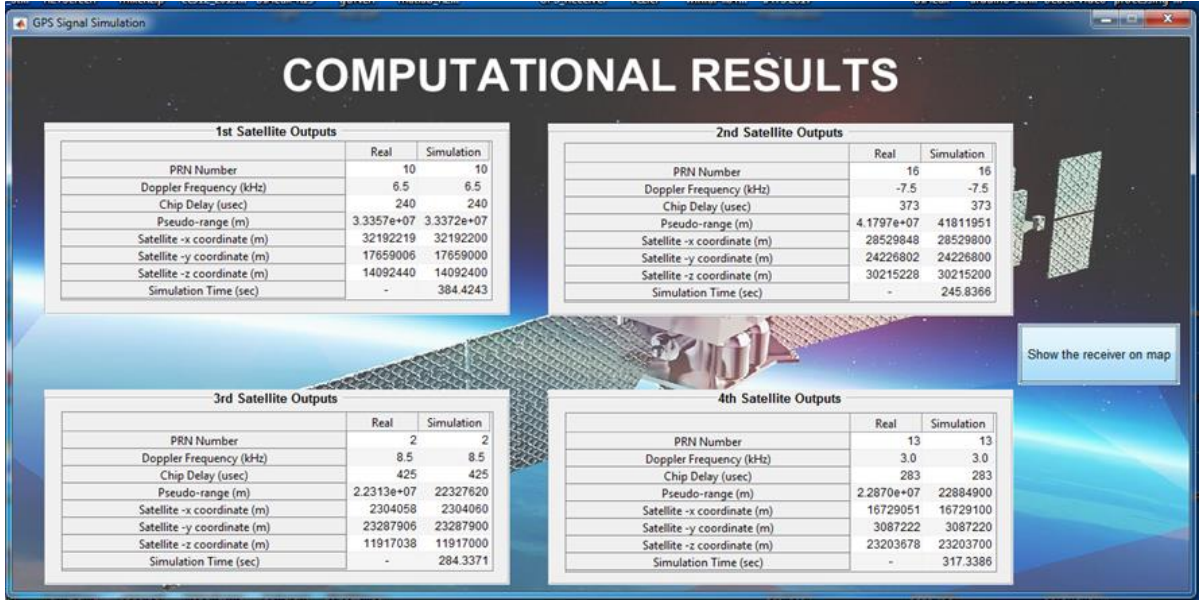
Sinyal yakalama işlemi tamamlandıktan sonra, gelen sinyaldeki seyrüsefer mesaj bitlerini belirleme aşamasına geçilir. Bunun için gelen sinyalin frekans ve fazının belirlenmesi gerekir. Daha önce söz edildiği gibi faz ve frekans izleme döngüleri bu amaç için kullanılır. Alıcıda IF ile aynı frekanslı bir sinyal üretilerek gelen sinyal ile çarpılır. Elde edilen sinyalin bir periyotluk PRN kodu uzunluğuna denk gelen 1 milisaniye süresince integralinin alınması sonucu oluşan, önceden belirlenen eşik değeri olan 0'dan büyük ise 1, küçük ise 0 olarak değerlendirilerek sinyal ikilik tabana dönüştürülür. Bu işlemin sonucunda elde edilen sinyal hem PRN kodu, hem de seyrüsefer mesajını içerir. Seyrüsefer mesajını elde etmek için sinyal PRN kodundan ayrılarak seyrüsefer mesajındaki hataları ayıklayıp doğru olarak belirlemek için sinyale Hamming kod çözme işlemi uygulanır ve bu işlemin sonucunda seyrüsefer mesajı elde edilir. Seyrüsefer mesajının ikilik tabandan onluk tabana dönüştürülmesi sonucu uyduların X, Y, Z koordinatları belirlenir. Alıcının konumunu hesaplayabilmesi için en az dört farklı uydudan sinyal alması gerektiğinden bu adımlar dört farklı uydu için tekrarlanır. Şekil 6'da 4 uydu için alıcı kanal çıkışlarından elde edilen hesaplama sonuçları verilmiştir.

4.5. Konum Hesaplama (Position Calculation)

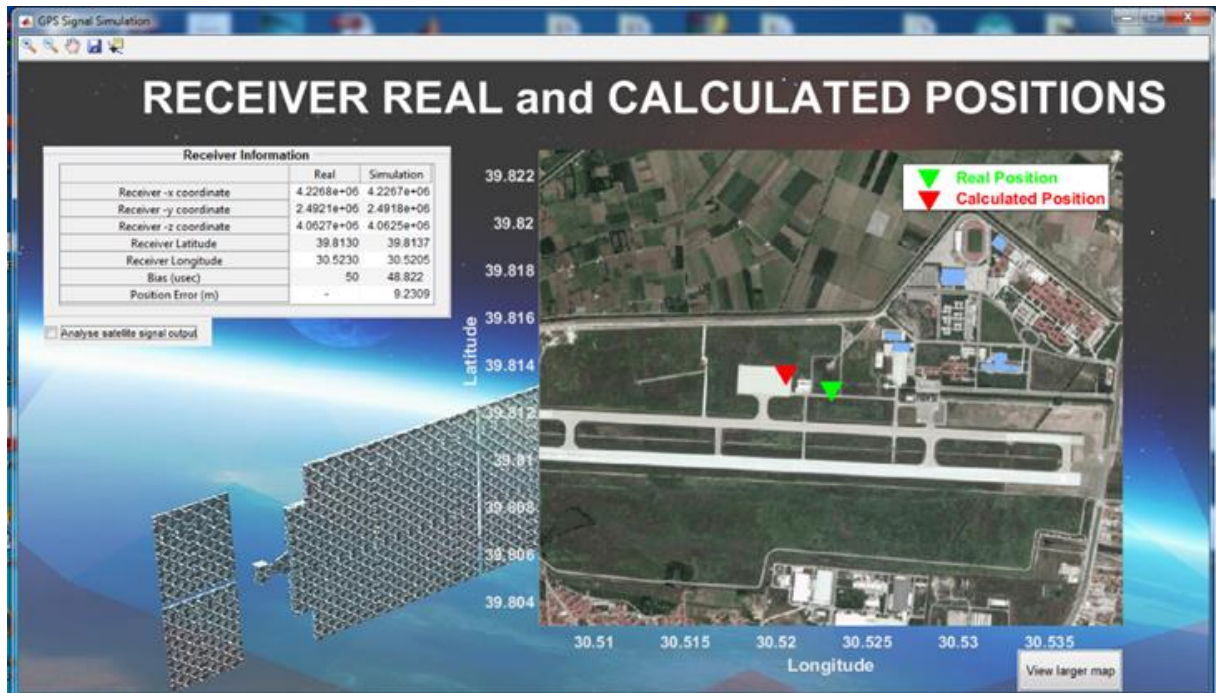
Bu bölümde, alıcının gerçek ve hesaplanan konum bilgisi arasında ortaya çıkan hata oranı karşılaştırılarak yapılan çalışmanın performansı analiz edilir. Ayrıca başlangıçta 't_bias' olarak atanan alıcı saat hatası değerinin hesaplamalar sonucu bulunan değeri de gösterilir. Böylece gerçek ve hesaplanan değerler arasında bir kıyaslama yapılarak oluşan hata oranı belirlenir.

Simülasyonun en son aşaması, enlem-boylam bilgisine dönüştürülen alıcı konumunun Google şirketinin sunduğu Google Statik Harita (Google Static Map) hizmeti kullanılarak harita üzerinde gösterilmesidir. Hem gerçek, hem de hesaplanan alıcı konumu kullanılarak simülasyon sonucunda oluşan konum hatası Şekil 7'deki harita üzerinde gösterilmektedir. Ayrıca iki farklı enlem ve boylam arasındaki kuş bakışı mesafeyi ölçmede kullanılan Haversine formülü yardımıyla, gerçek ve hesaplanan konum arasındaki hatanın büyüklüğü de metre cinsinden verilmiştir.

Yapılan çalışmada gürültünün konum hatasına olan etkisini inceleyebilmek için sinyale çeşitli SNR değerleri eklenerek konum belirlenmiştir. Gürültünün etkisini doğru olarak tespit edebilmek için Doppler



Şekil 6. Kanal çıkışlarından elde edilen uydulara ait hesaplama sonuçları



Şekil 7. Hesaplanan ve gerçek alıcı konumları

kayması ile saat hatası her SNR değeri için sabit tutulmuştur. Simülasyon kapsamında sinyale uygulanan SNR değerlerinin konum hatasına olan etkisi Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, SNR değeri azaldıkça elde edilen konum hatasında artış meydana gelmektedir. Ayrıca belirli bir SNR değerinden sonra yüksek gürültüden dolayı alıcının konumu hesaplanamamaktadır.

4.6. Sinyal Analizi (Signal Analysis)

GPS sinyalinin üretim aşamasından seyrüsefer mesajının çözülmesine kadar gerçekleşen işlemler sonucunda elde edilen sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesi ve simülasyonda yapılan herhangi bir değişikliğin sinyal sonucuna olan etkisinin gözlemlenmesi amacı ile geliştirilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan 4 uydü için gerçekleştirilen aşamaların aynı olmasının yanında MATLAB R2015b yazılımının veri kapasite sınırı nedeniyle sadece birinci uydunun sinyal çıkışlarının önemli bölümleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen arayüz ile simülasyonun farklı adımlarında verici ve alıcı kısmında elde edilen sinyal dalga

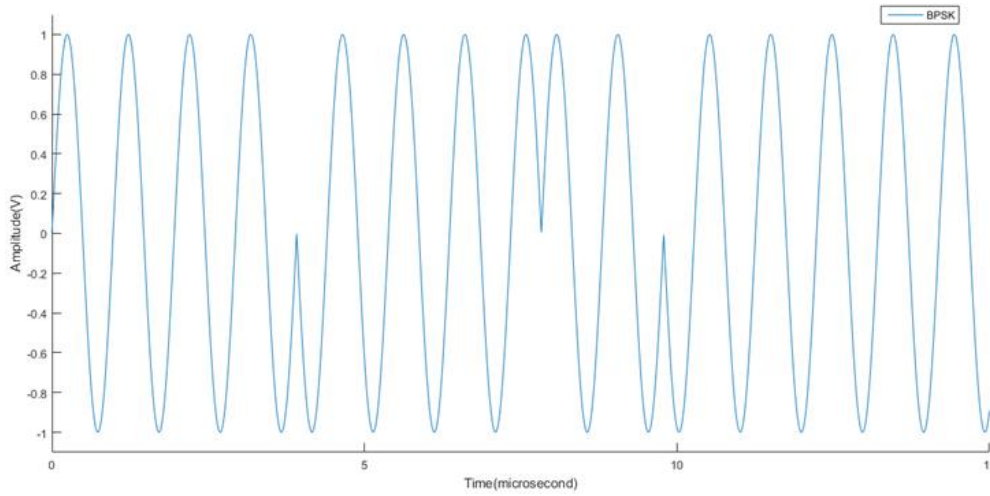
formlarını görselleştirmek ve başlangıç ekranındaki giriş değerlerini değiştirerek dalga formlarında meydana gelen değişimleri analiz etmek mümkündür.

Tablo 1. Gürültü analizi sonuçları

Gerçek		Hesaplanan					
SNR (dB)	Hepsi	0	-10	-25	-30	-35	-40
x-koordinatı	4227273,4	4227284,3	4227284,3	4227197,7	4226167,5	4226651,7	**
y-koordinatı	2491346,4	2491352,3	2491352,3	2491295,6	2490735,3	2491405,7	**
z-koordinatı	4062698,6	4062706,6	4062706,6	4062670	4061640,4	4062266,8	**
Enlem	39,8	39,812983	39,812983	39,813326	39,812962	39,812927	**
Boylam	30,51299	30,512995	30,512995	30,512937	30,513408	30,517282	**
Saat hatası (μs)	50,0	50,040977	50,040977	49,698560	44,983175	48,390213	**
Konum hatası (m)	-	0,1043522	0,1043522	2,0908173	4,6449647	14,106924	**

** Hesaplama sonuçlarının bulunamadığını ifade etmektedir.

Örneğin uydudan gönderilen ve PRN kodu ile seyrüsefer mesajını içeren BPSK modülasyonlu taşıyıcı sinyalin dalga şekli görüntülenmek istendiğinde, sayfa üzerinde “BPSK” kutucuğu seçilerek Şekil 8’de verilen dalga formu elde edilebilir.



Şekil 8. Uydudan yayınlanan BPSK modülasyonlu sinyal dalga formu

5. SONUÇ

Bu çalışmada GPS L1 sivil sinyalinin üretiminden faydalı seyrüsefer bilgisine dönüştürülene kadar geçen tüm işlem süreçlerini görselleştiren kapsamlı bir uydu sinyal simülasyonunun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda alıcının konum bilgisinin hassasiyetini etkileyebilecek gürültü, alıcı saat hatası, Doppler frekans kayması gibi faktörlerin incelenebilmesi, yapılan herhangi bir değişikliğin sinyal sonucuna olan etkisinin gözlemlenebilmesi, uydu sinyalinin üretiminden alıcıda seyrüsefer mesajının elde edilmesi sürecine kadar olan her bir adımdaki sinyal çıktılarının analiz edilebilmesi, farklı ve yeni sinyal işleme teknikleri ile algoritmaların test edilebilmesi esnekliğine sahip bir arayüz geliştirilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde konum hatasının, doğrudan sinyalin maruz kaldığı gürültü oranına bağlı olarak değiştiği, bunun yanında hesaplama yolu ile bulunabilen alıcı saat hatası ve Doppler frekansının da bu hataya kısmen katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

Seyrüsefer mesajı uydu koordinatları yanında iyonosferik hata düzeltmesi ve saat düzeltmesi gibi ayrıntılı bilgiler içerir. Bu yüzden seyrüsefer mesajını oluşturmak için bazı matematiksel dönüşüm ve hesaplamalar

yapılmalıdır. Hem işlem kolaylığı sağlaması açısından, hem de seyrüsefer mesajının 1500 bit gibi uzun bir mesaj yapısına sahip olmasından dolayı, simülasyon çalışmasında seyrüsefer mesajı, sadece bir alt-çerçeve uzunluğuna denk gelecek şekilde 300 bitlik uydu koordinat bilgilerinden oluşturulmuştur. Bu sayede dalga formlarının daha görsel ve anlaşılır hale getirilmesi sağlanmıştır. Simülasyon, sadece bir alt-çerçeve uzunluğunda seyrüsefer mesajı ile sınırlı kalmakla birlikte, yapılacak bazı değişiklikler ile gerçek uydu sinyaline ait tam bir seyrüsefer mesajı kullanılarak tüm aşamaları gerçekleştirilebilmek mümkündür.

GPS L1 yayını için geliştirilen bu arayüz çalışmasının devamında aynı adımlar GLONASS, Galileo ve Beidou gibi diğer küresel konum belirleme sistemleri için de tekrarlanabilir, hatta tek bir arayüz içerisinde 4 farklı modül oluşturularak her birinin çalışma prensibi, sinyal yapıları ve alıcı konum doğruluğuna etki eden faktörler analiz edilebilir. Ayrıca her bir sistemin performansı da farklı başlangıç değerleri için test edilebilir. Bunun yanında uydu seyrüsefer sistemlerinde kullanılan farklı hata bulma ve düzeltme algoritmalarının performansları da GPS veya diğer küresel konum belirleme sistemleri üzerinde denenebilir. Örneğin GPS'te hata bulma ve düzeltme algoritması olarak Hamming tekniği kullanılmıştır. Beidou'da aynı amaç için kullanılan BCH (The Bose, Chaudhuri and Hocquenghem), Galileo'da Viterbi ve şu zamana kadar hiçbir uydu seyrüsefer sisteminde denenmemiş olan Turbo kod algoritmalarının performansları GPS üzerinde karşılaştırılarak GPS sinyal yapısına ne derece uygun oldukları ortaya konabilir. Bunun için seyrüsefer mesajının, kullanılan hata bulma ve düzeltme algoritmasına göre yeniden düzenlenmesi yeterli olacaktır. Bir başka deyişle geliştirilen arayüz esnek bir yapıya sahip olduğu için, GPS sinyal yapısının ve alıcıda sinyal yakalama, izleme ve işleme aşamalarının açıklanması için eğitim amaçlı kullanılabileceği gibi, farklı sinyal işleme tekniklerinin kullanıldığı GPS, GLONASS, Galileo ve Beidou gibi uyduya dayalı küresel konum belirleme sistemlerinde yeni teknolojilerin denenmesi ve performanslarının analiz edilmesi de mümkündür.

Küresel konum belirleme ile ilgili yapılan çalışmalar, sözü geçen dört küresel sistemden alınan sinyallerin bir arada değerlendirilebileceği bütünlük bir alıcı tasarımı üzerine yoğunlaşmaktadır. İleride benzer simülasyon çalışması, sistemin çalışma prensibinin kolaylıkla kavranabilmesi ve konum hassasiyetine etki eden faktörlerin analiz edilebilmesi için bütünlük GNSS alıcısı için de gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Hülako, S. Kapucu, Düşük maliyetli gps tabanlı otonom bir insansız kara aracının tasarımı ve yapımı. Gazi üniversitesi fen bilimleri dergisi part c: tasarım ve teknoloji, 6: 4 (2018) 834-850.
- [2] M. Kahveci, F. Yıldız, GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2012.
- [3] J. Zhang, Advanced Signal Processing in Multi-Mode Multi-Frequency Receivers for Positioning Applications, PhD Thesis, Tampere University of Technology, Finland, 2013.
- [4] E. Kaplan, C. Hegarty, Understanding GPS Principles and Applications, Artech House, London, 2006.
- [5] G. A. Elango, G. F. Sudha, Design of complete software GPS signal simulator with low complexity and precise multipath channel model. Journal of electrical systems and information technology, 3: 2 (2016) 161-180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.03.002>
- [6] C. Abhishek, A. Charitha, D. Goutham, GPS receiver implementation using simulink. International journal of advance engineering and research development (ijaerd), 1: 5 (2014) 1-5. doi:10.21090/ijaerd
- [7] T. Zubaroglu, Yazılım Tabanlı GPS Almaçlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [8] D. Akopian, A. Soghoian, A labview-based fast prototyping software defined GPS receiver platform. Global Conference on Signal and Information Processing. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1230-1233, Austin, 2013. doi: 10.1109/GlobalSIP.2013.6737130

- [9] E. Günaydın, Implementation of Software GPS Receiver, Master of Science, Middle East Technical University Institute of Science, Ankara, 2005.
- [10] L. Dong, IF GPS Signal Simulator Development and Verification, Master of Science, University of Calgary Department of Geomatics Engineering, Canada, 2013.
- [11] Z. Kassas, J. Bhatti, T. Humphreys, A graphical approach to GPS software-defined receiver implementation. Global Conference on Signal and Information Processing, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1226-1229, Austin, 2013. doi: 10.1109/GlobalSIP.2013.6737129
- [12] C. Ma, G. Lachapelle, M. Cannon, Implementation of a software GPS receiver. The Institute of Navigation Global Navigation Satellite Systems (ION GNSS) 2004, The Institute of Navigation (ION), 1-15, California, 2014.
- [13] M. Bright, GPS L2 C Signal Survey and The Development of The Emergent MATLAB L2C (emal2) Receiver, Master of Science, The University of Texas Department of Engineering, Austin, 2012.
- [14] M. Rao, G. Falco, SDR joint GPS/Galileo receiver from theory to practice. International journal of aerospace sciences, 1: 1 (2012) 1-7. doi: 10.5923/j.aerospace.20120101.01
- [15] R. Campana, F. Gottifredi, V. Valla, P. Lombardo, Different Acquisition Algorithms for the GALILEO L1 Signal with BOC(1,1) Modulation, Springer Series on Signals and Communication Technology, 2008.
- [16] K. Borre, D. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, S. Jensen, S, A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach, Birkhauser, Boston, 2007.
- [17] European Space Agency, (2003). Development of a GALILEO Signal Simulator. Erişim Adresi: <http://microelectronics.esa.int/papers/GalSimBorras-Jan2003.pdf> (Erişim Tarihi: 11.06.2018)
- [18] J. Guo, W. Wang, B. Chao, Model of gps if signal and its simulation. Geo-spatial information science, 12: 2 (2012), 100-103. doi: <https://doi.org/10.1007/s11806-009-0225-x>
- [19] J. Bao, Y. Tsui, Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [20] J. W. Betz, Engineering Satellite-Based Navigation and Timing, John Wiley & Sons, New Jersey, 2016.
- [21] A. Joseph, Measuring GNSS Signal Strength. InsideGNSS November/December 2010 Edition. Erişim Adresi: <http://insidegnss.com/wp-content/uploads/2018/01/novdec10-Solutions.pdf> (Erişim Tarihi: 21.05.2018)