

1. GPS'İN GENEL ESASLARI

1.1 Tarihçe

Ölçme Bilgisi insanoğlunun varolduğu tarihten günümüze dek herkesin dikkatini çekmiştir. İnsan ilk önce yeryüzünde bulunduğu yeri bilmek ister. Ayrıca şahıslar sahip oldukları taşınmazların şeklini ve büyüklüğünü bilmek isterler. Bu durum düşünebilen canlıların en doğal hakkıdır. Bu durum ancak ölçme bilimi sayesinde mümkün olmaktadır. İlk çağlarda ilkel yöntemlerle konum ve yer belirleme işleri yapılırken zamanla teknolojik gelişmelere paralel olarak konum belirleme ve navigasyon sistemlerinde önemli gelişmeler olmuştur.

Uzunluk ölçüsünün elektromagnetik dalgalarla gerçekleştirilmesiyle başlayan gelişmeler hızlı bir şekilde devam etmiş, açıların elektronik olarak ölçülmesi ve sonrasında bu iki sistemin bütünleşerek elde edilen dataların kaydedilmesi ve bilgisayar aracılığı ile değerlendirilmesine olanak tanıyan Total Station aletlerinin üretilmesine kadar uzanmıştır. Yersel ölçülerde bu gelişmeler yaşanırken, yapay uydularla konum belirleme sistemleri de gelişmelerden etkilenmiştir.

Uzunluk ve zaman ölçülerini esas alarak 4 yer istasyonundan belirli bir zamanlamaya göre yapay uyduya yapılan elektromagnetik uzaklık ölçme düzenini kapsayan Secor sistemine benzer şekilde ABD tarafından askeri amaçlarla geliştirilen, 1100 km yükseklikte 6 uydudan oluşan Transit sisteminin bazı alanlarda yeterli olmaması sistemin geliştirilmesi ile konumlamada yeni bir çığır açan GPS sisteminin ortaya çıkmasına yol açmıştır.

İlk yapay uydu Sputnik-1, 4 Ekim 1957 tarihinde uzaya fırlatılmış ve jeodezi tarihinde önemli bir gelişme sağlanmıştır.

Transit uydusu 60 lı yıllarda geliştirilmiş, askeri amaçlarla kullanılmıştır. Sonraları bu sistem sivil kullanıcılara açılmış ve 1967 yılından itibaren jeodezik konum belirleme çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır.

GPS, Transit sisteminin zayıf yönlerini ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Transit sistemde elde edilen doğruluklar oldukça düşüktü. **Navigasyonda amaç anlık (real**

time) konum ve hız belirlemektir. Transit sistemle bu sağlanamıyordu. Birkaç günlük ölçü ile ancak dm mertebesinde doğruluğa erişilebiliyordu. Transit sistemle sağlanan deneyimler sonucunda, hava koşullarından etkilenmeden sürekli gözlem yapabilen ve yeryüzünde tek anlamlı ve doğru konum belirlemeye olanak veren bir sistem gereksinimi ortaya çıkmıştır.

1.2 GPS' in Tanımı ve Kullanım Alanları

Transit sisteminin gelişmiş şekli olan NAVSTAR/GPS ABD Savunma Dairesi tarafından geliştirilmiştir. GPS alıcısı ile uydu sinyalleri yardımıyla herhangi bir yer ve zamanda, her türlü hava koşullarında, global bir koordinat sisteminde, yüksek duyarlılıkta, en ekonomik şekilde, anında ve sürekli şekilde konum, hız ve zaman belirlemesi yapılabilir (Kahveci ve Yıldız, 2001). GPS' in kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Askeri Kullanım Alanları : Kara, deniz ve hava araçlarının navigasyonu, arama-kurtarma, uçakların iniş ve kalkışları, hedef bulma ve diğer amaçlar.
- Sivil Kullanım Alanları : Kara, deniz ve hava araçlarının navigasyonu, jeodezik ölçmeler, kadastral ölçmeler, deformasyon ölçmeleri, araç takip sistemleri.
- Turizm, tarım , ormancılık, spor, güvenlik, hidrografik çalışmalar, CBS' nin veri tabanının geliştirilmesi ve diğer alanlar.

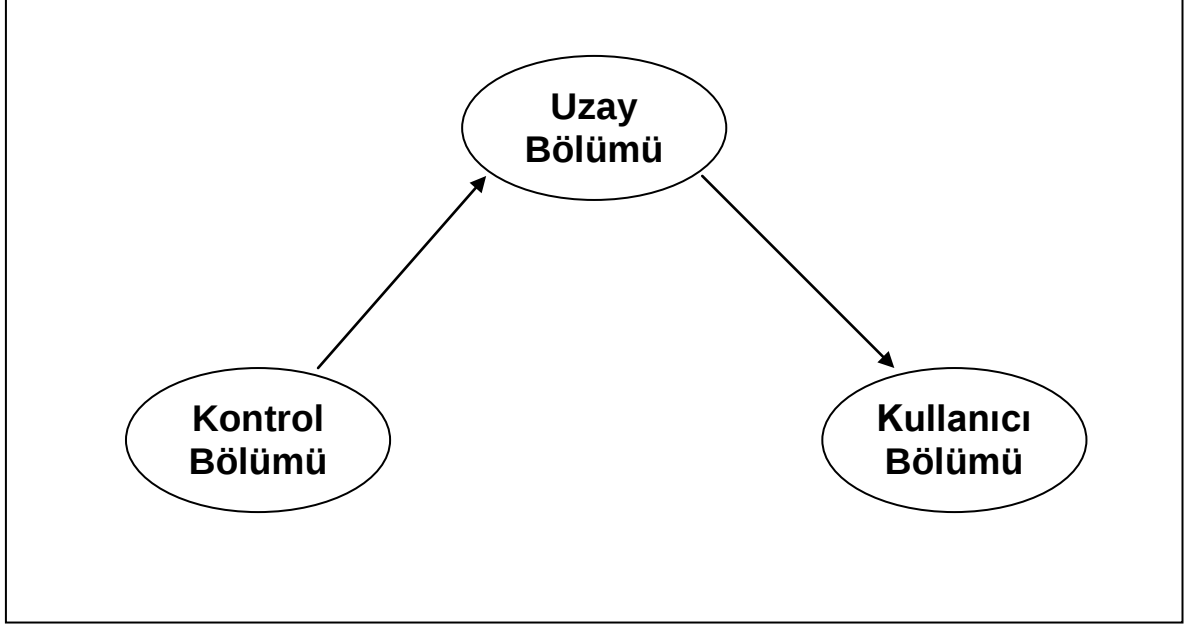
GPS' in klasik sisteme göre üstün ve zayıf yönleri :

- Noktalar arasında görüş zorunluluğu ortadan kalkmıştır. GPS alıcı sisteminin gökyüzünü görmesi yeterlidir.
- Ölçü noktalarının yükseklerde seçilmesi zorunluluğu yoktur.
- GPS ölçüleri büyük oranda hava koşullarından etkilenmez.
- Gece-gündüz 24 saat ölçü yapılabilir.
- Noktaların konum doğruluğu oldukça yüksektir.
- GPS' in zayıf tarafı ise alıcı anteni gökyüzünü muhakkak görmelidir. GPS' in sinyalleri mikrodalga sinyaller gibi güçlü değildir. Kapalı yerlerde, çok sık ağaçlıklı alanlarda, tünellerde ve maden galerilerinde ölçü yapılamaz.

1.3 GPS' in Bölümleri

GPS' in 3 bölümü vardır:

- Uzay Bölümü
- Kontrol Bölümü
- Kullanıcı Bölümü



Şekil 1.1 GPS' in bölümleri

1.3.1 Uzay Bölümü

Uzay bölümü ekvator düzlemi ile 55° lik açı yapan 6 yörünge düzlemine yerleştirilmiş 24 uydudan oluşmaktadır. Yedek uydular esas uydulardan birinde sorun olması durumunda devreye girerler.

Her bir GPS uydusu ,

- Senkronize (eşzamanlı) zaman sinyallerini
- Tüm diğer uydularla ilgili konum bilgilerini
- Yörünge parametrelerine ilişkin bilgileri iki taşıyıcı frekanstan (L1, L2) yayınlar
- Kontrol bölümü tarafından yayınlanan bilgileri alır.

Uzay bölümünün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir :

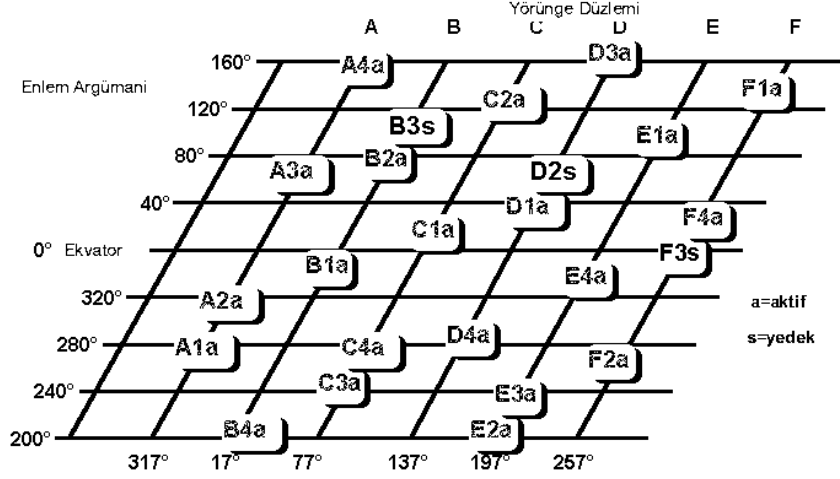
- Uydular yeryüzünden yaklaşık 20200 km, yer merkezinden 26500 km uzakta olup, $11^h 58'$ da bir tam devir yaparlar.
- Yeryüzünün herhangi bir yerinde gözlenebilecek en az uydu sayısı 4 olup en az yaklaşık olarak 5 saat ufuk üzerinde kalır. Türkiye’de gözlenebilen en çok uydu sayısı 10 dur.
- Uydu yörünge zamanı (ortalama yıldız zamanı) ile yer dönmesi (ortalama güneş zamanı) arasında yaklaşık 4 dak./gün fark vardır. Bu nedenle yeryüzündeki bir gözlemci aynı uyduyu her gün 4 dakika erken gözlemektedir.

Uydulara ilişkin özellikler şunlardır :

- Altı farklı tip GPS uydusu vardır. Bunlar Blok I, Blok II, Blok IIA, Blok IIR, Blok IIF ve Blok III uydularıdır.
- Blok I uyduları 1978-1985 yılları arasında yörüngeye oturtulmuş olup ağırlıkları 845 kg ve ömürleri yaklaşık 7,5 yıldır. Bu uydular ekvator düzlemi ile 63° lik açı yaparlar. Şu anda kullanılamamaktadırlar.
- Blok II uyduları ekvatorla 55° lik açı yaparlar. Ağırlıkları yaklaşık 1500 kg ve ömürleri 7 yıldır. Blok II uyduları 1989 yılında yörüngeye oturtulmuştur.
- Blok IIA uyduları haberleşme olanaklarına sahip olup, bazılarında laser ölçülerine olanak sağlayan yansıtıcılar vardır. İlk Blok IIA uydusu 1990 yılında yörüngeye oturtulmuştur.
- Blok IIR uydularının ömürleri yaklaşık 10 yıldır. Atomik saatler taşırlar, ağırlıkları 2000 kg olup 1997’ de yörüngeye oturtulmuşlardır. Bu uydular kontrol bölümünün desteği olmadan kullanıcılara 180 günlük navigasyon olanağı sağlarlar.
- Blok IIF uydularını 2005-2010 tarihlerinde yörüngeye oturtulmaları planlanmıştır. 1176,45 Mz lik frekanstaki L5 sinyali bu uydularda kullanılacaktır.
- Blok III uyduları tasarım aşamasındadır. Bunların 2010 yılından itibaren yörüngeye oturtulmaları planlanmış olup bu uydular askeri amaçlar için kullanılacaklardır.

GPS uydularının tanımlamada değişik yöntemler mevcuttur. Bunlar, yörüngeye yerleşme sıra numarasına, uydu PRN (Pseudo Random Noise) kod numarasına,

yörünge konumundaki numaralama ve Nasa katalog numarasına göre yapılmaktadır. Uygulamada en çok PRN kod numaraları kullanılmaktadır. PRN kod, alıcının uyduları izlerken birbirinden ayırt edilmesine yaramaktadır. PRN sayıları haftalık (GPS haftası) olup, örneğin PRN13' ün anlamı 13 numaralı uydu PRN kodunun 13. haftasına ait bilgileri yayınlamaktadır.



Şekil 1.2 GPS uydu yörüngeleri ve konumları

1.3.2 Kontrol Bölümü

Bu bölüm yeryüzünün çeşitli yerlerine dağılmış 1 ana ve 5 izleme istasyonundan oluşmaktadır. Ana istasyon Colorado'da (USA) dır. Bunun dışındakiler izleme istasyonlarıdır. Yörüngeye yerleştirilmiş tüm GPS uyduları dünya üzerine uygun dağılmış, çok hassas saatlerle donatılmış, konumu iyi bilinen ve aşağıda Şekil 1.3'de gösterilen 6 sabit izleme istasyonu tarafından izlenmektedir.



Şekil 1.3 Kontrol bölümü istasyonları

Bu istasyonların görevi, günlük olarak uyduların sağlıklı şekilde çalışmalarını sağlamak, toplanan verileri irdelleyerek uydu yörüngelerini belirlemek, uydu saat düzeltmelerini hesaplamak ve SA etkileri gibi bilgileri uydulara yüklemektir. Ana kontrol istasyonu, tüm sistemin kontrolünden, her bir uydu için uydu efemeris bilgilerinin saat düzeltmelerinin hesabından sorumludur. Diğer 5 istasyon, gözleme istasyonu görevi yapar ve uydu efemerislerinin belirlenmesi için gerekli verileri toplarlar.

1.3.3 Kullanıcı Bölümü

Kullanıcı bölümü, alıcı ve antenden oluşmaktadır. Alıcılar birtakım kriterlere göre sınıflandırılırlar.

- Kullanım amacına göre :
 - a. Bilimsel amaçlı alıcılar. Hassas çalışmalarda kullanılırlar.
 - b. Pratik amaçlı alıcılar. Anında kabaca 3 boyutu belirlerler.
- Kullanım alanlarına göre :
 - a. Askeri amaçlı alıcılar
 - b. Sivil tip alıcılar
- Yapılarına göre
 - a. Kanal sayısına göre. Tek ve çift kanallı alıcılar
 - b. Frekanslarına göre. Tek ve çift frekanslı alıcılar

GPS sinyallerini kaydeden aletler 7 alt bölümden oluşur.



Şekil 1.4 Kaydedicinin genel diyagramı

- **Anten ve güçlendirici**

Anten, uydudan gelen sinyalleri alır, bu sinyalleri güçlendirdikten sonra sinyal işlemcisi bölümüne gönderir. Anten ile aradaki bağlantı bir kablo ile sağlanır.

- **Sinyal değerlendirme bölümü**

Anten tarafından alınan ve güçlendirildikten sonra kablolarla radyo-frekans kısmına iletilen sinyal, sinyal işlemcisi tarafından değerlendirilir. Bu değerlendirme, sinyal işlemcisindeki kanallarla yapılır. Kod ölçüleriyle pseudorange belirlenir. Sonra veri toplulukları demodüle edilerek eski şekline dönüştürülür.

- **Mikroişlemci**

Mikroişlemci, hesaplamaların yapıldığı bölümdür.

- **Data Kayıt**

Yapılan ölçülerin kayırl edildiği bölümdür. Kayıt işlemi; alete, bilgisayara, disketlere veya kasetlere yapılabilir.

- **Dış kominikasyon**

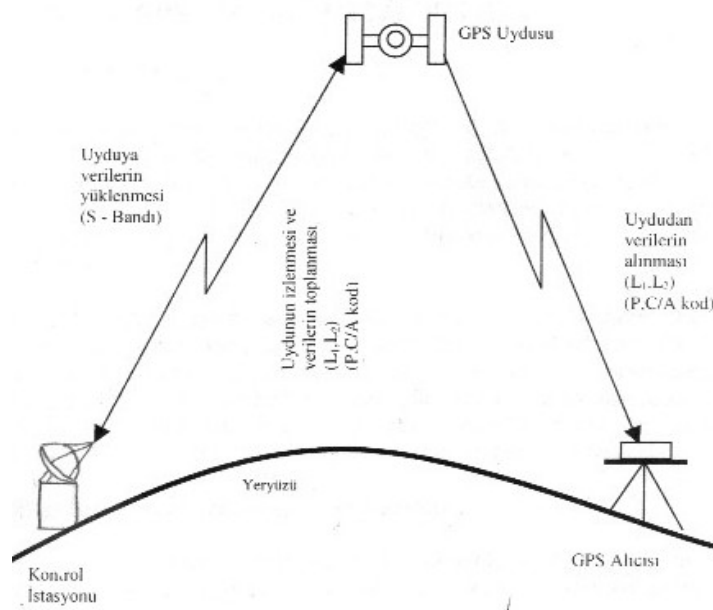
Bu kominikasyon bölümünde elle kullanım için klavye ve ekran birimleri vardır.

- **Enerji kaynağı**

Aletin çalışması için gerekli enerjiyi temin eder. Aletler genellikle 12 voltluk enerjiyle çalışmaktadır. İç batarya ve dış batarya kullanılmaktadır.

- **Osilatör**

Işık akımını elektrik akımına dönüştüren bölümdür.



Şekil 1.5 GPS' in kontrol-uzay-kullanıcı bölümleri ilişkisi

1.4 GPS' de Kullanılan Sinyaller

GPS ölçmelerinde elektromagnetik dalgalar kullanılarak uydulardan kullanıcı bölümüne veri akışı sağlanmaktadır. Her GPS alıcısında iki temel frekans kullanılmaktadır. Bunlar L1 ve L2 dir.

$f_0 = 10,23 \text{ Mhz}$ lik temel frekansın 154 ve 120 katları alınarak

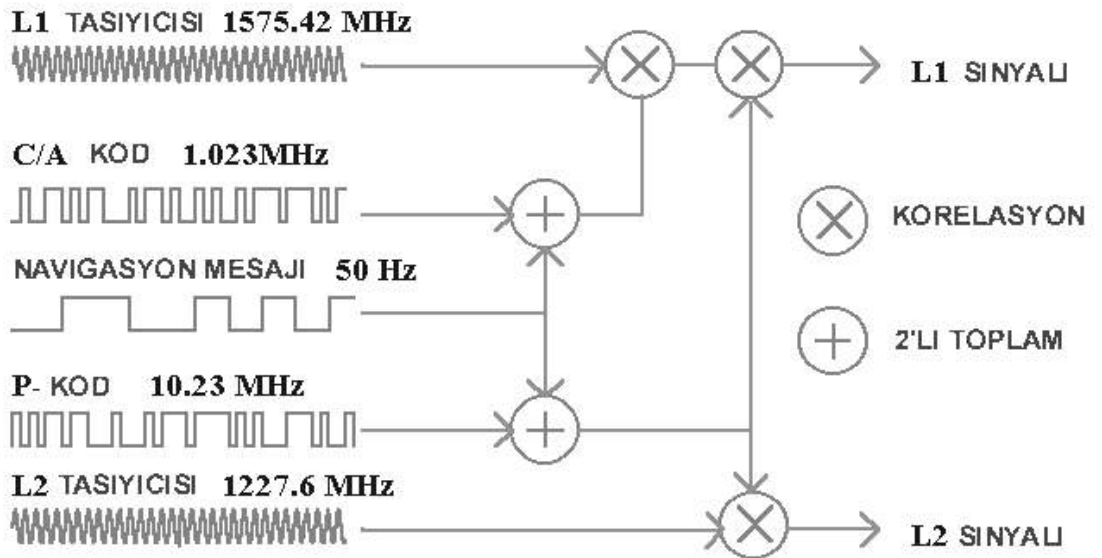
$$L1 \longrightarrow 154 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz}$$

$$L2 \longrightarrow 120 \cdot 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz}$$

lik frekanslar kullanılarak L1 ve L2 sinyalleri elde edilmektedir. Kontrol bölümü ile uydular arasında S-band, iyonosferik etkilerin etkisinin az olmasından dolayı uydu ile kullanıcı bölümü arasında L-band kullanılmaktadır.

GPS sisteminde çift frekans kullanılmasının nedeni ;

- L1 frekansı herhangi bir nedenle kesildiğinde L2 frekansı görev yapar.
- Çift frekans özelliğinden yararlanarak iyonosferik düzeltme olanağı sağlamaktadır.



Şekil 1.6 GPS uydu sinyali

L1 ve L2 taşıyıcı frekansları, uydu saat düzeltmeleri, yörünge parametreleri gibi bilgilerin yeryüzündeki alıcıya (receiver) ulaştırılabilmesi amacıyla kodlarla ve navigasyon mesajı verileri ile modüle edilmişlerdir. Modülasyon işleminde her bir uyduya tek anlamlı PRN kod numarası verilmiştir. Tüm uydular aynı taşıyıcı frekansla veri yayını yapmasına karşın, uydu sinyalleri kod modülasyonu tekniği nedeniyle birbiri ile karışmamaktadır.

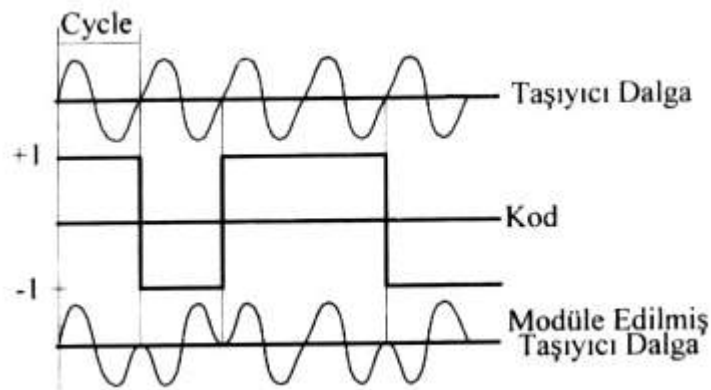
L1 ve L2 taşıyıcı frekansları üzerinde C/A ve P kodları ile navigasyon mesajı verileri modüle edilmiştir. P kod Mayıs 2000' e kadar L1 taşıyıcı frekansına kapalı idi. Bu tarihten itibaren serbest bırakılmıştır.

C/A ve P kod durumları +1 ve -1 ifadelerinin karşılığı olan 0 ve 1 li (binary) değerlerle gösterilmiştir. Her bir 0 ve 1 e chip adı verilmektedir. Normal durumdaki taşıyıcı 0 olup, bunun 180° kaydırılması ile 1 elde edilmektedir. Başka bir ifade ile, kod durumunda her değişiklik oluşunda taşıyıcı dalgada 180° lik kayıklık oluşturularak ikili faz modülasyonu (biphase modulation) gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.7). Bu durumda ilgili değerler aşağıda verilmektedir.

Uydudan yayınlanan sinyal ile alıcının kaydettiği sinyal dopler etkisi nedeniyle kayık olacaktır. Uydudan yayınlanan sinyal f_s , alıcıda kaydedilen sinyal f_r ise aradaki Df farkı aşağıdaki eşitlerdeki gibi olacaktır.

$$Df = f_r - f_s = -\frac{1}{C} \cdot V_s f_s \quad (1.1)$$

$$V_s = \frac{d\rho_R^{SV}}{dt} \quad (1.2)$$



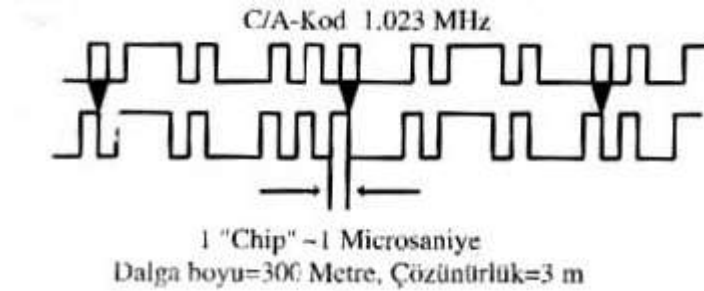
Şekil 1.7 Taşıyıcı dalga'nın biphase modülasyonu

Çizelge 1.1 GPS uydu sinyali bileşenleri

Bileşenin Adı	Frekansı (MHz)	Dalga Boyu (λ)
Temel Frekans	$f_0 = 10,23$	---
L1 taşıyıcı	$154f_0 = 1575,42$	$\sim 19,0$ cm
L2 taşıyıcı	$120f_0 = 1227,60$	$\sim 24,4$ cm
P Kod	$f_0 = 10,23$	30 m
C/A Kod	$f_0/10 = 1,023$	300 m
N Kod	$f_0/20 = 0,5115$	---
Navigasyon Mesajı	$f_0/204600 = 50.10^{-6}$	---

1.4.1 C/A Kod Özellikleri

C/A kod L1 taşıyıcısı üzerine modüle edilmiştir. Bu kod 1 Mhz lik PRN kodu olup, her 1023 bitlik kod sonunda (milisaniyede bir) tekrar etmektedir. C/A kod periyodunun kısa seçilmesinin amacı, GPS alıcılarının uydulara en kısa sürede kilitlenmesini sağlamaktır. PRN kodları bilgi taşımadığı için bunlara chip adı da verilmektedir. C/A kod uzunluğu 1023 chip olup her milisaniyede bir tekrar etmektedir. İki chip arasındaki zaman farkı yaklaşık 1 mikrosaniye olup bu da 300 m lik bir chip uzunluğuna karşılık gelmektedir. Günümüzde sinyal işleme teknikleri ile sinyal çözünürlükleri gözlenen sinyalin dalga boyunun %1 i kadardır. Böylece C/A kodun dalga boyu 300 m, çözünürlüğü 3 m dir.



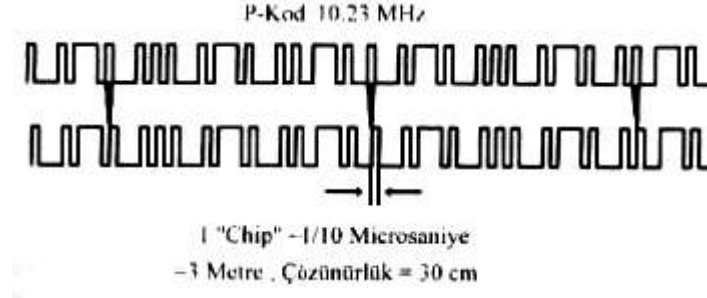
Şekil 1.8 C/A kod dalga boyu ve çözünürlüğü

1.4.2 P Kod Özellikleri

P kod L1 ve L2 taşıyıcı frekansları üzerine modüle edilmiş olup yaklaşık 266,4 günlük kod uzunluğundadır. Kod uzunluğunun tamamı 37 haftaya bölünmüştür. Herbir

uyduya bu 37 haftalık kodun 1 er haftası tahsis edilmiştir. Böylece 37 ayrı PRN P-kodu tahsis edilmiş bulunmaktadır.

P kodun chip uzunluğu 30 m, çözünürlüğü 30 cm dir.



Şekil 1.9 P kod chip uzunluğu ve çözünürlüğü

1.5 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 aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Çizelge 1.2 Navigasyon mesajı alt bölüm içerikleri

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 modellendirme katsayıları bulunmaktadır.
5	Bu bölüm büyük oranda tüm uydular için almanak verilerine ayrılmıştır.

1.6 Almanak Bilgisi

Almanak verileri efemeris ve saat parametrelerinin belli bir kısmını kapsamaktadır. Amacı GPS alıcısı ilk açıldığında ölçüye başlamak için uydunun düşük bir şekilde koordinatlarını sağlamak ve ayrıca alıcının uyduya kilitlenmesini sağlamaktır. Almanak verileri navigasyon mesajının bir bölümü olarak yayınlanmaktadır. Almanak verileri Çizelge 1.3' de verilmektedir.

Çizelge 1.3 Almanak verileri

Parametre	Açıklaması
ID	Uydu PRN numarası
Health	Uydu sağlık durumu
Week	Ölçü anındaki GPS haftası
t_a	Epok
a	Elipsoit büyük yarı eksen
e	Dış merkezlik
M_0	Referans epoktaki ortalama anomali
w	Perigee argümanı
δ_c	Ofset değeri ($\cong 54^\circ$) (Eğim düzeltmesi)
l_0	t_a anındaki rektesansın ile t_0 zamanındaki Greenwich Yıldız zamanı arasındaki fark
W	Yükselen düğüm noktasının rektesans değişimi
a_0	Uydu saati faz sapması (bias)
a_1	Uydu saati frekans sapması (bias)

1.7 GPS' de Kullanılan Koordinat Sistemleri

Jeodezinin temel amacı yeryüzündeki noktaların üç boyutlu konumlarını belirlemektir. Uydulara dayalı koordinat belirlerken iki temel koordinat sistemi kullanılmaktadır.

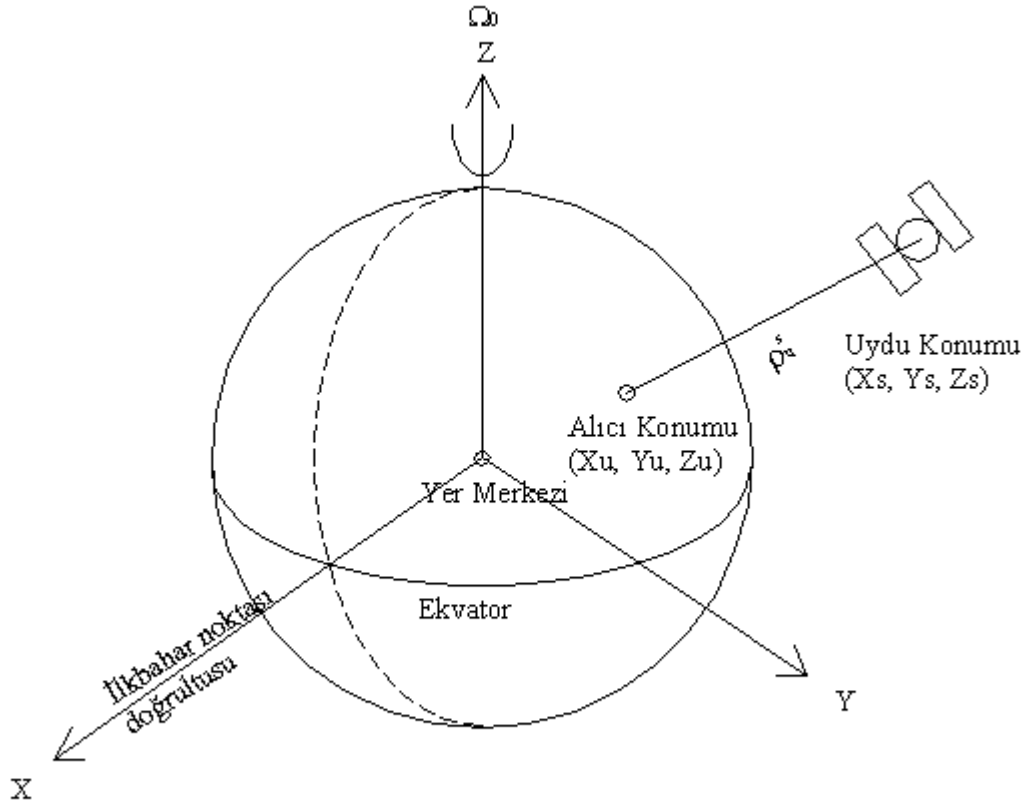
- Uzay sabit koordinat sistemi (inertial)
- Yer sabit koordinat sistemi

Referans sistemleri, Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG) ile Uluslararası Astronomi Birliği (IAU)'nin organizasyonunda IERS tarafından yürütülmektedir. Her bir uydu

jeodezisi tekniği için (VLBI, SLR, LLR, GPS) IERS analiz merkezleri kurulmuştur. Bu merkez bürosu sonuçları birleştirip yayınlar. ICRF ve ITRF sistemlerini tanımlar.

1.7.1 Yer Merkezli İnertial Koordinat Sistemi (ECI)

GPS tekniğinde kullanılan uydu yörüngelerinin ölçülmesi ve belirlenmesinde ECI koordinat sistemi kullanılmaktadır. Bu koordinat sisteminin başlangıç noktası yer merkezidir. Bu sistemde GPS uyduları yeryüzü etrafında Newton Yasalarına göre hareket ederler. ECI koordinat sisteminde XY düzlemi yer ekvator düzlemi ile çakışık, Y eksenini kuzey kutbu doğrultusundadır.



Şekil 1.10 ECI Koordinat Sistemi

ECI koordinat sistemini tanımlarken yeryüzünün düzensiz hareketlerinden dolayı birtakım sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ay ve Güneş ekvator üzerindeki çekim etkisi nedeniyle ekvator düzlemi gök küreye göre hareket halindedir. X eksenini gök küreye, Z eksenini ekvator düzlemine göre tanımlandığından yerin güneş etrafındaki

hareketindeki düzensizlikler ECI sisteminin yukarıda tanımlandığı gibi gerçekte tam anlamıyla inersiyal olmamasına neden olmaktadır. Bu sorunun çözümü için koordinat sistemi eksenlerinin yönlendirilmesi belirli bir an veya epoka göre tanımlanmaktadır. GPS ECI koordinat sistemi 01 Ocak 2000 tarih 12:00 UTC zamanındaki J.2000.00 olarak da ifade edilmekte, ortalama ekvator ve ekinoks ile çakışık kabul edilmektedir.

Bu şekilde tanımlanan koordinat sistemine Ortalama Gök Referans Sistemi (MCRS) ya da Geleneksel Gök Referans Sistemi (CCRS) denilmektedir. Bu sistemde;

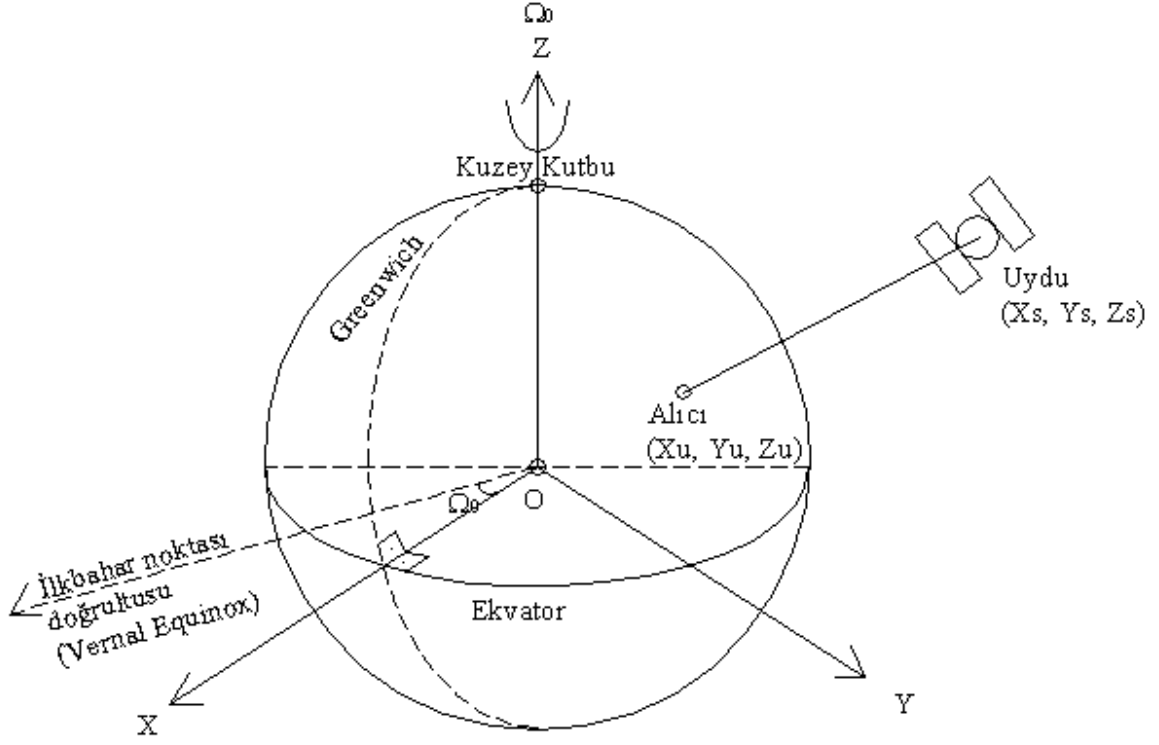
- +X eksenini yeryüzü kitle merkezinden ilkbahar noktası doğrultusunda,
- +Y ve +Z eksenleri yukarıda açıklandığı şekildedir (Şekil 1.10).

1.7.2 Yer Merkezli Yer Sabit Koordinat Sistemi (ECEF)

Yeryüzünde ölçü yapılan bir noktanın koordinatları yeryüzü ile birlikte dönen bir koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Bu koordinat sistemine Yer Merkezli Yer Sabit (ECEF) Koordinat Sistemi denilmektedir. ECEF koordinat sistemine CTRS adı da verilmektedir. ECEF koordinat sistemi şöyle tanımlanmaktadır.

- ECEF koordinat sisteminin merkezi yer kütle merkezi ile çakışiktır.
- Z eksenini coğrafi kuzey doğrultusunda ekvator düzlemine diktir.
- X eksenini ortalama Greenwich meridyeni ile çakışık olup, doğrultusu sıfır derece boylamdır.
- Y eksenini 90° doğu boylam doğrultusunda olup sağ el koordinat sistemini oluşturur.

Bu tanımlara göre X, Y eksenleri yer ile birlikte dönmektedir. CTRF, yeryüzünde tesis edilmiş ve referans (sabit) fiziksel nokta olarak bilinen çok sayıdaki yer kontrol noktasında yapılan ölçümler sonucu belirlenmiş Jeosentrik (Yer merkezli) koordinatlar (X, Y, Z) ile tanımlanmıştır. Bu sabit noktaların çoğuna SLR ve VLBI aletleri tesis edilmiştir. Bu referans sistemine örnek olarak IERS verilebilir. IERS tarafından bu şekilde kurulmuş olan referans sistemine ITRF adı verilmektedir.



Şekil 1.11 ECEF Koordinat Sistemi

IERS her yıl dönme parametrelerini belirlerken ve ITRF sistemini oluştururken bir çok uydu tekniğinden yararlanmaktadır. ITRF noktalarının birbirine karışmasını önlemek için DOMES numaralama sistemi kabul edilmiştir. Bu numaralama sistemi ilk kez MERIT projesi kapsamında kullanılmıştır.

CTRS yani yer merkezli yer sabit koordinat sistemi ile CCRS yani yer merkezli inertial koordinat sistemleri arasında dönüşüm yapılmaktadır.

1.7.3 WGS 84 Sistemi

Bu sistem Dünya Jeodezik Sistemi 1984 olarak da tanımlanmaktadır. Bu sistemin kurucusu ABD savunma dairesi (DoD)'dur. WGS sistemi eski adıyla D.M.A yeni adıyla MIMA tarafından pratik jeodezik referans sistemi olarak geliştirilmiştir.

GPS uydularından yayınlanan Navigasyon mesajı içersindeki uydu yörünge bilgileri WGS-84 sistemindedir. WGS-84 sistemi, başlangıçta Transit doppler gözlemlerine

dayalı olarak geliştirilmiştir. MIMA 1987 yılında transit uyduları için duyarlı efemeris hesaplamalarında kullanmaya başlamıştır.

WGS-84 sistemi ile ITRF sistemi arasındaki ilişkiyi belirlemek ve WGS-84 sisteminin doğruluğunu arttırmak için 24 IGS ve 10 DoD noktasında eşzamanlı GPS ölçüsü yapılmış, 8 IGS noktalarının ITRF-91 koordinatları sabit alınarak DoD noktalarının koordinatları yeniden hesaplanmıştır. Nokta koordinatlarını ortak bir epoka getirmek için NUVEL NNR-1 plaka hareketi modeli kullanılmıştır. Bu şekilde ITRF' e göre hesaplanan WGS-84 koordinatları yaklaşık 10 cm doğrulukta belirlenmiştir. Bu şekilde iyileştirilmiş sisteme WGS-84 adı verilmiştir. Ana kontrol istasyonu bu değişiklikleri Ağustos 1994'den itibaren kullanmaya başlamıştır. WGS-84 sisteminin parametreleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 1.4 WGS sisteminin parametreleri

Parametrenin adı	Semboller	Büyükülüğü
Dönel elipsoidin yarı eksen	a	6378137.0 m
Yerçekimi sabitesi	GM	$3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$
Yerin ortalama açısal hızı	w	$7292115.0 \times 10^{-11} \text{ rads}^{-1}$
Basıklık	f	1/298.257223563

1.7.3.1 Yerel Koordinat Sistemi (LGS)

Bu sistemde de başlangıç noktası GPS alıcı anteninin üzerine kurulduğu noktadır. Bu sistem toposentrik koordinat sistemi olarak da adlandırılmaktadır. Koordinat eksenleri n, e, u harfleri ile gösterilirse;

- n-ekseni jeodezik kuzeyi göstermekte,
- e-ekseni jeodezi doğuyu göstermekte,
- u-ekseni alıcı anteninin kurulduğu noktanın elipsoit normalini göstermektedir.

Böylece n ve e eksenleri yerel jeodezik ufuk düzlemini göstermektedir. LGS sisteminin uzaydaki yönlendirilmesi jeodezik enlem ve boylama göre yapılmaktadır. Böylece uydunun CTRS koordinatlarından (X, Y, Z), LGS koordinatlarına dönüşüm,

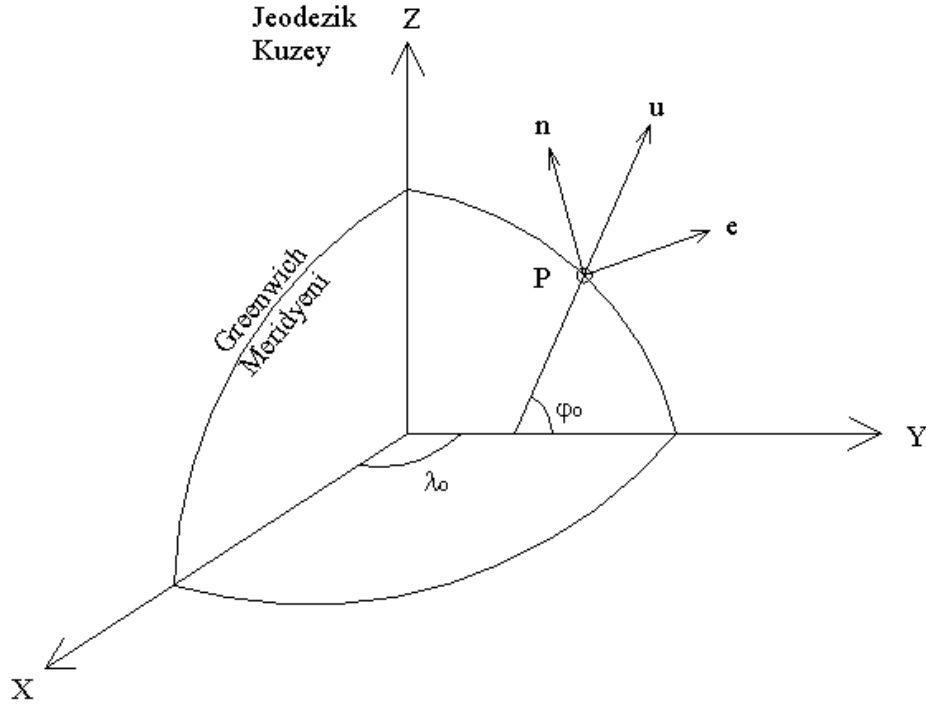
$$\begin{bmatrix} n \\ e \\ u \end{bmatrix} = P_2 R_2(\varphi_0 - 90^\circ) R_3(\lambda_0 - 180^\circ) \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. R_2 , R_3 standart dönüşüm matrislerini, ΔX , ΔY , ΔZ ise;

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

olup, (X_0, Y_0, Z_0) alıcı anteninin kurulduğu P noktasının CTRS koordinatlarıdır.

LGS koordinat sistemi sol-el sistemi, CTRS koordinat sistemi ise sağ-el sistemi olduğundan bu iki sistem arasındaki dönüşüm yansıma matrisi (P_2) kullanılmasını gerektirmektedir. Başka bir deyişle, önce LGS koordinat sistemi yansıma matrisi kullanılarak sağ-el sistemine dönüştürülür.



Şekil 1.12 Yerel Jeodezik Koordinat Sistemi (LGS)

1.7.3.2 Koordinat Sistemi Arasındaki Dönüşümler

1.7.3.2.1 ECEF Koordinatlarından (X, Y, Z) Jeodezik Koordinatlara (φ , λ , h) Dönüşüm

ECEF koordinat sistemi WGS-84 referans elipsoidi ile birlikte kullanılmaktadır. Her iki sistemde de yerin ağırlık merkezi orijindir. Jeodezik dik koordinatlardan jeodezik koordinatlara dönüşüm yapılarak φ ve λ hesaplanır. Yükseklik için;

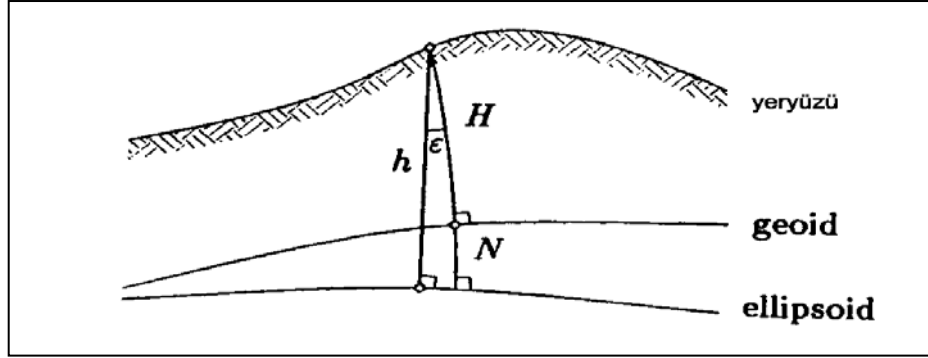
$$h = H + N \quad (1.5)$$

eşitliği kullanılır. Bu eşitlikte,

h : P noktasının elipsoit yüksekliği

H : P noktasının ortometrik yüksekliği

N : P noktasının jeoit yüksekliği



Şekil 1.13 Elipsoit ve ortometrik yükseklik ilişkisi

1.7.3.2.2 Jeodezik Koordinatlardan (φ , λ , h) ECEF Koordinatlarına (X, Y, Z) Dönüşüm

Jeodezik koordinatlardan ECEF koordinatları (1.6) eşitliğinden bulunur. h noktanın elipsoit yüksekliği, N meridyen yarıçapıdır.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\ (N+h) \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda \\ (1-e^2) \cdot (N+h) \cdot \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$N = \frac{a_0}{\sqrt{1-e^2} \sin^2\varphi} \quad (1.7)$$

1.8 GPS'de Kullanılan Zaman Sistemleri

Uydu jeodezisinde 3 farklı zaman sistemi kullanılmaktadır. Bunlar; dinamik zaman, atomik zaman ve yıldız zamanı sistemleridir.

1.8.1 Dinamik Zaman Sistemi

Dinamik zaman sistemi, yerçekimi etkisindeki cisimlerin belli bir yerçekimi teorisine göre belli bir referans sistemindeki hareketlerini tanımlamak için kullanılmaktadır. GPS uydu yörüngelerinin hesaplanmasında kullanılan dinamik zaman sistemine Yersel Dinamik Zaman (TDT) Sistemi denilmektedir. TDT yer gravite alanı içerisindeki hareket için düzenli bir zaman ölçeği oluşturmaktadır.

1.8.2 Atomik Zaman

Bilimsel çalışmalarda temel zaman ölçeği olarak Uluslararası Atomik Zaman (TAI) kullanılmaktadır. TAI' nin hesaplanmasından BIPM ve IERS sorumludur. TAI sürekli bir zaman ölçeğidir. TDT 'nin uygulamaya uygun şekli gibi de düşünülebilir. Bu nedenle aralarındaki ilişki,

$$TDT = TAI - 32^s.184$$

olarak verilmektedir. TAI ile GPS zamanı arasında 19 saniyelik bir kayıklık vardır.

$$TAI = GPS + 19^s.00$$

1.8.3 Yıldız Zamanı

Yıldız zamanı yerin dönmesi ile ilişkilidir. Atomik saatler yokken eski dönemlerde zaman ölçüsü için yerin dönüşü temel alınıyordu. O zamanlar yıldız ve universal zaman sistemleri arasında dönüşüm yapabilen iki zaman sistemi kullanılıyordu. Yıldız ve UT zaman sistemleri atomik zaman ölçeği ile karşılaştırıldığında çok düzensiz olup, günümüzde TTRS ve TCRS sistemleri arasındaki dönüşümde açısal büyüklük olarak kullanılmaktadır.

1.8.4 Jülyen Gün ve Hesabı

Jülyen günü JD, 1 Ocak 4713 (MÖ) 12.00 UT epokundan itibaren geçen ortalama güneş günü sayısıdır.

1.9 GPS' de Kullanılan Uydu Yörüngeleri

GPS uyduları dünyanın etrafında belli bir elips yörüngesi üzerinde dönmektedir. Uydular yörüngede hareket ederken yerin gravite alanının çekim etkisinde kalırlar. Bu yörünge hareketi yerin çekim etkisi ve diğer birçok kuvvetin (ayın ve güneşin çekim etkisi) etkisinin bir sonucudur.

1.9.1 Keppler Yörünge Elemanları

Johannes Keppler 1609 yılında “Astronomi Nova” adlı eserinde gezegen hareketleri ile ilgili iki kanun yer almıştır. 1619 yılında da “Harmonica Mundi Libri V” adlı eserinde üçüncü kanuna yer vermiştir. Bu üç kanun “Keppler Yasaları” olarak bilinmektedir. Bu yasalara göre:

- Gezegenler, güneş etrafında dolanırken bir elips çizerler (yörünge elipsi). Güneş yörünge elipsinin odak noktalarının birindedir.
- Güneşle gezegenin ağırlık merkezini birleştiren doğru eşit zamanlarda eşit alanlar süpürür.
- Bir gezegenin tam dolanım süresi (periyot) P , yörünge elipsinin büyük yarı eksen yarıçapı a ise

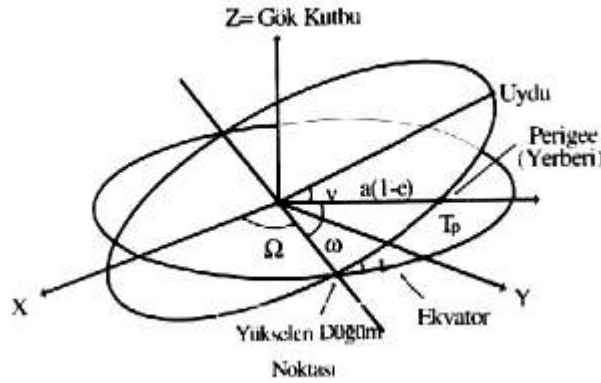
$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \quad (1.9)$$

eşitliği geçerlidir.

Keppler yasaları büyük oranda yer etrafında hareket eden uydular için de geçerlidir. Bu nedenle güneş yerine “yer”, gezegen yerine “uydu” kullanılabilir. Tablo 3.1 de yapay uydular için yörünge elemanları verilmiş ve gök koordinat sistemine göre yörünge düzlemindeki Keppler elemanları Şekil 1.14’ de gösterilmiştir. Keppler elemanları olan (a , e , T_p) yörünge elemanları Şekil 1.14’ de gösterilmiştir. Diğer üç eleman (i , Ω , w) ise yörünge elemanları ECEF koordinat sisteminde yönlendirilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 1.5 Keppler yörünge elemanları

Parametre	Açıklaması
Ω	Yükselen düğüm noktasının rektesasyonu olup ekvator düzleminde ölçülür (radyan).
i	Uydu yörüngesinin ortalama ekvator düzlemine göre eğimi (radyan).
w	Perigee konumu (perigee ile yükselen düğüm noktası arasındaki açı olup, uydu hareketi yönünde ve yörünge düzleminde ölçülür (radyan).
a	Yörünge elipsinin büyük yarı eksen (m)
e	Elipsin dışmerkezliği ($e \leq 0,01$)
T_p	Prigee geçiş anı



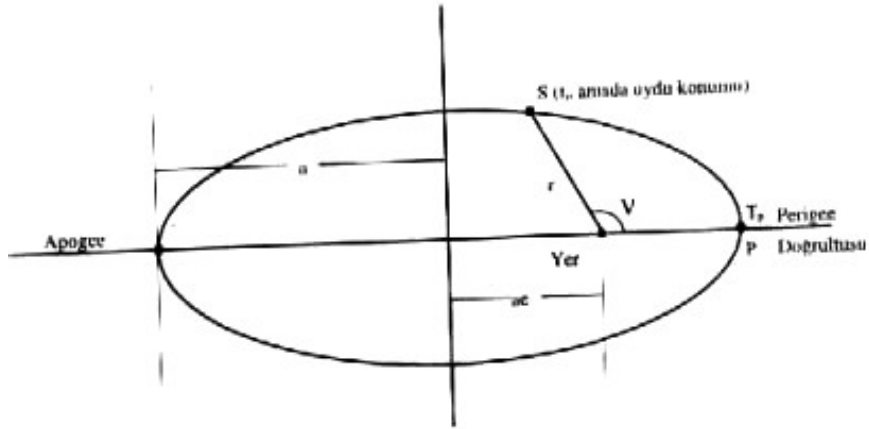
Şekil 1.14 Keppler yörünge elemanları

1.9.2 Uydu Yörünge Hareketi

Newton yerçekimi ve hareket kanunu ile ilgili temel esasları 1687 yılında “Philosophiae Principia Mathematica” adlı eserinde yayımlamıştır. Newton’un kanunları şunlardır :

- Bir cisme mevcut durumunu değiştirecek bir kuvvet etki etmezse cisim ya hareketsizdir ya da düzgün doğrusal hareketine devam eder (eylemsizlik özelliği).
- Bir cismin ivmesi cisme uygulanan kuvvetle doğru orantılıdır ve uygulanan kuvvet ivme ile aynı yöndedir.
- İki cismin karşılıklı olarak birbirlerine etki ettikleri kuvvetler her zaman eşit fakat zıt yöndedir.

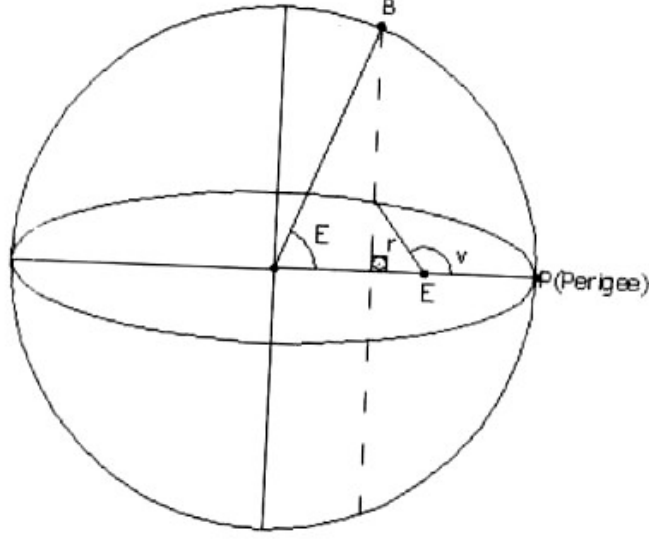
Keppler elemanlarından a , e ve T_p uydu yörüngesinin şeklini belirlemektedir.



Şekil 1.15 Uydu yörüngesi ve Keppler elemanları

Burada; a , uydu yörüngesinin büyük yarı eksen, e yörünge dışmerkezliği ve T_p perigee geçiş anını göstermektedir. Burada yörünge odak noktası E olan bir elipstir ve bu da yerin ağırlık merkezine karşılık gelmektedir. Kısaca E noktası ECI veya ECEF koordinat sisteminin başlangıç noktasıdır. t_0 anı uydunun yörüngedeki belli bir anda bulunduğu noktayı belirlemekte ve “epok” olarak tanımlanmaktadır. Epok, GPS efemeris mesajının bir parçası olarak yayınlanmakta ve efemeris zamanı TOE adını almaktadır. P noktası uydunun yer merkezine en yakın noktası olup yerberi (perigee) adını alır, uydunun bu noktadan geçişine “perigee geçiş anı” denir ve T_p ile gösterilir.

V gerçek anomali olarak tanımlanır. Gerçek anomali zamanla orantılı lineer bir değişim göstermediği için zamana bağlı lineer değişim gösteren “ortalama anomali” kullanılır. Gerçek anomaliden ortalama anomaliye geçiş iki aşamada gerçekleştirilir. Bunlardan ilkinde dışmerkezlik anomali (E), O merkezinde P den itibaren OB doğru parçası kadar saat istikameti tersi yönünde ölçülen açıdır.



Şekil 1.16 Dışmerkezlik anomali

E değeri

$$E = 2 \arctg \left[\sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{1}{a} v \right) \right] \quad (1.10)$$

eşitliğinden hesaplanır. E değeri kullanılarak ortalama anomali

$$M = E - e \sin E \quad (1.11)$$

eşitliğinden hesaplanır.

1.9.3 GPS Uydu Yörüngeleri (Efemerisler)

Anlık (real-time) konum belirlemede GPS navigasyon mesajının bir parçası olarak yayınlanan yayın (broadcast) efemerisi ve saat bilgileri kullanılmaktadır. Öte yandan ölçü sonrası değerlendirmede duyarlı GPS yörünge ve saat bilgilerinin kullanılması tercih edilir. Hesaplanan duyarlı yörünge ve saat bilgileri internet aracılığı ile tüm kullanıcılara ücretsiz sunulmaktadır. Duyarlı yörünge ve saat bilgilerini üreten kurumların bazıları aşağıda verilmektedir.

Çizelge 1.6 Duyarlı yörünge ve saat bilgilerini veren kurum ve kuruluşlar

Kurumun Adı	Kullanılan Yazılım
Jeo Propulsion Laboratory (JPL)	GIPSY
Seripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC)	GAMIT
Center of Orbit Determination in Europe (CODE)	BERNESE
National Geodetic Survey (NGS)	PAGE5

1.9.3.1 Yayın Efemerisi (Broadcast Efemeris)

Yayın efemeris bilgileri GPS kontrol bölümü izleme istasyonlarından toplanan kod (pseudorange) gözlemlerine dayalı olarak üretilirler.

Yayın efemerisi anlık olarak yayınlanmakta ve yaklaşık 12-36 saatlik süre için geçerlidir. 6 izleme istasyonundan toplanan verilerle 5-10 m lik bir yörünge doğruluğu elde edilmektedir. Yayın efemerisi WGS84 sisteminde olup yayınlanan parametreler mevcuttur.

Yayın efemerisi sayısal integrasyon yöntemi ile hesaplanır. Navigasyon mesajı içerisinde Kepler elemanları ve bunların bazılarına ilişkin zamana bağlı değişimler (düzeltmeler) yayımlanmaktadır. Hesaplanan elemanlar iki saatte bir yayımlanmaktadır.

1.9.3.2 NGS Duyarlı Efemerisi

NGS duyarlı efemerisi ABD NOAA tarafından üretilmektedir. Bu efemeris gözlem anından itibaren 2-6 gün arasında kullanıcıların hizmetine internet aracılığı ile UNIX sıkıştırılmış formatta sunulmaktadır.

NGS efemerisi ITRF sisteminde IERS noktalarına ait duyarlı koordinatlar kullanılarak hesaplanır ve SP3 formatında ASCII olarak üretilmektedir. NGS SP3 formatındaki dosya isimlendirilmesinde NGS0www.aaa genel tanımlaması kullanılmaktadır. Burada;

www: GPS haftasını, örneğin 1064

n : Haftanın gününü, örneğin n=0 Pazar, n=1 Pazartesi,....., n=6 Cumartesi

aaa : Dosya türünü, örneğin, SP3 (efemeris),

SUM (özet bilgi),

ERP (yer dönme parametreleri)

göstermektedir.

1.9.3.3 IGS Duyarlı Efemerisi

IGS efemeris bilgilerinin üretimi 21 Haziran 1992 de gerçekleştirilen deneme amaçlı bir GPS ölçü kampanyası ile başlatılmıştır. Açıklanan yayın ve NGS duyarlı efemerislerinin tersine IGS yörüngeleri, duyarlı P kod alıcılarının kurulu olduğu yoğun bir global ağda yapılan faz gözlemlerinden yararlanarak oluşturulmuştur. Türkiye'nin de içinde olduğu Avrupa bölgelerinde IGS izleme ağı oluşturulmuştur. IGS yörüngelerinin resmi olarak dağıtımı 1 Ocak 1994 de başlamış olup, dağıtım IGS merkezi ile global ve bölgesel veri analiz merkezleri tarafından yapılmaktadır.

1.10 GPS ile yapılan Gözlemler ve Kullanılan Matematiksel Modeller

GPS ile iki temel büyüklük gözlenmektedir. Bunlar;

- Kod (Pseudorange)
- Taşıyıcı dalga fazıdır.

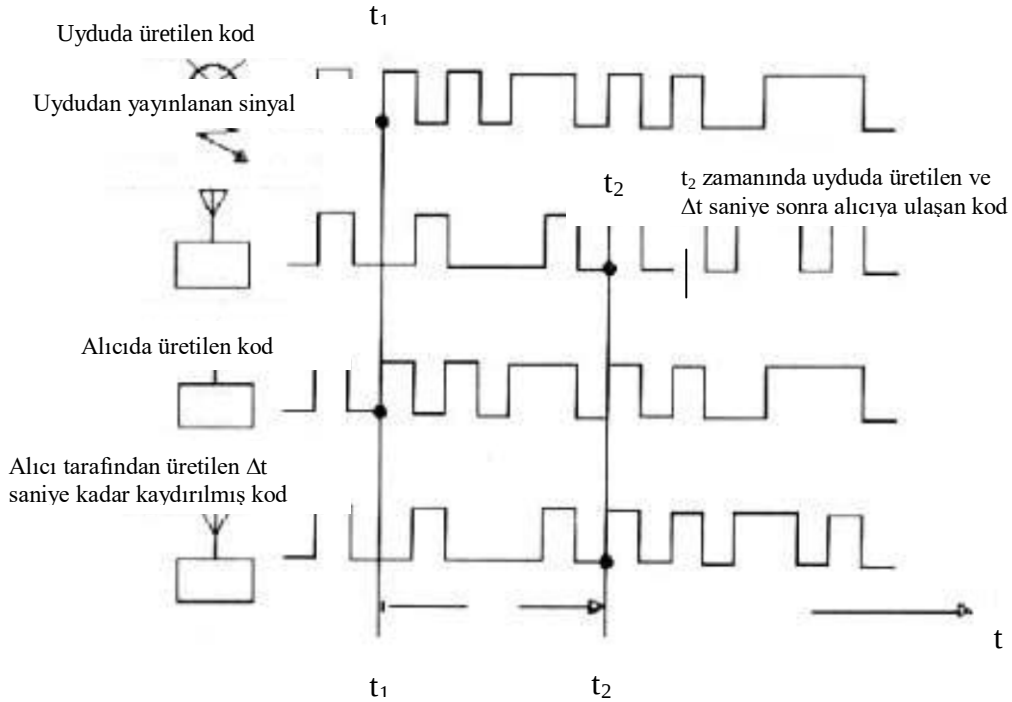
Yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda ve bilimsel çalışmalarda faz gözlemleri, navigasyon amaçlı (real time) uygulamalarda ise pseudorange ölçüleri kullanılmaktadır. Jeodezik amaçlı GPS ölçülerinde doğrudan faz ölçüleri kullanmak yerine bunlardan yararlanarak elde edilen lineer kombinasyonlar ve fark gözlemleri kullanılmaktadır.

1.10.1 Kod (Pseudorange) Gözlemleri ve Uydu-Alıcı Uzaklığının Hesabında Matematiksel Modeller

Pseudorange, uydudan yayınlanan sinyalin uydudan çıkış anı ile alıcıya ulaştığı ana kadar geçen zamanın ışık hızı ile ölçeklendirilmesiyle elde edilen uydu-alıcı arasındaki ham uzunluktur. Sinyalin uyduyu terk ettiği andan alıcıya ulaşana kadar geçen zaman alıcı ve uydu tarafından üretilen PRN kodlarının karşılaştırılması ile elde edilmektedir.

Uydu ile alıcı saatlerindeki hatalardan dolayı elde edilen uzunluk gerçek geometrik uzunluktan farklı olacaktır. Bu nedenle modellendirilemeyen saat hatalarının neden olduğu sapmalar (bias) nedeniyle elde edilen uydu-alıcı uzaklığına pseudorange (ham uzunluk) adı verilmektedir. Pseudorange C/A ve P kodlarının her ikisi kullanılarak belirlenebilmektedir.

Uydu ve alıcı saatlerinin GPS zamanı ile çakışık olduğu, yani saat hatasının olmadığı ve uydudan alıcıya ulaşan sinyalin atmosferik etkilerin olmadığı bir ortamda yayıldığı kabul edilirse, sinyal uydudan alıcıya ulaşana kadar geçen zamanın ışık hızıyla çarpılmasıyla pseudorange elde edilmektedir.



Şekil 1.17 Uydu ve alıcı PRN kodlarının karşılaştırılması

$$\rho_R^S = c(t_r - t^s) = c \cdot \Delta t \quad (1.12)$$

Ancak bu varsayımlar gerçekte sağlanamadığından eşitlik ;

$$c[(t_r + \Delta t_R) - (t^s + \Delta t^s)] = \rho_R^S + I_R^S + T_R^S \quad (1.13)$$

şeklinde yazılabilir. (1.12) eşitliği yeniden düzenlenirse

$$c(t_r - t^s) = \rho_R^S + c(\Delta t^s - \Delta t_R) + I_R^S + T_R^S \quad (1.14)$$

eşitliği elde edilir. Burada

t^s : Sinyalin uyduyu terk ettiği andaki GPS zamanı

t_R : Sinyalin alıcıya ulaştığı andaki GPS zamanı

Δt^s : Uydu saati zamanı ile GPS zamanı arasındaki fark

Δt_R : Alıcı saati zamanı ile GPS zamanı arasındaki fark

I_R^S : İyonosferik etki

T_R^S : Troposferik etki

c : Işık hızı ($c=299792458$ m/s)

ρ_R^S : Uydu ile alıcı arasında, sinyalin uydudan ayrıldığı ve alıcı tarafından alındığı epoklardaki toposentrik uzunluktur. Toposentrik uzunluk ρ_R^S

$$\rho_R^S = |S - R| = \sqrt{(X^S - X^R)^2 + (Y^S - Y^R)^2 + (Z^S - Z^R)^2} \quad (1.15)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$R=(X_R, Y_R, Z_R)$ anten kurulan noktanın koordinatları

$S=(X^S, Y^S, Z^S)$ uydu koordinatlarıdır.

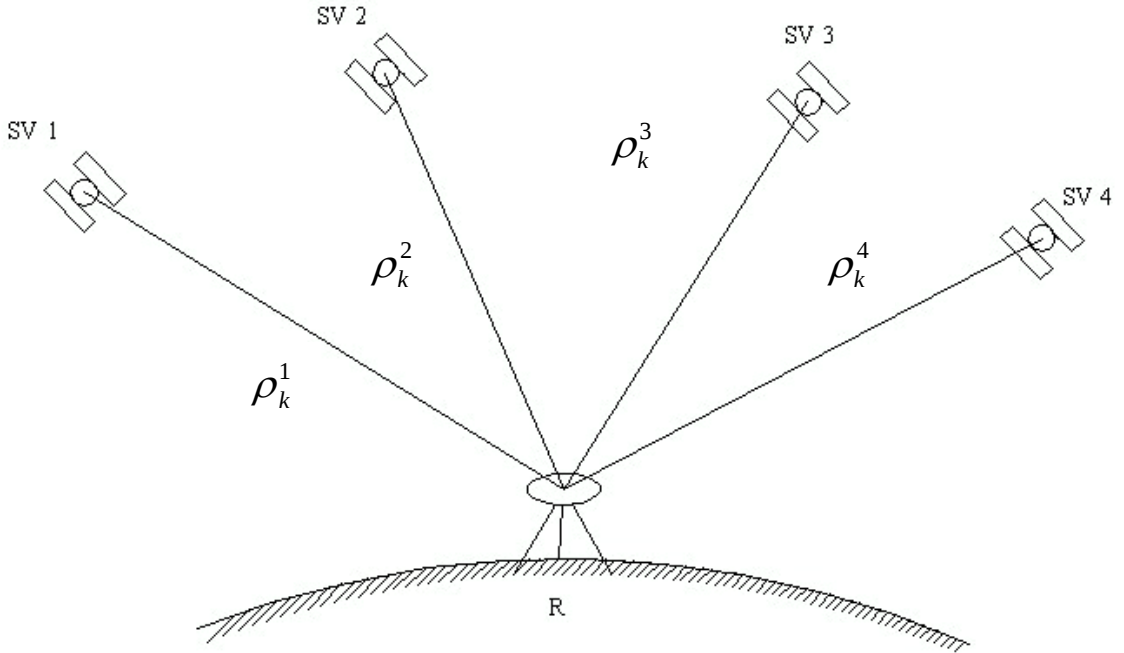
(1.14) eşitliği ;

$$c(t_r - t^s) = |S - R| + c(\Delta t^s - \Delta t_R) + I_R^S + T_R^S \quad (1.16)$$

şeklini alır. Uydunun konumu efemeris bilgilerinden bilindiği varsayılırsa (1.16) eşitliğinde 7 bilinmeyen kalır. Bu bilinmeyenler ;

- Uydu ve alıcı saat hataları
- Alıcı anteninin koordinatları (X_R, Y_R, Z_R)
- İyonosferik etki
- Troposferik etkidir.

Uydu saatleri kontrol altında tutulabilir ve atomik saatlerin kullanılması ile uydu saat hataları yok edilebilmektedir. Alıcı saatlerinde durum farklıdır. Bunların anlık hataları belirsizdir. Bu nedenle ölçülen uzunluk alıcı saat hatasını bilinmeyen olarak içermektedir. İyonosferik ve troposferik etkiler sonraki bölümlerde açıklanacak modellerle yok edilebileceklerinden bu bilinmeyenlerde yok edilmiş olmaktadır.



Şekil 1.18 Dört uyduya eşzamanlı pseudorange ölçüsü

Böylece (1.14) eşitliğinden geriye 4 bilinmeyen kalmaktadır. Bu 4 bilinmeyen için 4 uyduya eş zamanlı yapılmış 4 pseudorange ölçüsüne gereksinim vardır. Buna göre

$$\begin{aligned}
\rho_R^{SV1} &= \sqrt{(X_R^{SV1} - X_R)^2 + (Y_R^{SV1} - Y_R)^2 + (Z_R^{SV1} - Z_R)^2} + c\Delta R \\
\rho_R^{SV2} &= \sqrt{(X_R^{SV2} - X_R)^2 + (Y_R^{SV2} - Y_R)^2 + (Z_R^{SV2} - Z_R)^2} + c\Delta R \\
\rho_R^{SV3} &= \sqrt{(X_R^{SV3} - X_R)^2 + (Y_R^{SV3} - Y_R)^2 + (Z_R^{SV3} - Z_R)^2} + c\Delta R \\
\rho_R^{SV4} &= \sqrt{(X_R^{SV4} - X_R)^2 + (Y_R^{SV4} - Y_R)^2 + (Z_R^{SV4} - Z_R)^2} + c\Delta R
\end{aligned} \tag{1.17}$$

şeklinde yazılabilir. (1.17) eşitlikleri lineer değildir. Bunların çözümü için farklı teknikler (kapalı formüller, lineerleştirilerek interaktif çözüm, kalman filtreleme vb) mevcuttur. Bu eşitlikler Taylor serisine açılıp iki ve daha yüksek dereceden terimler gözardı edilebilir. Lineerleştirme için noktaların yaklaşık koordinatları ve alıcı saat hatası bilinmeyeninin yaklaşık değeri bilinmesi gerekir. Yaklaşık (X_0, Y_0, Z_0) değerler ile kesin değerler arasında;

$$\begin{aligned}
\overline{X}_R &= X_0 + \delta X \\
\overline{Y}_R &= Y_0 + \delta Y \\
\overline{Z}_R &= Z_0 + \delta Z
\end{aligned} \tag{1.18}$$

olup bilinmeyenlerin dengeli değerleri arasında

$$L_i + V_i = f(X_0 + \delta X, Y_0 + \delta Y, Z_0 + \delta Z) \tag{1.19}$$

bağıntısı vardır. (1.19) eşitliği Taylor serisine açılıp yüksek dereceden terimler ihmal edilirse (1.20) eşitliği elde edilir.

$$\rho_R^{SV} = \rho_0^{SV} - \frac{X^{SV} - X_0}{r_0} \delta X - \frac{Y^{SV} - Y_0}{r_0} \delta Y - \frac{Z^{SV} - Z_0}{r_0} \delta Z + c\delta t \tag{1.20}$$

elde edilir. ρ_0^{SV} yaklaşık uydu-alıcı uzunluğu (pseudorange) olup

$$\rho_0^{SV} = \sqrt{(X^{SV} - X_0)^2 + (Y^{SV} - Y_0)^2 + (Z^{SV} - Z_0)^2} + c.t_0 \tag{1.21}$$

eşitliği ile ifade edilir. Eş zamanlı 4 uyduya gözlem yapılırsa yukarıdaki eşitlik matris formunda aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{X^{SV1} - X_0}{r_0} & \frac{Y^{SV1} - Y_0}{r_0} & \frac{Z^{SV1} - Z_0}{r_0} \\ \frac{X^{SV2} - X_0}{r_0} & \frac{Y^{SV2} - Y_0}{r_0} & \frac{Z^{SV2} - Z_0}{r_9} \\ \frac{X^{SV3} - X_0}{r_0} & \frac{Y^{SV3} - Y_0}{r_0} & \frac{Z^{SV3} - Z_0}{r_9} \\ \frac{X^{SV4} - X_0}{r_0} & \frac{Y^{SV4} - Y_0}{r_0} & \frac{Z^{SV4} - Z_0}{r_9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \\ c \cdot \delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_R^{SV1} - \rho_0^{SV1} \\ \rho_R^{SV2} - \rho_0^{SV2} \\ \rho_R^{SV3} - \rho_0^{SV3} \\ \rho_R^{SV4} - \rho_0^{SV4} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Kısa gösterimle (1.23) eşitliği yazılabilir.

$$A \cdot \delta X = \Delta \rho_R^{SV} \quad (1.23)$$

A, düzeltme denklemleri katsayılar matrisini, δX , bilinmeyenlere getirilecek düzeltmeleri, $\Delta \rho_R^{SV}$ ise düzeltmeler (gözlenen, hesaplanan) vektörünü göstermektedir. (1.22) eşitliğinin çözümü ile

$$\delta X = A^{-1} \cdot \Delta \rho_R^{SV} \quad (1.24)$$

yazılabilir. Daha açık bir gösterimle

$$\delta X = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot \Delta \rho_R^{SV} \quad (1.25)$$

bulunabilir.

1.10.2 Faz Gözlemi ve Uydu-Alıcı Uzaklığının Hesabında Matematiksel Modeller

Faz gözlemleri GPS ölçmelerinde en çok kullanılan gözlemlerdir. Faz gözlemleri taşıyıcı dalganın C/A ve P kodları yerine modüle edilmemiş L1 ve L2 sinyalleri ile yapılmaktadır. Taşıyıcı dalga fazı pseudorange gözlemlerindeki gibi elde edilmektedir. Yani, uydudan yayınlanan fazın benzeri alıcı içerisinde de üretilmekte ve bunlar arasında korelasyon sağlanmaktadır. Başka bir deyişle t_s zamanında uydudan yayınlanan sinyalin L1 ve L2 taşıyıcı fazı ile t_R zamanında alıcı tarafından üretilen referans sinyalinin fazı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Örneğin L1 taşıyıcının dalga boyu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.26)$$

eşitliğinden

$$\lambda = \frac{3000000000m/s}{1575420000m/s} = 0.1904m \quad (1.27)$$

dir. Atmosferik etkiler, relativistik etkiler, alıcı saat hatası ve diğer bozucu etkiler dikkate alınmazsa anlık faz farkı

$$\phi_R^{SV}(t_R) = \phi^{SV}(t^{SV}) - \phi_R(t_R) \quad (1.28)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada $\phi^{SV}(t^{SV})$, t^{SV} uydu saati zamanında yayınlanan sinyalin fazını, $\phi_R(t_R)$ ise alıcının uydu sinyalini aldığı t_R zamanında alıcıda üretilen fazı göstermektedir.

Pseudorange gözlemi ile faz gözlemi arasındaki farklar şunlardır:

- Pseudorange tam olarak ölçülürken, faz gözlemlerinde faz başlangıç belirsizliği söz konusudur (ambiguity).
- Taşıyıcı dalga fazı iyonosferden geçerken hızlandığından iyonosferden dolayı faz gözlemlerine getirilecek düzeltme (-) işaretlidir. Kod ölçüleri ise yavaşladığından iyonosfer düzeltmesi kod gözlemleri için (+) işaretlidir.
- Faz ölçülerinin doğruluğu kod ölçüleri doğruluğundan daha yüksektir.

(1.28) eşitliği yukarıdaki bilgiler çerçevesinde yazılırsa:

$$\phi_R^{SV}(t) = \phi^{SV}(t) - \phi_R(t) + N_R^{SV}(1) + \text{Sinyal.gürültüsü(noise)} \quad (1.29)$$

elde edilir. Burada tüm gözlenenler aynı epokta olup

$\phi_R^{SV}(t)$, SV uydusu ve R alıcısı için dalga boyu biriminde faz gözlemi
 $\phi^{SV}(t)$, alıcı tarafından t zamanında (GPS zamanı) kaydedilen sinyalin fazı)

$\phi_R(t)$, t zamanında alıcıda üretilen sinyalin fazı
 $N_R^{SV}(1)$, başlangıç epogundaki faz başlangıç bilinmeyenidir.

İyonosferik ve troposferik etkiler dahil faz farkı

$$\phi_R^{SV}(t_R) = \phi^{SV} \left(t_R - \frac{\rho_R^{SV}}{c} - \frac{I_R^{SV} + T_R^{SV}}{c} \right) - \phi_R(t_R) + N_R^{SV} \quad (1.30)$$

olup I_R^{SV} iyonosferik etkiyi, T_R^{SV} ise troposferik etkiyi göstermektedir. Faz ölçümünün 0,01 (cycle) doğruluğunda belirlenebilmesi için alıcı saat doğruluğunun 0,01 nanosaniye olması gerekir.

1.10.3 Faz Farkı Modelleri

GPS ile kod ve faz gözlemleri yapılmaktadır. Kod ve faz gözlemlerinden yararlanarak oluşturulan farklarla alıcı saat hataları, uydu saat hataları ve faz başlangıç belirsizliği gibi birçok ortak hata giderilebilmektedir. GPS gözlemlerinde fark kombinasyonları farklı şekilde yapılmaktadır. Fark gözlemleri genellikle

- Alıcılar arasında
- Uydular arasında
- Ölçü epokları arasında veya
- L1 ve L2 frekansları arasında yapılmaktadır.

1.10.3.1 Tekli Farklar

İki farklı alıcı noktasında aynı uyduya eş zamanlı olarak yapılan faz gözlemleri arasındaki farklar anlaşılır.

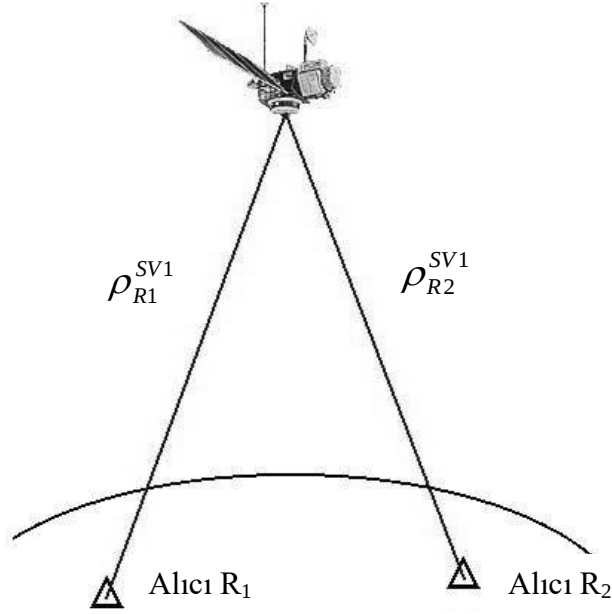
Tekli farklar için (1.31) eşitliği yazılabilir.

$$\Delta\phi_{R2R1}^{SV1}(t) = \phi_{R2}^{SV1}(t) - \phi_{R1}^{SV1}(t) \quad (1.31)$$

Δ fark operatörüdür. (1.29) eşitliği (1.31) de yerine konulursa faz başlangıç belirsizliği

$$N_{R2R1}^{SV1}(t) = N_{R2}^{SV1} - N_{R1}^{SV1} \quad (1.32)$$

şeklini alır.



Şekil 1.19 Alıcılar arasında tekli fark gözlemi

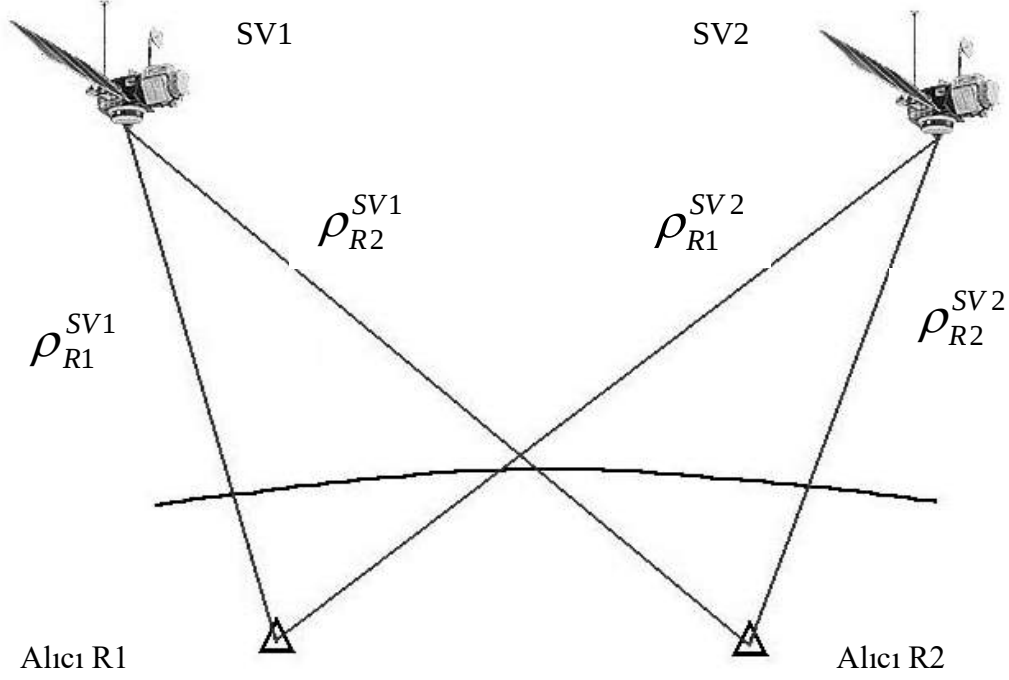
Bu yöntemle temel olarak uydu saat hataları giderilmektedir. Tekli fark, uydular arasında aynı bir alıcı için oluşturulursa bu durumda alıcı saati hataları giderilmiş olur.

1.10.3.2 İkili Farklar

İki tekli farkın farkı olarak tanımlanabilir. Başka bir anlamda, aynı epokta iki farklı uydu için oluşturulan tekli farklar arasındaki farktır.

İkili fark gözlemleri (1.33) eşitliği ile ifade edilir.

$$\Delta\Delta_{R1R2}^{SV1SV2}(t) = \Delta_{R1R2}^{SV1}(t) - \Delta_{R1R2}^{SV2}(t) \quad (1.33)$$



Şekil 1.20 Alıcı-uydu ikili fark gözlemi

Bu yöntemle uydu ve alıcı saat hatalarının her ikisi birden giderilmektedir. Genel olarak bu eşitlik GPS ölçülerini değerlendirme yazılımlarında temel gözlem eşitliği olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntemle kısa baz uzunluklarında troposferik ve iyonosferik etkiler de giderilmektedir.

1.10.3.3 Üçlü Farklar

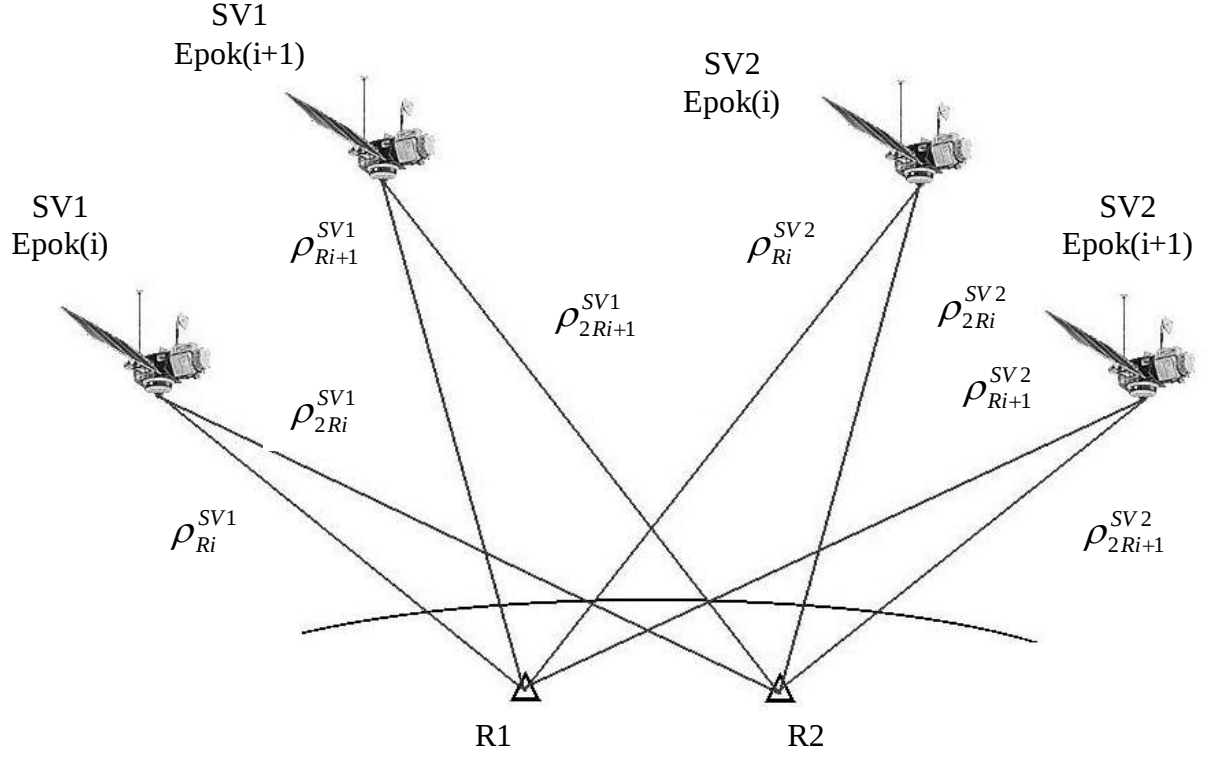
Üçlü fark, iki farklı epokta oluşturulan iki ikili fark arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Üçlü fark gözlemleri için genel eşitlik aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\Delta\Delta_{R1R1}^{SV1SV2}(t_i, t_{i+1}) = \Delta\Delta_{R1R1}^{SV1SV2}(t_{i+1}) - \Delta\Delta_{R1R1}^{SV1SV2}(t_i) \quad (1.34)$$

Üçlü fark gözlemlerinin oluşturulmasının temel amacı taşıyıcı faz belirsizliğinin (ambiguity) giderilmesidir.

Neticede, R sayıda alıcının, T sayıdaki gözlem epoğunda, s sayıdaki uyduya gözlem yaptığı düşünülürse R.S.t sayıda gözlem yapılmış olacaktır. Bu da bize

(R-1).S.T	sayıda tekli faz farkı
(R-1)(S-1).T	sayıda ikili faz farkı
(R-1)(S-1)(T-1)	sayıda üçlü faz farkı oluşturulabileceğini ifade etmektedir.



Şekil 1.21 Uydu-alıcı üçlü fark gözlemi

1.11 Hata Kaynakları

GPS günümüzde en yüksek doğruluklu global bir konum belirleme ve navigasyon sistemidir. Buna karşın zayıf tarafları da vardır. GPS ölçü sonuçlarını etkileyen bazı düzenli ve düzensiz hatalar söz konusudur. GPS ile konum belirlemede esas olan uydu-alıcı uzaklığıdır. Bu nedenle uzunluk belirlemede etkili olan hata kaynakları şunlardır:

- Uydu efemeris hataları
- Uydu saat hataları
- İyonosferik etki
- Troposferik etki
- Sinyal yansıma (Multipath) etkisi

- Anten faz merkezi hataları
- Taşıyıcı dalga faz belirsizliği (Ambiguity) ve faz kesiklikleri (cycle-slips)
- Seçimli doğruluk erişimi

1.11.1 Uydu Efemeris Hataları

GPS navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan uydu konum bilgilerinin doğruluğunun düşük olduğu veya kasıtlı olarak yanlış yayınlanması durumunda karşılaşılan hataya efemeris hatası denilmektedir. Uydu efemeris hatası uydu yörüngelerinin daha duyarlı hesabını gerektirir. Bu da uydulara etki eden hataların çok iyi ölçülmesi ve modellenmesine bağlıdır.

Birkaç kilometrelik bazlarda efemeris hatasının etkisi çok küçüktür. Baz büyüdükçe bu hatanın büyüklüğü de artmaktadır.

ABD politikası gereği uyduların yörünge koordinatlarında ve uydu saatlerinde bazen bozucu etkiler uygulanmaktadır. Bu bozucu etkiye Seçimli Doğruluk Erşimi (SA) adı verilmektedir. Bu etkiler firmaların baskısı ile Mayıs 2000'den itibaren kaldırılmıştır.

1.11.2 Uydu Saat Hataları

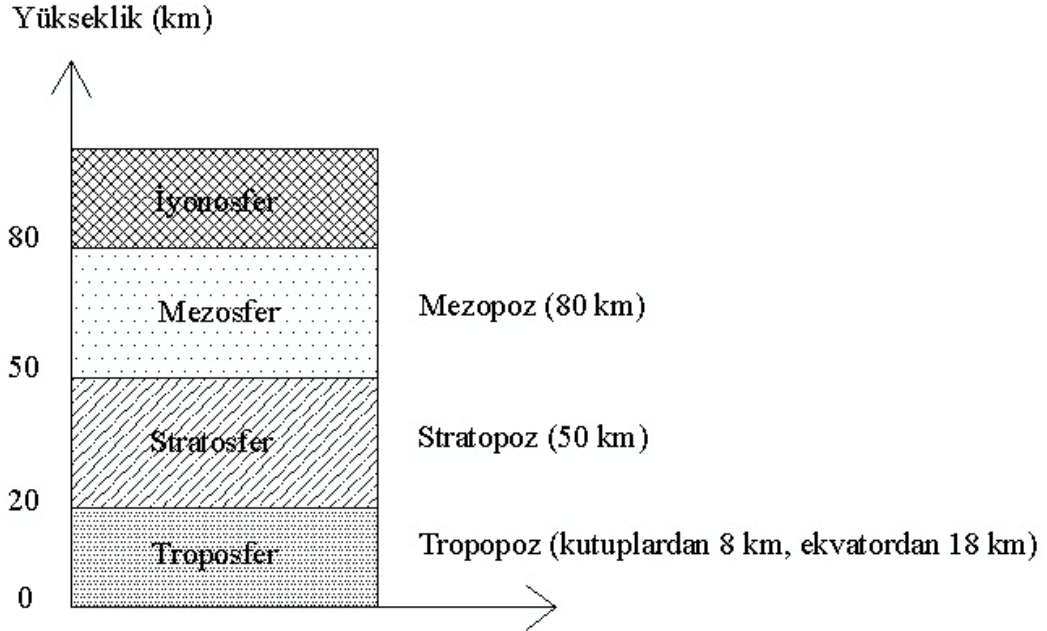
GPS ile konum belirlemenin temelini zaman ölçüsü oluşturmaktadır. Bu nedenle GPS uydularında stabilitesi yüksek atomik saatler kullanılmaktadır. Uydu ve alıcı saatlerinin GPS zamanına göre yeterli doğrulukta senkronize edilmemesi saat hatalarının temelini oluşturur.

Uydu saat hataları kontrol bölümü tarafından sürekli izlenmekte ve yayın efemerisi 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.

1.11.3 İyonosfer Etkisi

İyonosfer, hava moleküllerinin ileri derecede yoğunlaştığı ve elektrik iletkenliği kazandığı yüksek atmosfer bölgelerinin tümüdür. İyonosfer elektromagnetik dalgaların yayılmasını etkileyebilecek kadar serbest elektron yoğunluğuna sahip üst atmosfer tabakaları (70-3000 km) olarak tanımlanır.

İyonlaşma ve serbest elektron yoğunluğu doğrudan güneş ışımaya bağlıdır. İyonosferin elektromagnetik dalgalar üzerindeki etkisi gündüz geceden daha çok olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 1.22 GPS sinyalinin geçtiği atmosfer tabakaları

1.11.4 Troposfer Etkisi

GPS uydusundan yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki boşlukta ilerlerler. Bu sinyaller iyonosferden geçerler. Daha sonra mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından geçerek alıcıya ulaşırlar.

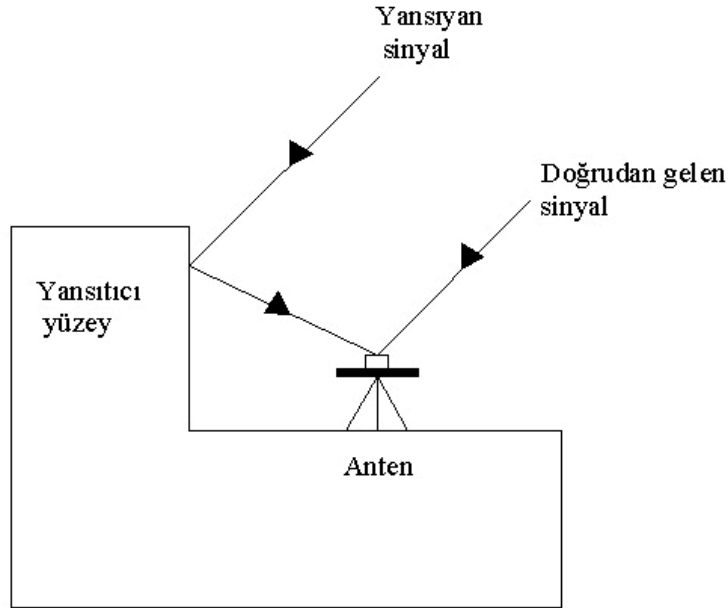
Troposfer, havanın yeryüzü ile temas ettiği en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda 8 km, ekvatorlarda 18 km'dir. Hava olayları genel olarak troposferin 3-4 km'lik alt kısımlarında görülmektedir.

1.11.5 Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi

GPS alıcı antenleri her yönden gelen uydu sinyallerini eş zamanlı alabilme özelliğine sahiptir. Arazi yapısı ve sinyal yükseklik açısına bağlı olarak istenmeyen sinyal yansımaları ile karşılaşılır.

Uydulardan yayınlanan sinyallerin alıcı antene bir veya daha çok yol izleyerek esas sinyale karışıp ulaşmasına sinyal yansıma (multipath) etkisi denir. Uyduların neden olduğu etkiler ve alıcı antenin çevresindeki yüzeylerin neden olduğu etkiler kısa kenarlı ağlarda bazın iki uzundaki anten için aynı büyüklüğe sahip olacağından görelî konum belirleme yöntemi ile büyük ölçüde giderilmektedir.

Alıcı antenin çevresinin neden olduğu yansımaların olası kaynakları yapılar, ağaçlar, su yüzeyleri ve diğer yansıtıcı yüzeylerdir. Sinyal yansıma etkisinin büyüklüğü dalga boyu ile orantılıdır.



Şekil 1.23 Alıcı anteni sinyal yansıması

Anten sinyal yansımasının kod ölçülerindeki etkisinin büyüklüğü P kod için en çok 29.3 m, C/A kod için 293.2 m'dir. Faz ölçülerinde bu hata miktarı L1 frekansı için yaklaşık 4.8 cm'dir.

1.11.6 Alıcı Anteni Faz Merkezi Hatası

Alıcı anteni faz merkezi GPS sinyallerinin antene ulaştığı noktadır. Bu nokta genellikle geometrik faz merkezinden farklıdır. İdeal bir GPS anteninin faz merkezi, antene ulaşan sinyalin geliş doğrultusundan bağımsız olması gerekir. Uygulamada, uydu sinyalinin azimut ve yükseklik açısına bağlı olarak antenlerin faz merkezlerinde küçük değişimler gözlenmektedir. Bu değişimler L_1 ve L_2 sinyalleri için farklıdır.

Anten faz merkezi değişimleri anten yapısına göre birkaç milimetre ile 1-2 cm arasında değişmektedir. Önemli çalışmalarda bu değişimler dikkate alınmalıdır.

1.11.7 Seçimli Doğruluk Erişimi

Seçimli doğruluk erişimi (SA), ABD tarafından yetkisiz kullanıcılar için konulmuştur. Yani konum belirleme doğrulukları ABD tarafından kasıtlı olarak kötüleştirilmiştir. Bu durum 1 Mayıs 2000'den itibaren kaldırılmıştır.

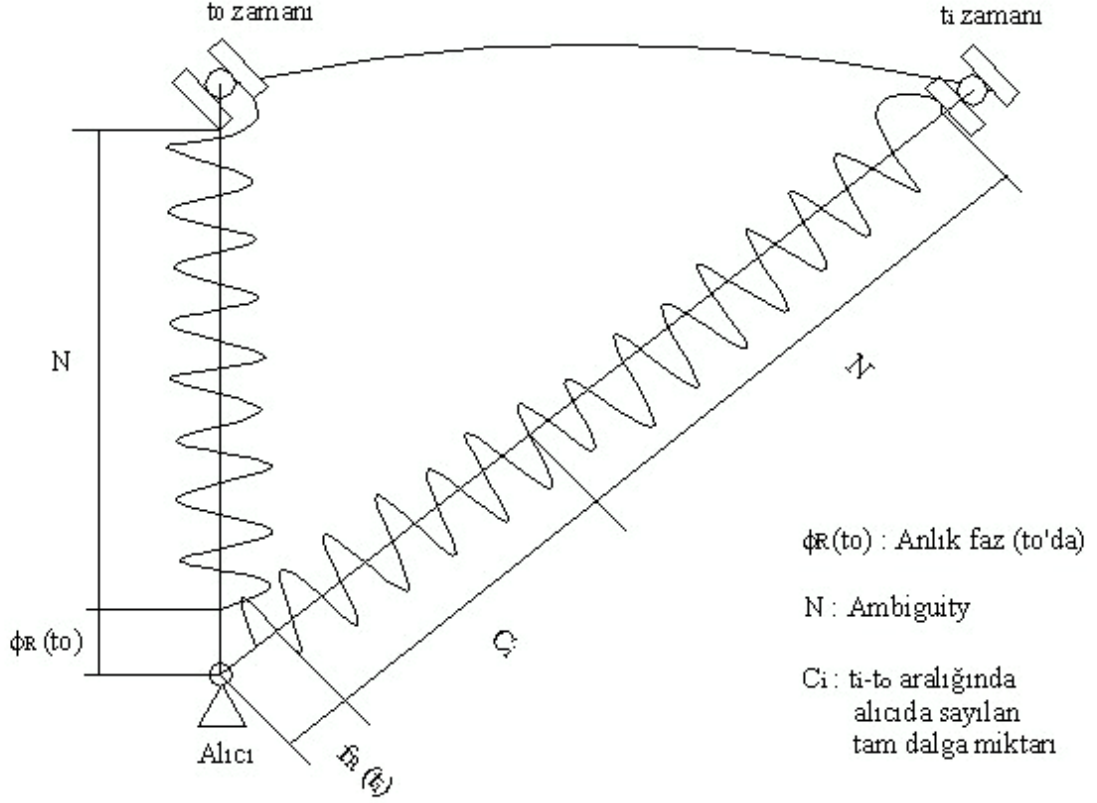
Kısa baz uzunluklarında SA etkisinden korunmak için Diferansiyel GPS (DGPS) tekniği kullanılmaktadır.

1.11.8 Taşıyıcı Dalga Faz Belirsizliği ve Faz kesiklikleri

Kod gözlemlerinde kodun “chip” uzunluğu ölçülürken faz gözlemlerinde taşıyıcı dalganın dalga boyları “cycles” sayılmaktadır. Örneğin bir uydu ile alıcı arasında yaklaşık 106 000 000 dalga boyu sayılırsa ve L_1 için dalga boyu 19 cm kabul edilirse, uydu alıcı uzaklığı yaklaşık 20140 km olarak hesaplanabilir. Ancak faz gözlemlerinde bazı önemli sorunlar vardır. GPS alıcısı ölçü anında yalnız ölçü sinyali ile alıcı sinyali arasındaki fazı ölçer. Alıcının açıldığı anda devreye giren bir sayaç, uydu alıcı fazı 0 ile 2π arasında değiştiğinde + 1 veya – 1 tamsayı artar veya azalır. Böylece ilk ölçü epogundan itibaren fazdaki tam sayı dalga boyu değişimleri belirlenmiş olur.

İlk epok (başlangıç anı) için uydu-alıcı arasındaki taşıyıcı dalga fazının kaç tane tam dalga içerdiği bilinmemektedir. Bu bilinmeyene “Taşıyıcı Dalga Faz Başlangıç Belirsizliği” veya kısaca faz belirsizliği (ambiguity) adı verilmektedir. Faz belirsizliği N

ile gösterilmektedir. GPS alıcıları gözlenen her uyduya hiçbir ölçü kesikliği olmadan gözlemlerini sürdürmelidir. Gözlemlerde sinyal kesikliği olmadığı sürece N sabit olacaktır.



Şekil 1.24 Taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliği

Öte yandan GPS gözlemi devam ederken uydu sinyalinin alınmasında meydana gelecek sinyal kesikliklerine faz kesiklikleri yada faz kayıklığı adı verilmektedir. Bu durumda sinyal kesikliğinin olduğu andan sonraki gözlemler oluşan kayma miktarı kadar düzeltilmelidir. Faz kesikliklerinin genel nedenleri şunlardır:

- Ölçü noktası çevresinde ağaç, bina, köprü vb. gibi uydu sinyallerinin alıcıya ulaşmasını engelleyen nesneler,
- Kötü iyonosferik koşullar nedeniyle sinyal-gürültü (S/N) oranının düşük olması,
- Sinyal yansıma etkisi (multipath),
- Alıcı yazılımında oluşabilecek arızalar şeklinde sıralanabilir.

Faz belirsizliği ve faz kesikliğinin çözümü ayrıntılı bilgi ve deneyim gerektirmektedir. Pratik konum belirlemede 20 km' nin altındaki bazlarda GPS yazılımlarında otomatik olarak giderilmektedir.

Faz gözlemlerinden yüksek duyarlılıklı sonuçlar elde edebilmek için faz belirsizliğinin doğru çözülmesi gerekir. Bunun için gerekli ölçü toplanmalıdır.

Faz belirsizliği bilinmeyenlerinin çözümü için;

- Klasik yöntem,
- P kod destekli yöntem,
- Anten yer deđiřtirmesi yöntemi,
- Modern (QIF), (OTF) gibi yöntemler geliştirilmiştir.

1.12 Duyarlık Ölçütleri

Pseudorange ölçülerini etkileyen hata kaynakları, uydu-alıcı saat hataları, modellendirilmemiş atmosferik etkiler (iyonosfer ve troposfer etkisi), sinyal yansıma (multipath) etkisi ve seçimli doğruluk erişimi (SA) nedeniyle uydu yörünge bilgilerindeki hatalar olarak sıralanabilir.

Tüm bu hata kaynakları sonuçta pseudorange ölçümünde sapmalara neden olmaktadır. Bu hataların tümünün oluşturduğu toplam hataya UERE denilmektedir. UERE, yukarıda verilen her bir hatanın kareleri toplamının karekökü olarak hesaplanmaktadır. Kısaca UERE uydu-alıcı arasındaki uzaklığa getirilecek hatayı göstermektedir.

GPS ile navigasyon amaçlı ölçmelerde üç boyutlu konumu etkileyen diğer bir faktör gökyüzündeki uydu geometrisidir. Uydu geometrisi konum belirlemede önemli bir hata kaynağıdır. Uyduların birbirine ve yeryüzündeki alıcıya göre olan konumlarının, alıcı anteni koordinatlarının belirlenmesindeki hatalara katkısı duyarlık kaybı (DOP) faktörleri ile ifade edilmektedir. Yüksek DOP değerı uydu geometrisinin doğru konum belirleme için uygun olmadığını (uyduların birbirine göre çok yakın olduğunu), düşük DOP değerı ise uydu dağılımının çok uygun olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak GPS' in navigasyon amaçlı kullanılması, anlık konum belirleme durumunda alıcıda hesaplanan ve ekranda okunan konum ve zaman bilgilerinin doğruluğu UERE ve DOP faktörlerinin büyüklüğüne bağlıdır.

Navigasyon amaçlı ölçmelerde doğruluk, herhangi bir zamanda bir kara, deniz veya hava aracının belirlenen veya hesaplanan konumunun o aracın aynı andaki gerçek (hatasız) konumuna olan yakınlığı olarak tanımlanır.

GPS ile navigasyon uygulamalarında Amerikan Savunma Dairesi DoD tarafından iki farklı konum belirleme hizmeti sunulmaktadır. Bunlar;

PPS	Duyarlı konum belirleme hizmeti,
SPS	Standart konum belirleme hizmetidir.

1.12.1 UERE, URE, UEE, URA Tanımları

UERE ham uydu-alıcı uzunluğundaki toplam hatadır. UERE;

- Uydu saatindeki hatalar,
- Uydu navigasyon mesajındaki hatalar,
- Uydu yörüngelerinin hesabında yapılan hatalar,
- Alıcı saatindeki hatalar,
- Gözlem anında alıcı işlemcisi tarafından iyonosferik model hesabında yapılan hataların bir fonksiyonudur.

UERE' nin uzay ve kontrol bölümlerine ilişkin kısmı URE olarak adlandırılır. UERE' nin alıcıya ilişkin kısmına UEE denir. Navigasyon mesajı içersinde yayınlanan ve uydu-alıcı uzaklığına ilişkin hata miktarını ifade eden bir katsayı URA olarak adlandırılır. PPS ve SPS kullanıcıları için pseudorange hata büyüklükleri hesaplanmış ve tablolar halinde verilmektedir (Kahveci ve Yıldız, 2001).

1.12.2 Duyarlık Kaybı (DOP) Faktörleri

DOP faktörleri, uydu geometrisinin navigasyon çözümlerinden elde edilen doğruluklar üzerindeki etkilerini ifade eden ölçütlerdir. DOP, alıcı ile uyduların birbirine göre göreceli konumlarına bağlı olarak tanımlanan ve ölçü noktasına ait konum parametrelerinin pseudorange hataları (UERE, URE) ile ilişkisini kuran doğruluk sınırlayıcı geometri faktörleridir. DOP faktörleri genel olarak dengeleme sonrası elde edilen kofaktör ve varyans-kovaryans matrisinin köşegen elemanlarının fonksiyonu olarak elde edilmektedir. Genel olarak

$$\sigma = \text{DOP} \cdot \sigma_0 \quad (1.35)$$

olup σ_0 , gözlenen pseudorange ölçüsünün standart sapmasını, σ ise koordinat bileşenlerinin standart sapmasını göstermektedir.

DOP faktörleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Bunlar:

- **GDOP** :Uydu geometrisinin hesaplanan nokta koordinatlarına ve alıcı saati bilinmeyenine toplam etkisini,
- **PDOP**: Uydu geometrisinin hesaplanan yatay ve düşey koordinatlara etkisini,
- **HDOP**: Uydu geometrisinin hesaplanan yatay koordinatlara etkisini (enlem, boylam),
- **VDOP**: Uydu geometrisinin hesaplanan nokta yüksekliğine etkisini,
- **TDOP**:Uydu geometrisinin hesaplanan zaman bilgisine etkisini ifade etmektedir.

NATO standartlarına uygun olarak DOP değerleri belirlenmiştir. Ayrıca FOM ve TFOM, alıcı ekranında okunan ve zaman bilgisine ilişkin hata miktarını belirten ifadelerdir. Bunlardan başka LEP, CEP, SEP, rms, drms doğruluk ölçütleri de kullanılmaktadır.

LEP, herhangi bir koordinat eksenindeki olası doğrusal hatadır.

$$\text{LEP}=0.6745 \cdot G \quad (1.36)$$

eşitliği ile verilmektedir.

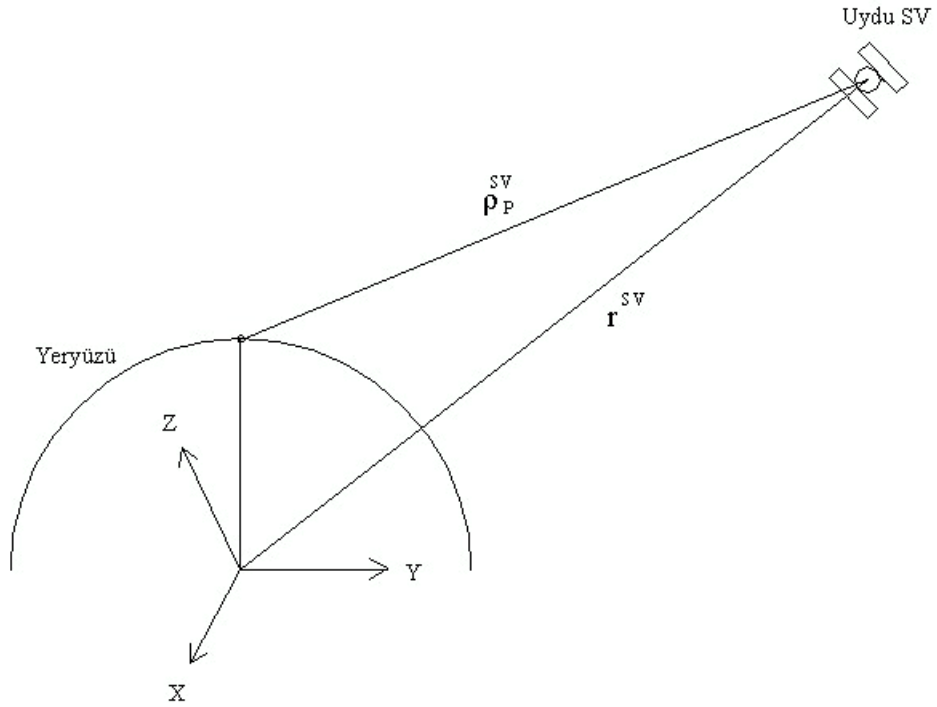
SEP, bir noktanın belirlenen doğru konumlarının %50'sini kapsayan bu kürenin yarıçapı olası küresel hata olarak adlandırılır.

CEP, SEP 'in iki boyutta karşılığı ile olası dairesel hata olarak adlandırılır.

2. JEODEZİK AMAÇLI GPS ÖLÇMELERİ

2.1 GPS ile Konum Belirlemede Temel İlkeler

GPS ile konum belirleme uydu-alıcı uzaklıklarının hesabına dayanan bir uzay geriden kestirme problemidir. Uydudan alınan sinyallerle uydu-alıcı uzunlukları ρ_P^{SV} hesaplanır. SV, uydu konum vektörü olup, uydu sinyallerinde yayınlanmaktadır (Yayın efemerisi, IGS efemerisi). r^{SV} alıcı konum vektörü olup hesaplanmaktadır.



Şekil 2.1 GPS ile konum belirlemede temel düşünce

Uydu-alıcı uzaklığı (pseudorange),

$$\rho_P^{SV} = c \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

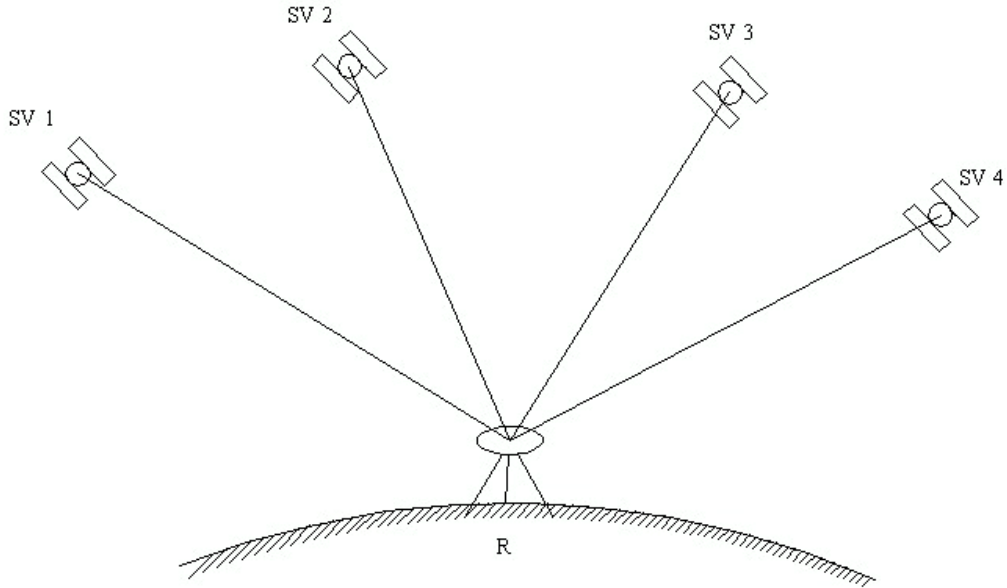
eşitliğinden hesaplanır. En az 4 uyduya yapılan eş zamanlı gözlemlerle uzunluk eşitliği kullanılarak r^{SV} konum vektörü hesaplanabilir. Böylece elde edilen verilerden yararlanarak P noktasının konumu belirlenmiş olur. Aslında 4.uydu alıcı saat hatasının giderilmesi için kullanılmaktadır.

GPS ile konum belirlemede navigasyon hizmetleri iki farklı kullanıcı seviyesinde sunulmaktadır. Birincisi standart konum belirleme hizmeti (SPS), diğeri duyarlı konum belirleme (PPS) hizmetidir. PPS yüksek doğrulukta konum, hız ve zaman belirleme hizmeti olup askeri kullanıcılara açıktır. SPS ise tüm kullanıcılara açıktır, doğruluğu daha düşüktür. GPS yöntemi ile bir noktanın konumu aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

2.2 Konum Belirleme Yöntemleri

GPS yöntemi ile bir noktanın konumu mutlak, bağıl (rölatif) ve diferansiyel olarak belirlenebilmektedir.

2.2.1 Mutlak Konum Belirleme



Şekil 2.2 Mutlak konum belirleme

Mutlak konum belirlemede tek bir alıcı ile 4 ya da daha çok uydudan kod gözlemleri yapılarak üzerine alıcı kurulan noktanın koordinatları belirlenmektedir. Uydu-alıcı uzaklıkları ve uyduların koordinatları ile uzay geriden kestirme ile noktanın koordinatları belirlenir. Alıcı koordinatları kod bilgisine (P kod ve C/A kod) ve uydu geometrisine bağlı olarak anında ve mutlak anlamda belirlenmektedir. Bu yöntem

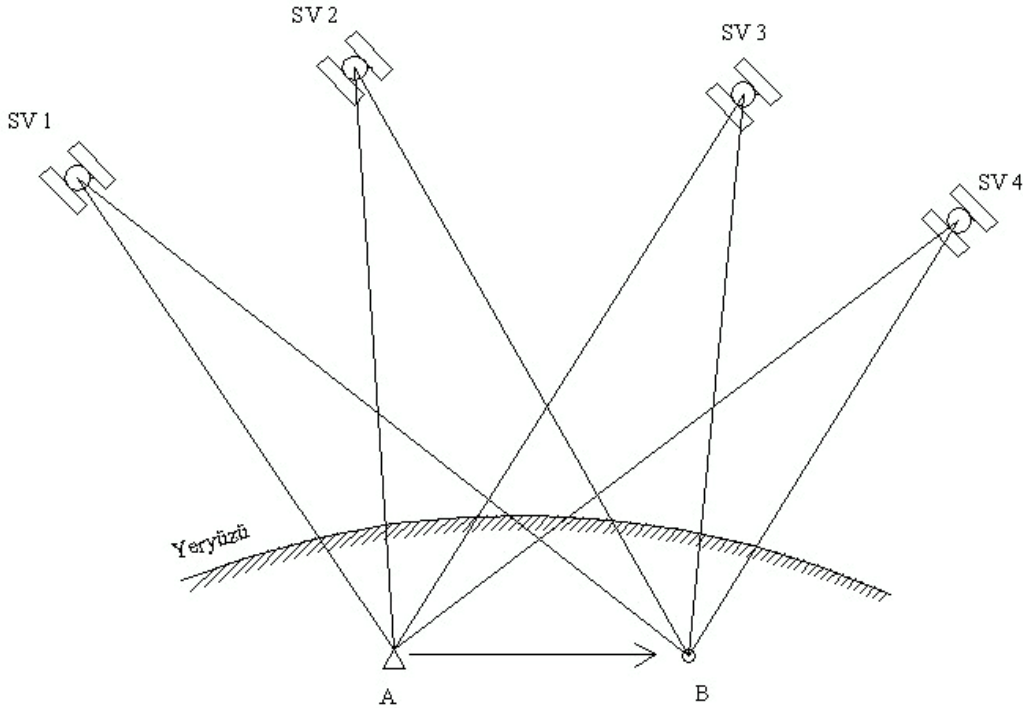
alıcının sabit olması durumunda **statik**, hareketli olması durumunda ise **kinematik** konum belirleme olarak tanımlanmaktadır. 2000 yılında A.B.D yapmış olduğu bir açıklama ile P kodunu sivil kullanıcılara açmıştır. Bu durumda günümüzde mutlak konum belirleme ile birkaç metre doğruluğunda konum bilgisi elde edilebilmektedir.

2.2.2 Bağlı (Rölatif) Konum Belirleme

Bağlı konum belirlemede koordinatları bilinen bir noktaya göre diğer nokta veya noktaların koordinatlarının belirlenmesidir. Başka bir deyişle bağlı konum belirleme ile iki nokta arasındaki baz vektörü belirlenmektedir. Şekil 2.3’de görüldüğü gibi A noktası koordinatları bilinen bir referans (sabit) noktasını, B ise koordinatı hesaplanacak olan başka bir noktayı gösterebilir. Matematiksel olarak B noktasının koordinatları,

$$\underline{X}_B = \underline{X}_A + \underline{b}_{AB} \quad (2.2)$$

ile ifade edilir.

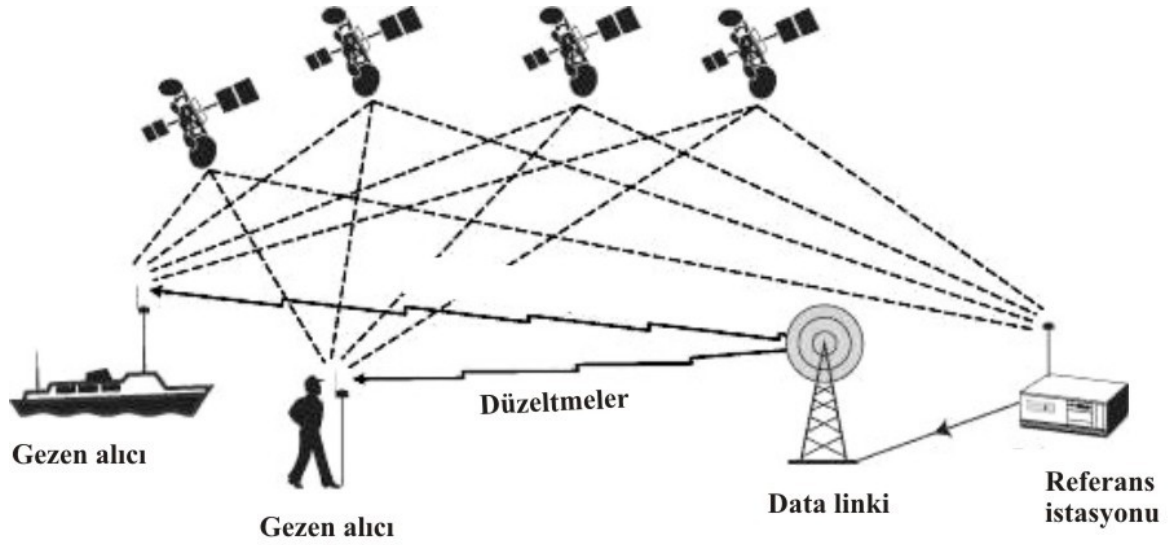


Şekil 2.3 Bağlı konum belirleme

Bağıl konum belirlemede iki ayrı noktada kurulmuş iki alıcı ile aynı uydulara eş zamanlı kod veya faz gözlemi söz konusudur. Bağıl konum belirleme ile elde edilen doğruluk mutlak konum belirlemeden çok daha iyidir. Alıcı tipi (P kodlu, P kodsuz), ölçü süresi, gözlenen uydu geometrisi, uydu sayısı ve kullanılan efemeris bilgisine (yayın veya duyarlı) bağlı olarak elde edilen doğruluk 0.001 ile 100 ppm arasında değişmektedir.

2.2.3 Diferansiyel Konum Belirleme

Navigasyon uygulamalarında (örneğin kara, deniz ve hava araçlarının navigasyonu) daha yüksek doğruluklara gereksinim duyulur. Bu durum anlık konum belirlemeden yararlanma olanaklarına sınırlama getirmektedir. DGPS tekniği ile istenilen navigasyon amaçlı doğruluğa erişilebilmektedir.



Şekil 2.4 Diferansiyel Konum Belirleme

DGPS 'te öncelikle referans noktasında bulunan alıcılardan elde edilen uzunlukların düzeltmeleri (pseudorange correction) hesaplanır. Referans noktasının ve uyduların konum koordinatları bilindiği düşünülürse, bu düzeltmeler hesaplanan uzunluğun ölçülen uzunluktan olan farklarıdır. Bu düzeltmeler ölçme anında alıcının görüş alanına giren her GPS uydusu için farklı değerlerdedir. Elde edilen bu düzeltmeler her bir referans noktasından radyo sinyalleri ile yayımlanır. DGPS alıcısı taşıyan gemiler, otomobiller, uçaklar, vb. de bu sinyalleri toplayarak referans noktasına ait

DGPS düzeltmelerini alırlar. Daha sonra taşıtlar üzerinde bulunan DGPS alıcısının görüş alanına giren uydulara olan uzunluklara bu düzeltmeler getirilerek, DGPS düzeltmesi getirilmiş uzunluklar belirlenir. Elde edilen bu uzunluklar ve uydulara ait yörünge verileri kullanılarak bu taşıtların ölçme anındaki konumu hesaplanır.

2.3 GPS ile Ölçme Yöntemleri

Mühendislik çalışmalarında daha duyarlı sonuçlara gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle faz gözlemleri kullanılmaktadır. Faz gözlemleri kullanılarak bağıl konum belirleme için beş farklı yöntem vardır.

- Statik Ölçü Yöntemi
- Hızlı Statik Ölçü Yöntemi
- Tekrarlı Ölçü Yöntemi
- Dur-Git Ölçü Yöntemi
- Kinematik Ölçü Yöntemi

2.3.1 Statik Ölçü Yöntemi

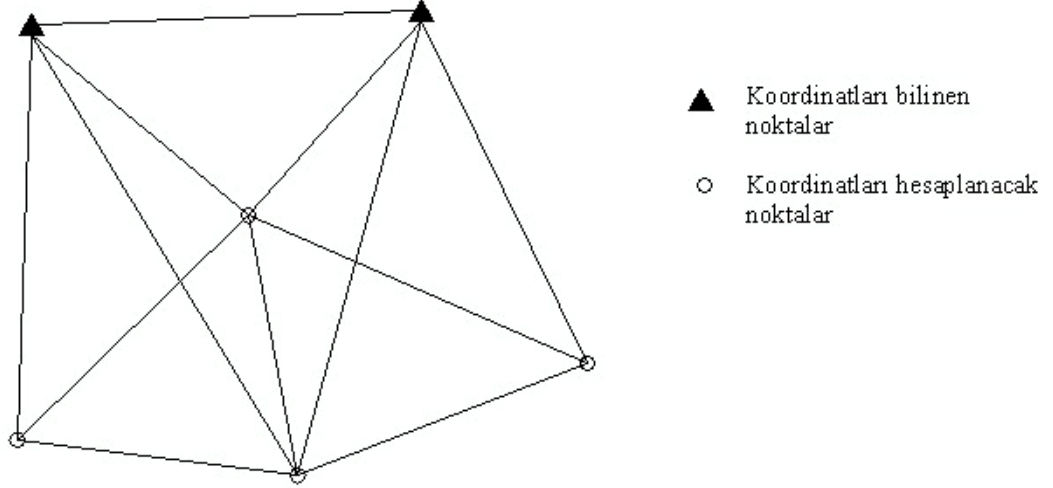
Statik ölçü yöntemi klasik bir GPS ölçü tekniği olup,

- Çok yüksek doğruluk istendiğinde,
- Uzun bazlar söz konusu olduğunda,
- Yerkaşuğu hareketlerinin araştırılmasında,
- Ülke nirengi ağlarının güncelleştirilmesinde,
- Mühendislik yapılarındaki deformasyonların belirlenmesinde,
- Mevcut uydu geometrisi başka bir ölçüm tekniğine olanak sağlamadığında,
- Düzenli etkilerin göz önüne alınması durumunda (örneğin iyonosfer ve troposfer),

en iyi yöntemdir.

Bu yöntem birden çok alıcı ile eşzamanlı olarak yapılan ve ölçü süresi noktalar arası uzaklığa bağılı olarak değişen oldukça duyarlı sonuçlar veren bir yöntemdir.

Yöntemin doğruluğu yapılan ölçmeye göre değişir. Sadece L1 taşıyıcı sinyali ile yapılan rölatif statik ölçmelerde yatayda 0.02 m düşeyde 0.03 m, L1 ve L2 sinyalleriyle yapılan rölatif statik ölçmelerde yatayda 0.005 m düşeyde 0.02 m doğruluk elde edilebilmektedir.



Şekil 2.5 Statik ölçü yöntemi

2.3.2 Hızlı Statik Yöntem

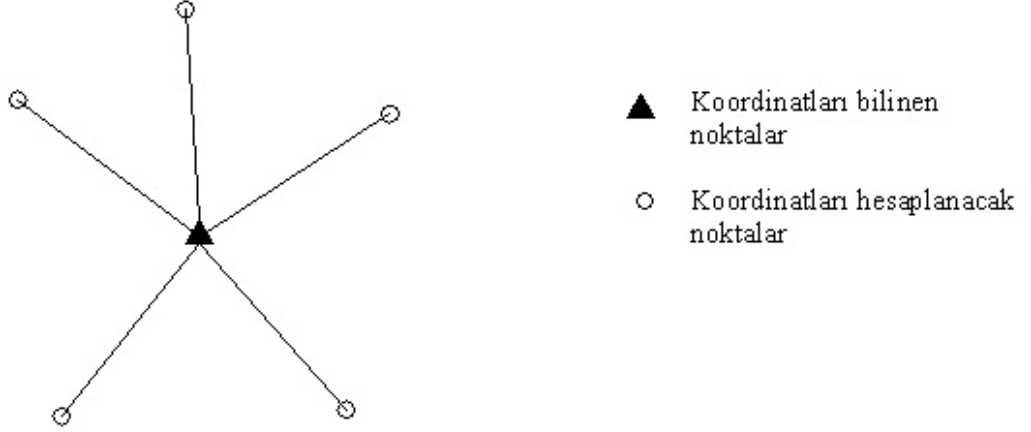
Statik bir ölçü yöntemi olup, çok daha kısa süreli ölçülerle duyarlı sonuçların alınması nedeniyle ekonomik önem taşımaktadır. Genel olarak alıcılardan birisi referans noktasında sabit bırakılarak sürekli gözlem yaparken, diğer bir alıcı öteki noktalara çok kısa süreler için kurularak eş zamanlı gözlemler yapılır. Ülke nirengi ağlarının sıklaştırılmasında ve dizi nirengi çalışmalarında yeterli doğruluğu veren bir yöntemdir.

Çizelge 2.1 Uydu sayısı ve ölçü süresi ilişkisi

Uydu Sayısı	Ölçü Süresi
4	> 20
5	10-20
6 ve daha çok	5-10

Bu yöntemde ölçü süresi noktalar arası uzaklığa ve uydu geometrisine bağlıdır. Uydu sayısı arttıkça aynı uzunluktaki bazda ölçü süresi azaltılabilir.

Bu yöntem kısa sürede çok sayıda noktanın doğru ve ekonomik olarak ölçülmesi durumlarda iyi bir yöntemdir.



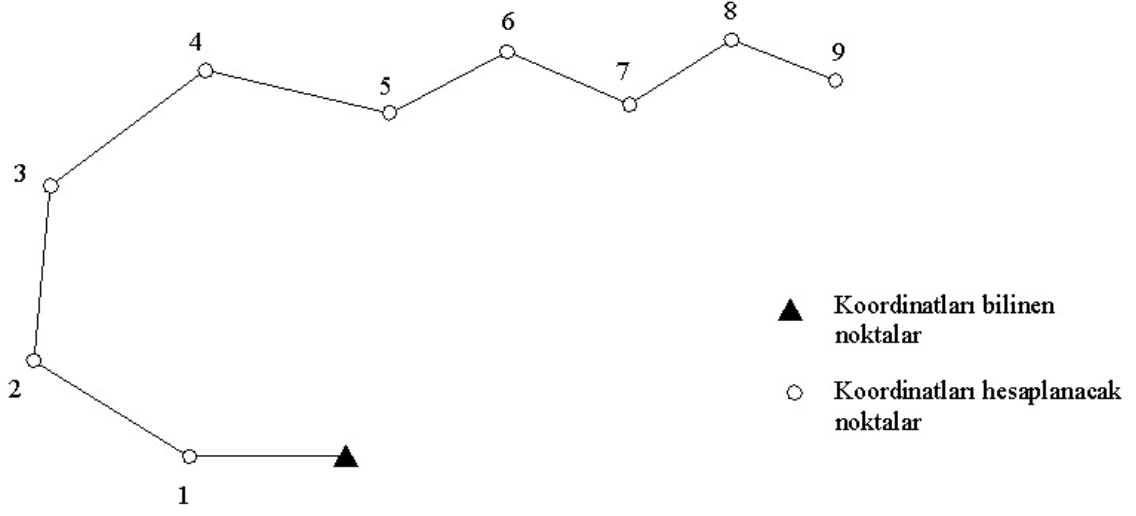
Şekil 2.6 Hızlı statik ölçü yöntemi

2.3.3 Tekrarlı Ölçü Yöntemi

Bu yöntemin birden fazla adı olup (pseudokinematik, pseudostatik, vb.), bu da statik ile kinematik arasında bir yöntem olmasından kaynaklanmaktadır. Statik yönteme göre daha çok, kinematik yönteme göre daha az nokta üretilmektedir. Bu yöntem bir yada iki saatlik ölçü süresinin başlangıç ve sonunda, değişen uydu geometrisinden yararlanmak için bir noktanın birkaç dakika süre ile iki kez ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Tekrarlı ölçü yöntemi,

- Merkezsel baz yöntemi,
- Travers yöntemi olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir.

2.2.4 Dur-Git Ölçü Yöntemi



Şekil 2.7 Dur-Git Yöntemi

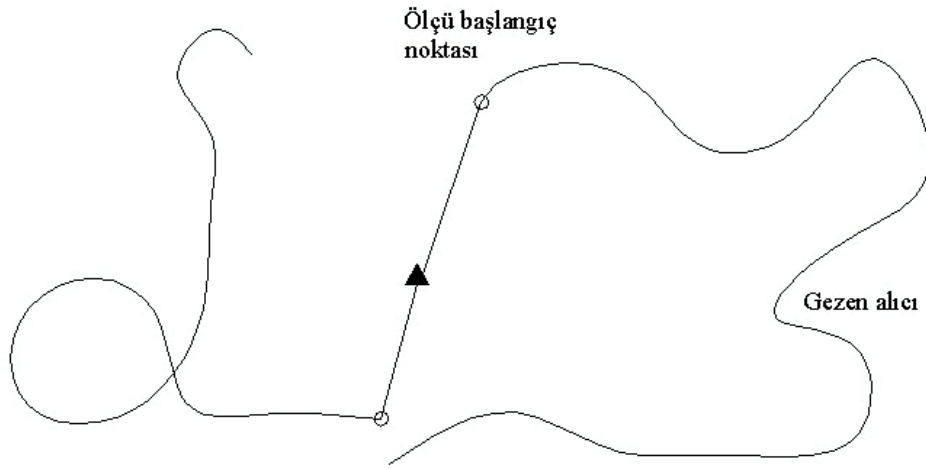
Bu yöntemde de bir alıcı sürekli olarak konumu bilinen bir noktada ölçü yapar. İkinci alıcı önce herhangi bir noktaya kurulur. Bu ilk noktada aynen hızlı statik yöntem kullanılıyormuş gibi birkaç dakika ölçü yapılır. Bunun nedeni bu noktada faz başlangıç belirsizliğini belirlemek içindir. Faz belirsizliği çözümü için yeterli veri toplandıktan sonra söz konusu ikinci alıcı uydulara olan izlemeyi devam ettirerek diğer noktalar birkaç epokluk (10-20 sn'lik) ölçülerle geçilir. Bu yöntem ölçü noktaları birbirine yakınsa iyi sonuç vermektedir.

2.3.5 Kinematik Yöntem

Kinematik rölatif konumlamada, bir referans noktasındaki alıcı sürekli sabit kalır. İkinci alıcı ise hareketlidir ve rastgele seçilmiş epoklarda konum belirlemesi yapmaktadır. Burada en önemli unsur tamsayı bilinmeyeninin belirlenmesidir. Bu bakımdan başlangıçta bir müddet statik ölçü yapılmalıdır. Hareketli alıcıda uydu sayısı 4'ün altına düştüğü takdirde tamsayı bilinmeyeni yeniden belirlenmelidir.

Bu yöntem genellikle kısa baz uzunluklarına sahip poligon kenarları ve halihazır alımındaki detay noktaların ölçümünde kullanılmakta ve özellikle gökyüzü görüşüne açık olan bölgelerde uygun sonuçlar vermektedir.

C/A koduyla yapılan tam kinematik ölçmelerde yatayda 2-5 m düşeyde 3-8 m, Sadece L1 sinyali ile tam kinematik ölçmelerde yatayda 0.03 m düşeyde 0.05 m , L1 ve L2 taşıyıcı sinyalleri ile tam kinematik ölçmelerde yatayda 0.01 m düşeyde 0.02 m, C/A kodu ile gerçek zamanlı (real-time) diferansiyel konumlamada yatayda 3-5 m düşeyde 4-8 m, C/A kodu ile gerçek zamanlı tam kinematik ölçmelerde yatayda 2-5 m düşeyde 3-8 m, Sadece L1 sinyali ile gerçek zamanlı tam kinematik ölçmelerde yatayda 0.1 m düşeyde 0.2 m, L1 ve L2 taşıyıcı sinyalleri ile gerçek zamanlı tam kinematik ölçmelerde (RTK) yatayda 0.05 m düşeyde 0.1 m doğruluk elde etmek mümkündür.



Şekil 2.8 Kinematik ölçü yöntemi

Yukarıda açıklanan ölçü yöntemlerinde elde edilen doğruluklar Çizelge 2.2'de verilmektedir.

2.3.5.1 Real-Time Kinematik GPS (RTK GPS)

RTK metodu ölçüm prensibi olarak tıpkı DGPS' e benzer. Fakat bu yöntem kod ölçüsünden farklı olarak taşıyıcı dalga faz gözlemlerini kullanır. Taşıyıcı dalga faz ölçülerinin kod ölçülerine göre daha hassas olması sebebiyle RTK yöntemi DGPS' e nazaran çok daha hassas sonuç verir. RTK ile arazinin koordinatları $\pm 2-3$ cm ile belirlemek mümkündür. Yine RTK metodu ile koordinatları ister lokal bir sistemde isterse ülke sisteminde verilmiş olsun bir noktanın araziye aplikasyonu yine $\pm 2-3$ cm' lik bir hassasiyetle yapılabilir. Bu ölçü yönteminde DGPS' te olduğu gibi, Statik ve Kinematik GPS ölçü yöntemlerinde kullanılan donanımdan farklı olarak sabit

istasyonda, hesaplanan düzeltmeleri yayımlanan bir radyo vericisi ve gezici birimde de gönderilen radyo sinyallerini alan bir radyo alıcısı kullanılır. Yine bu metotta RTK ile ilgili yazılımların koşturulduğu, sistem ayarlarının yapıldığı bir data kontrol ünitesi (el bilgisayarı) kullanılır. Arazide anlık konum bilgilerine bu data kontrol ünitesi vasıtasıyla ulaşılır.

Bu ölçü yöntemi haritacılık alanında yeni bir dönem olarak kabul edilebilir. Çünkü çok uzun zaman ve ön çalışma gerektiren aplikasyon işleri çok kısa bir sürede ve en az yersel sistemden elde edilebilecek duyarlılıkla yapılabilecektir. Sistemin tek dezavantajı, hassas sonuç alınabilmesi için en az 5 uydudan veri toplanması gerekmektedir. 4 uyduya bağlanıldığında da yöntem sonuç verir fakat bu durumda tamsayı belirsizliğinin (N) belirlenme süresi uzayacaktır. Buradan da anlaşılacağı gibi uydu sayısının artmasıyla birlikte sistemin hassasiyeti artar ve tamsayı faz belirsizliğinin belirlenme süresi kısalmır.

En az 5 uyduya bağlanma şartı ağaçlık alanlarda ve yüksek binaların bulunduğu kent merkezlerinde sağlanmayabilir. Bu durum sistemin buralarda kullanılabilme olasılığını azaltacaktır. Ancak son yıllarda üretimine başlanan Rusların GPS' e alternatif olarak uzaya yerleştirdikleri ve GLONASS adını verdikleri sisteme ait uydulardan da sinyal alabilmesi ve bu ölçüleri GPS ölçüleriyle birlikte kullanabilmesi bu problemin büyük oranda aşılmasına sebep olmuştur. Çünkü bu tip alıcılar sayesinde GPS uydularının yetmediği çoğu kapalı alanlarda bile GLONASS uydularıyla birlikte minimum 5 uydu şartının çok üzerinde uydudan sinyal alınabilmektedir.

RTK GPS tekniği ile cm mertebesinde elde edilen doğruluk, pek çok haritacılık uygulamaları için yeterli olmaktadır.

2.3.5.2 Post Processing Kinematik

Kinematik yöntemde bir güzergah tespit edilmekte ve bu güzergah üzerinde belirli zaman aralıkları ile nokta konumları belirlenmektedir. Burada faz belirsizliği bilinmeyenlerinin çözülmesi esastır. Dolayısıyla ikinci alıcı gezdirilmeye başlanmadan önce faz belirsizliği bilinmeyenlerinin çözümü için yine alıcılardan biri konumu bilinen

bir noktaya, ikinci alıcı ise herhangi bir noktaya kurulur ve başarılı bir faz belirsizliği çözümü için gerekli veri toplanana kadar ölçüye statik durumda devam edilir.

Gezici alıcıdaki veriler anlık olarak değerlendirildiğinde ortaya çıkan durum RTK GPS, verilerin daha sonra GPS yazılımları ile kinematik durumda değerlendirilmesi ise post processing Kinematik olarak adlandırılır.

Çizelge 2.2 Ölçü yöntemlerinde elde edilebilecek doğruluklar

Ölçü Yöntemi	Baz Ölçüm Doğruluğu	Oransal doğruluk sınırları
Statik	5 mm + 1 ppm	1/100000 – 1/5000000
Hızlı-Statik	5-10 mm + 1 ppm	1/100000 – 1/1000000
Dur-Git	1-2 cm + 1 ppm	1/100000 – 1/1000000
Tekrarlı Ölçü	5-10 mm + 1 ppm	1/ 50000 – 1/ 500000
Kinematik	1-2 cm + 1 ppm	1/100000 – 1/1000000

Bazen yukarıdaki yöntemlerin amaca uygun olarak ekonomik nedenlerden dolayı topluca kombinasyonları da kullanılabilir. Örneğin statik yöntemle belirlenen nirengilerin arası aşama aşama hızlı statik ve kinematik uygulamalarla sıklaştırılabilir.

2.4 GPS Ölçülerinin Yapılması

GPS ölçüleri yapılmadan önce büroda ölçü planlaması yapılır, GPS ölçü ağı oluşturulur ve oluşturulan bu ağa göre arazide GPS ölçüleri tamamlanır.

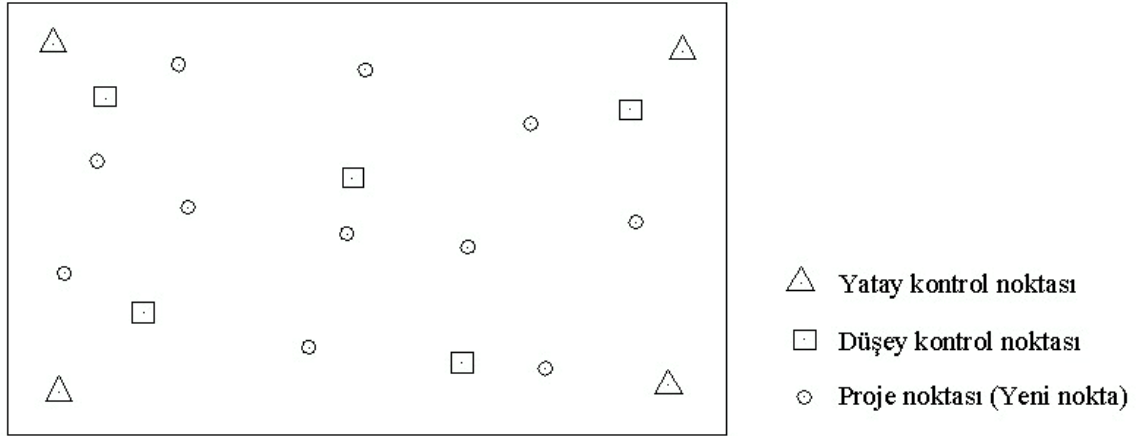
ABD FGCC tarafından bilimsel ve mühendislik amaçlı göreceli GPS konum belirleme tekniklerine yönelik doğruluk standartlarını içeren yönetmelik hazırlanmış olup bu yönetmelik 1989 yılından bu yana ABD’de kullanılmaktadır.

2.4.1 Arazi Öncesi Planlama

Ağ tasarımı göz önünde tutulması gereken konular şunlardır:

- Ağ kapalı poligon veya herhangi bir şekil oluşturmalıdır.
- Proje alanının büyüklüğüne bağlı olarak en az üç yatay kontrol ağ noktalarına bağlantı yapılmalı ve bu noktalarda eş zamanlı GPS gözlemleri yapılmalıdır.
- Proje alanında en az dört düşey kontrol ağ noktasına bağlantı yapılmalıdır.

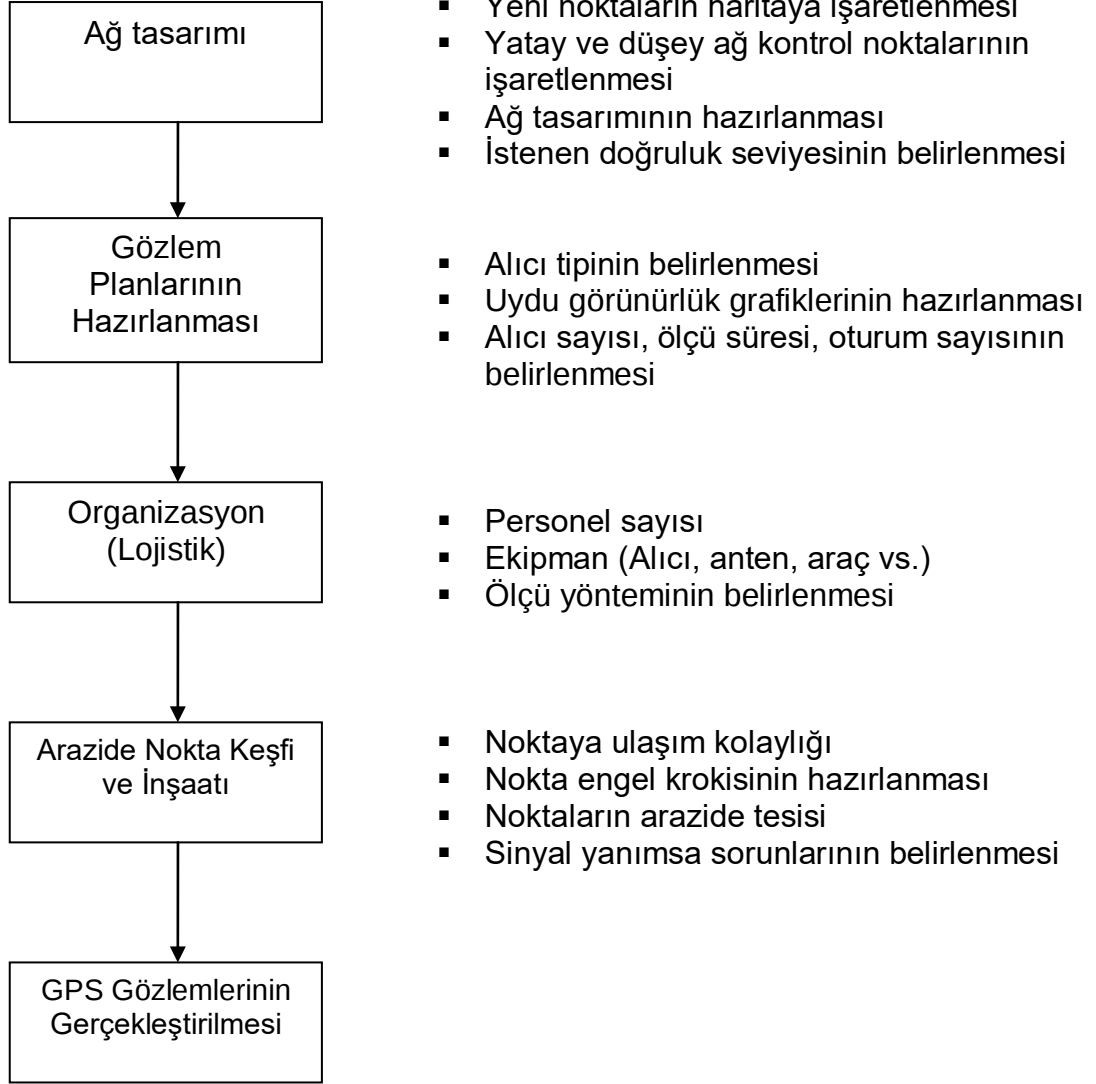
Yatay kontrol ağ noktaları proje alanının köşelerinde ve alanı kapsayacak şekilde seçilmelidir. Bu noktalar ne kadar fazla olursa ağın kontrol edilebilirliği o kadar iyi olmaktadır. Güzergah ölçmelerinde en az üç yatay ağ noktası güzergahın başında, ortalarında ve sonunda olacak şekilde seçilmelidir. Aynı projede en az dört, mümkünse daha çok sayıda nivelman noktası kullanılmalıdır. Söz konusu dört nokta proje alanının dört köşesinde seçilmelidir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 Proje alanında yatay, düşey ve proje noktası

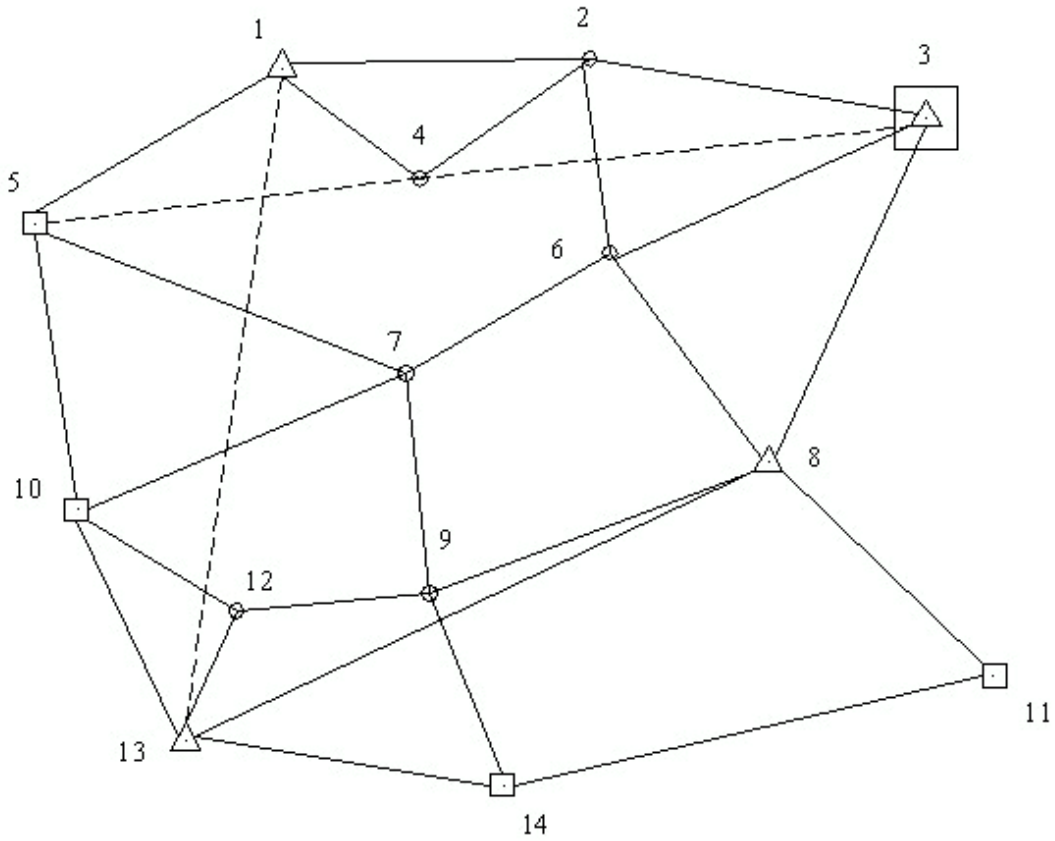
GPS ağlarında ölçü planları yapılırken ya merkezsiz (radial) baz yöntemi ya da kapalı poligon şekli kullanılmaktadır. Merkezsel baz yönteminde alıcılardan biri proje alanının ortasında bir yere kurularak (sabit alıcı) sürekli gözlem yapılır. Sabit noktaya yakın olan noktaların bağlantısı eş zamanlı gözlemlerle doğrudan yapılır. Bu yöntem kinematik ölçülerde kullanılmaktadır. Yöntemin en sakıncalı yönü noktalar yalnız bir

doğrultudan belirlendiği için geometrik kontrol olanaklı değildir. GPS ile arazi öncesi planlamaya ilişkin planlama evreleri Şekil 2.10' da gösterilmektedir.



Şekil 2.10 GPS Arazi öncesi planlamaya ilişkin iş akışı

İkinci yöntem olan poligon yöntemi daha çok statik ve hızlı statik tekniklerde uygulanmaktadır. Bu yöntemde üzerinde gözlem yapılacak her nokta ağdaki en az iki noktaya bağlanmaktadır. Kontrol noktaları arasında eş zamanlı ölçüler yapılmalıdır. Böylece ağdaki kontrol noktasının az sayıda olmasının getireceği sorunlar azaltılmış olacak ve ağın güvenilirliği bu fazla ölçülerle artırılmış olacaktır.



Şekil 2.11 Statik ölçü ağı dizaynı (kapalı poligon, lup)

GPS ölçmelerinde uygulanacak olan ölçü grubu (oturum, session) sayısı FGCC standartlarında aşağıdaki eşitlikler verilmektedir.

$$S = \frac{m \cdot n}{r} + \frac{m \cdot n(p-1)}{r} + k \cdot m \quad (2.3)$$

S : Projedeki gözlem oturum sayısını,
R : Alıcı sayısını,
m : Ölçü yapılacak toplam nokta sayısını (eski ve yeni noktalar),
n : Her bir ölçü noktasındaki en az sayıda bağımsız alet kurma sayısını,
p : Üretim faktörünü,
k : Güvenlik faktörünü ifade etmektedir.

GPS proje planlamasında yeni nokta yeri seçiminde göz önünde tutulacak esaslar şunlardır:

- Ölçü noktaları çevresinde uydu sinyallerinin alıcı antenine ulaşmasını engelleyen hiçbir doğal veya yapay nesne olmamalıdır.
- Ölçü noktası çevresinde yansıtıcı yüzeyler (metal, tel, çit, su yüzeyleri vb) olmamalıdır. Bu gibi yüzeyler sinyal yansıma etkilerine neden olmaktadır.
- Ölçü noktası çevresinde yüksek gerilim hattı olmamalıdır. Bunla sinyal bozukluğu oluşturur.
- Ölçü noktasına ulaşım kolay olmalıdır.

2.4.2 GPS Ölçülerinin Yapılması

GPS projesinin başarısı projede görev yapan personelin eğitim ve bilgi seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. Ölçü noktasının yerinin seçimi, alıcı ve antenin kurulması ve ölçüye hazır duruma getirilmesi, gözlem karnelerinin doldurulması ve problem anında ani müdahaleler eğitimin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

GPS gözlerinde antenin nokta üzerine doğru kurulması gerekmektedir. Anten ölçü noktası üzerine milimetre doğrulukla merkezleştirilmelidir. Küresel düzeç ve optik çekül ölçüye başlamadan kontrol edilmelidir. Ölçü sonunda da aynı kontroller yapılmalıdır. Anten merkezleştirildikten sonra, doğrultuya bağlı anten faz merkezi hatasının giderilmesi için tüm antenler tek bir doğrultuya yönlendirilmelidir. Uygulamada pusula kullanılarak antenler manyetik kuzeye yönlendirilir. Anten yükseklikleri milimetre doğrulukta ölçülmelidir. Anten yüksekliği ölçümü antenin en az üç farklı tarafından yapılmalı ve bu okumalar arasındaki fark 2 mm'yi geçmiyorsa ortalaması alınmalıdır.

Gözlemler için ölçü karnesi kullanılır ve bu karneye ölçü ile ilgili bilgiler kaydedilir. Gözlem karnesindeki nokta koordinatları yaklaşık değerler olup, bunlar ölçüye başladıktan sonra ekranda anlık olarak okunan değerlerdir. Örnek GPS karnesi Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

Projenin amacına göre gerekirse meteorolojik parametreler ölçülmektedir. Pratik mühendislik uygulamalarında meteorolojik parametreler ölçülmez. Meteorolojik aletler; termometre, barometre ve psikrometrelerdir.

Alıcı, anten ve batarya arasındaki bağlantı sağlandıktan sonra alıcı çalıştırılır. Ölçme konfigürasyonu parametreleri olan ölçme modu (statik-kinematik vb), kayıt aralığı (epok), minimum uydu yüksekliği girilerek navigasyon çözümünün yapılıp yapılmadığı kontrol edilir. Alıcının vermiş olduğu PDOP, görülen uydu sayısı ve noktanın yaklaşık koordinatları izlenerek gerekli ölçü süresinin dolması beklenir. Ölçü süresi dolduktan sonra alıcının hafızası kontrol edilmek suretiyle yapılan ölçmelerin kayıt edilip edilmediği saptanır. Ölçü sonunda alıcı kapatılarak anten sökülür. Alıcı çalışırken anten sökülmesi son kaydedilen verilerin bozuk olmasına yol açacağından sakıncalıdır. Sonra ölçü yapılacak noktalarda da benzer işlemler tekrarlanır.