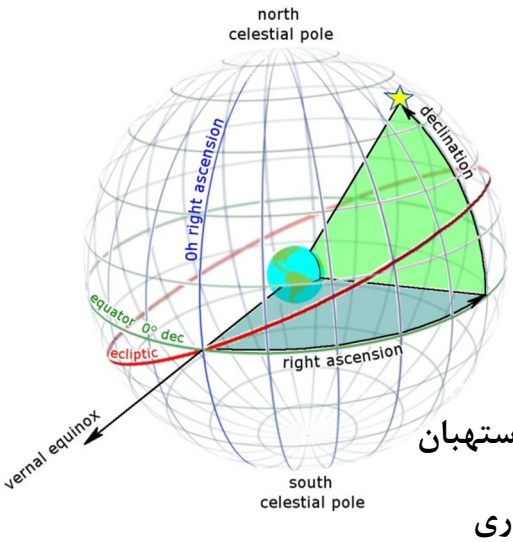
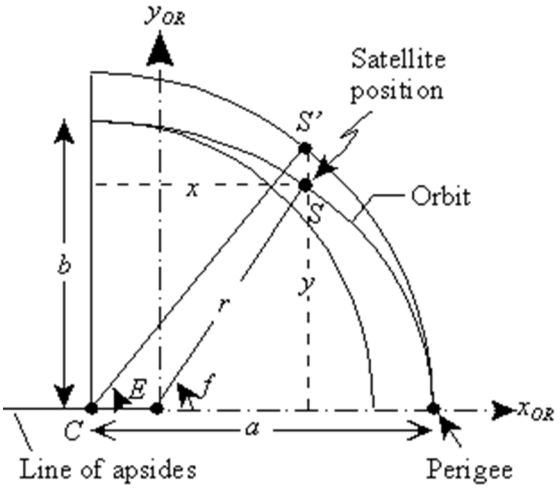




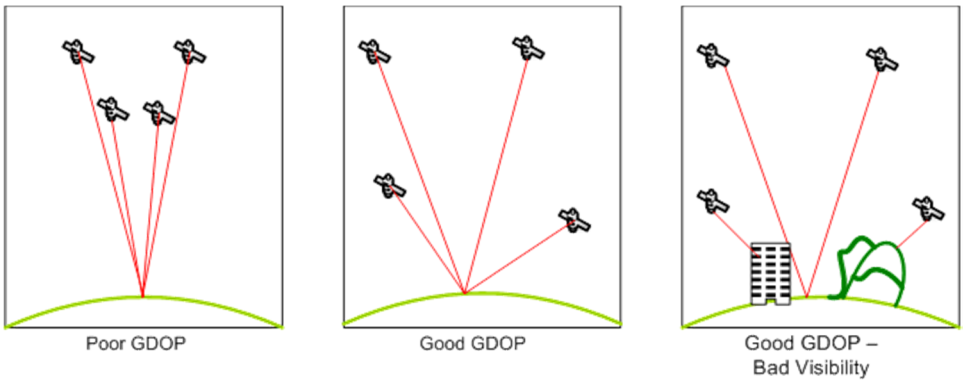
دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

گروه مهندسی نقشه برداری

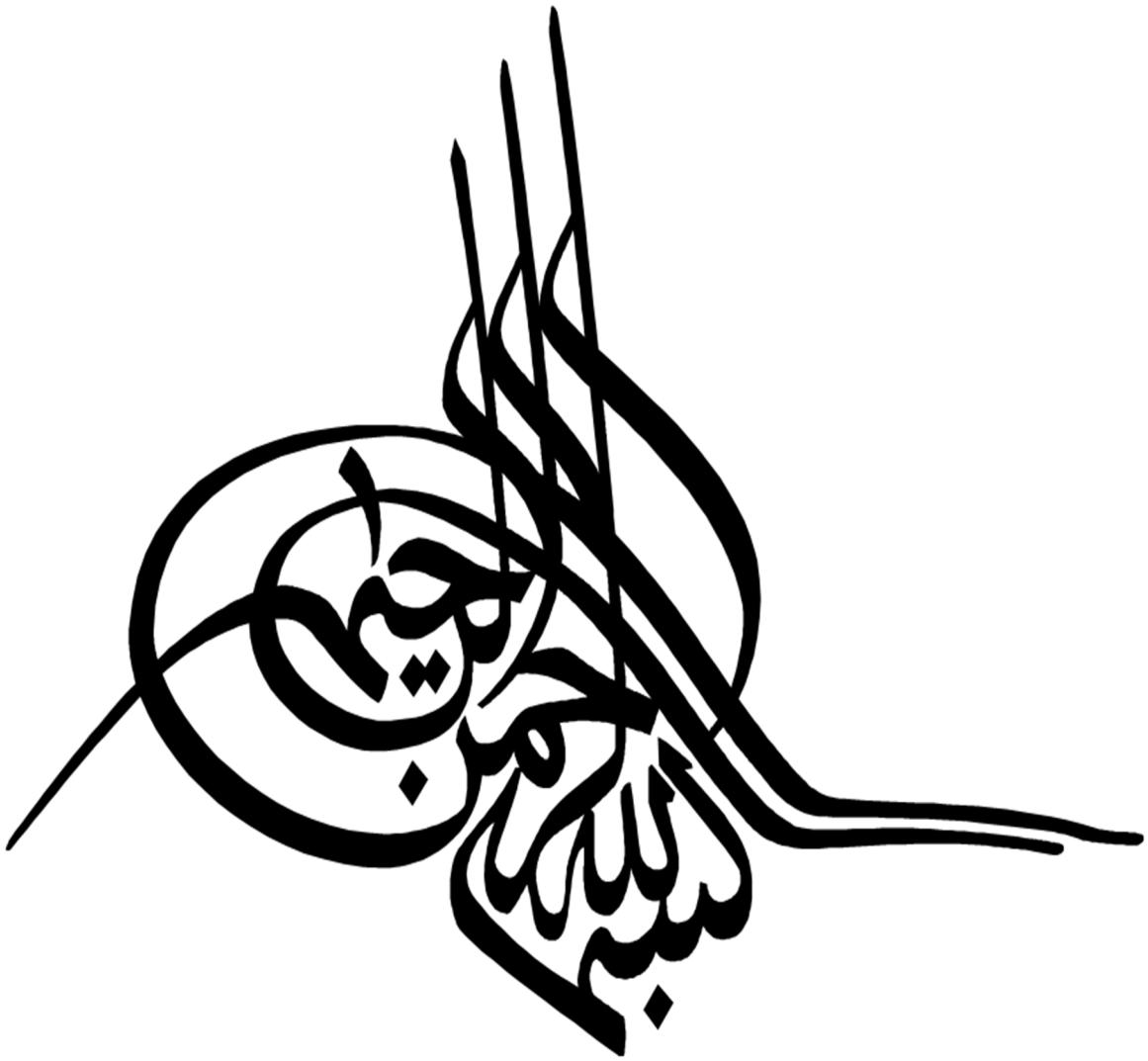
جزوه درسی ژئودزی ماهواره ای

گردآورنده: علی قربانعلی

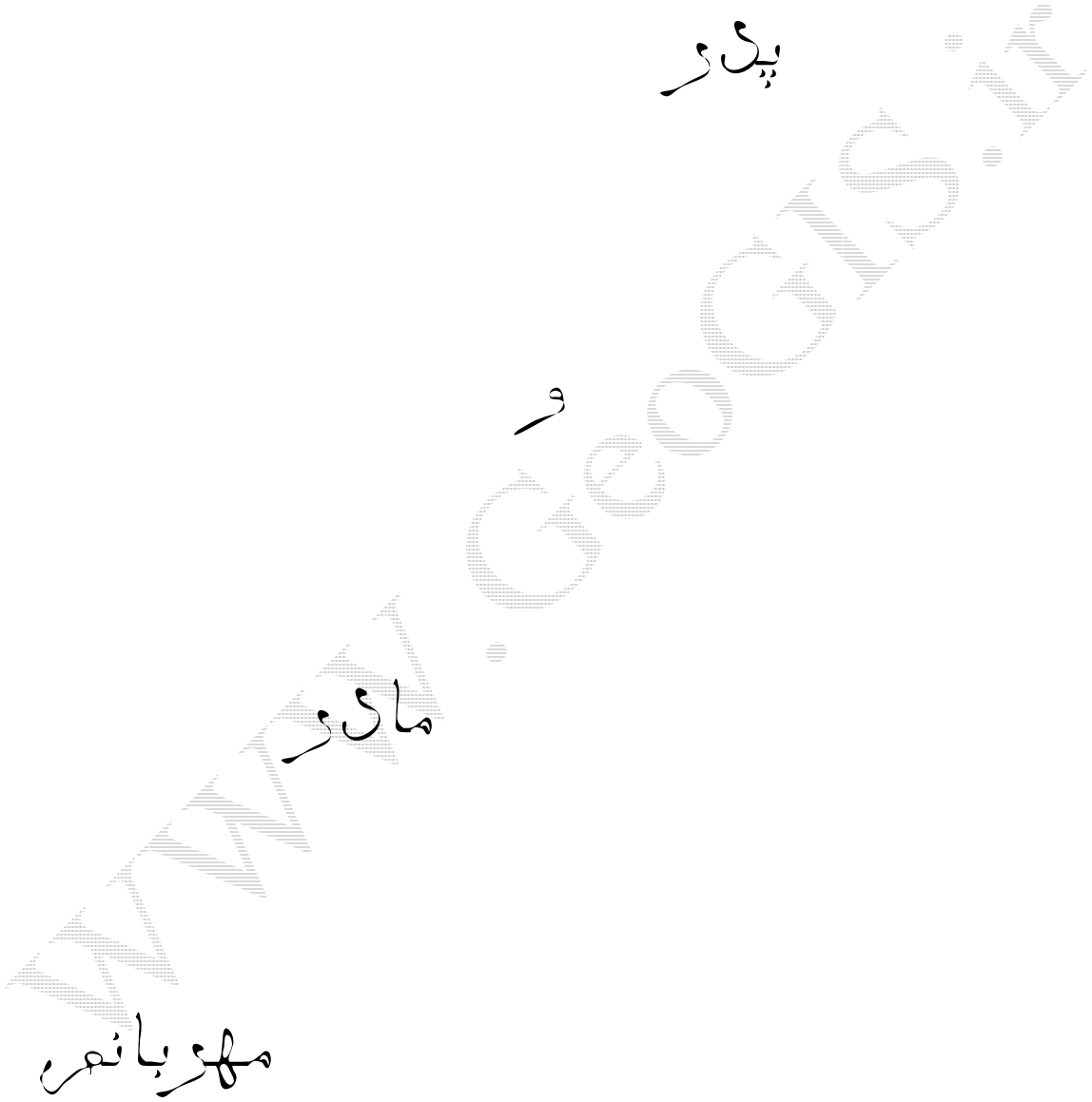
(عضو هیات علمی گروه مهندسی نقشه برداری)



بهار ۱۳۹۳



تقدیم به بهترین‌های زندگانی‌ام



فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول ۵
مقدمه ۵
سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره ای از گذشته تا کنون: ۱۰
سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای داپلر (ترانزیت) ۱۰
پدیده فیزیکی داپلر ۱۱
مزایای سیستم تعیین موقعیت GPS نسبت به داپلر (ترانزیت) : ۱۲
کاربردهای امروزی ژئودزی ماهواره ای ۱۳
تعیین موقعیت نسبی در مقابل تعیین موقعیت مطلق ۱۵
تعیین موقعیت کینماتیک در مقابل تعیین موقعیت استاتیک ۱۶
تعیین موقعیت پس پردازشی در مقابل تعیین موقعیت آنی ۱۶
فصل دوم ۱۸
اجزاء تشکیل دهنده سیستم GPS ۱۸
قسمت فضایی (Space Segment): ۱۸
قسمت کنترل (Control Segment): ۲۱
ایستگاه وندنبرگ (به عنوان یدک ایستگاه Master): ۲۲
بخش کاربر (User Segment) ۲۲
بیضوی مورد استفاده در GLONASS: ۲۵
فصل سوم ۲۶
قوانین کپلر ۲۶
فصل چهارم ۳۱
سیستم مختصات مداری Orbital Coordinate System ۳۱
آنومالی ۳۱
فصل پنجم ۳۵
سیستم مختصات بعدی (R.A) و المان‌های کپلری ۳۵
ویژگی‌های سیستم مختصات R.A (سیستم مختصات بعدی) : ۳۵
المان‌های کپلری (Keplerian Elements): ۳۵
فصل ششم ۳۸
اغتشاش در مدار ماهواره ۳۸
۱) نیروهای جاذبی ۳۹
الف ـ نیروی ناشی از غیر مرکزی بودن میدان جاذبه زمین ۳۹
ب ـ اثر جسم سوم ۳۹
۲) نیروهای غیرجاذبی ۴۰
اثرات نیروهای اغتشاشی بر روی مدارات ماهواره‌ها ۴۱
فصل هفتم ۴۳
امواج ماهواره‌های GPS ۴۳
تقسیم بندی گیرنده های موجود: ۴۶

ساختار سیگنال‌های GPS ۴۸
فصل هشتم ۵۰
انواع خطاهای مهم موجود در عملیات با استفاده از گیرنده GPS ۵۰
خطاهای ناشی از اتمسفر ۵۰
ویژگی‌های خطای یونسفر: ۵۰
روش‌های گوناگون برخورد با خطای یونسفر: ۵۲
خطای تروپوسفری: ۵۲
راه‌های مقابله با خطای تروپوسفری: ۵۲
خطای SA (در گذشته وجود داشت) : ۵۲
خطای چند مسیری ۵۳
چند روش رایج برای مقابله با خطای چند مسیری ۵۴
خطای جهش فاز ۵۵
فصل نهم ۵۷
DOP ۵۷
فصل دهم ۵۹
انواع اندازه‌گیری‌های تفاضلی (دیفرانسیلی) ۵۹
۱- تفاضلی یگانه بین اپکها (بین دو لحظه) صرفاً با یک گیرنده GPS ۵۹
۲- تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها: ۵۹
۳- تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها (یک گیرنده و دو ماهواره در یک لحظه) ۵۹
۴- تفاضلی دوگانه گیرنده ـ زمان ۶۰
۵- تفاضلی دوگانه ماهواره ـ زمان ۶۱
۶ – تفاضلی دوگانه ماهواره و گیرنده ۶۲
۷ – تفاضلی سه‌گانه (گیرنده – ماهواره – زمان) ۶۳
فصل یازدهم ۶۴
مقایسه بین GPS (آمریکا) و GLONASS (روسیه) ۶۴
منابع و مآخذ ۶۵

فصل اول

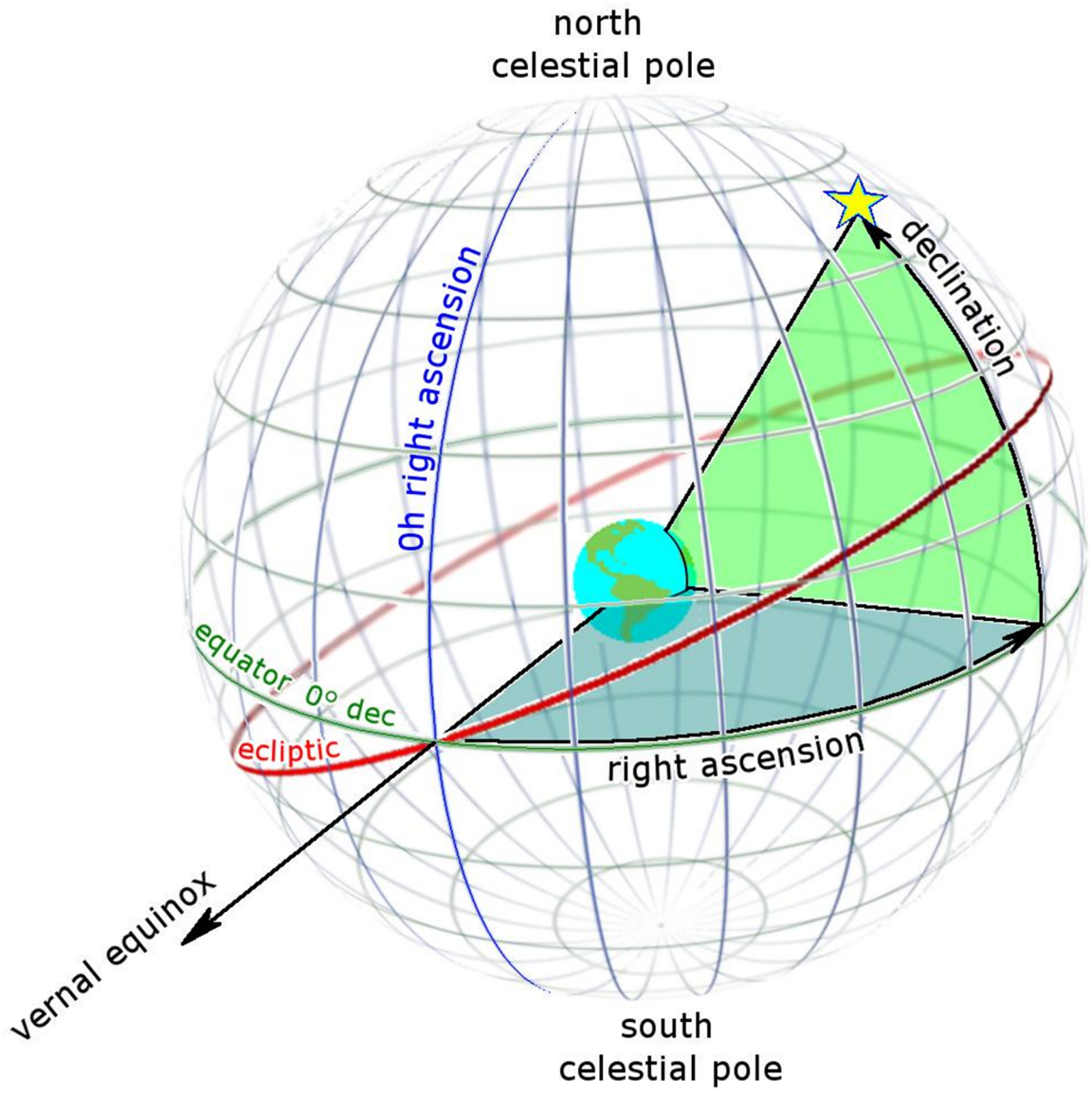
مقدمه

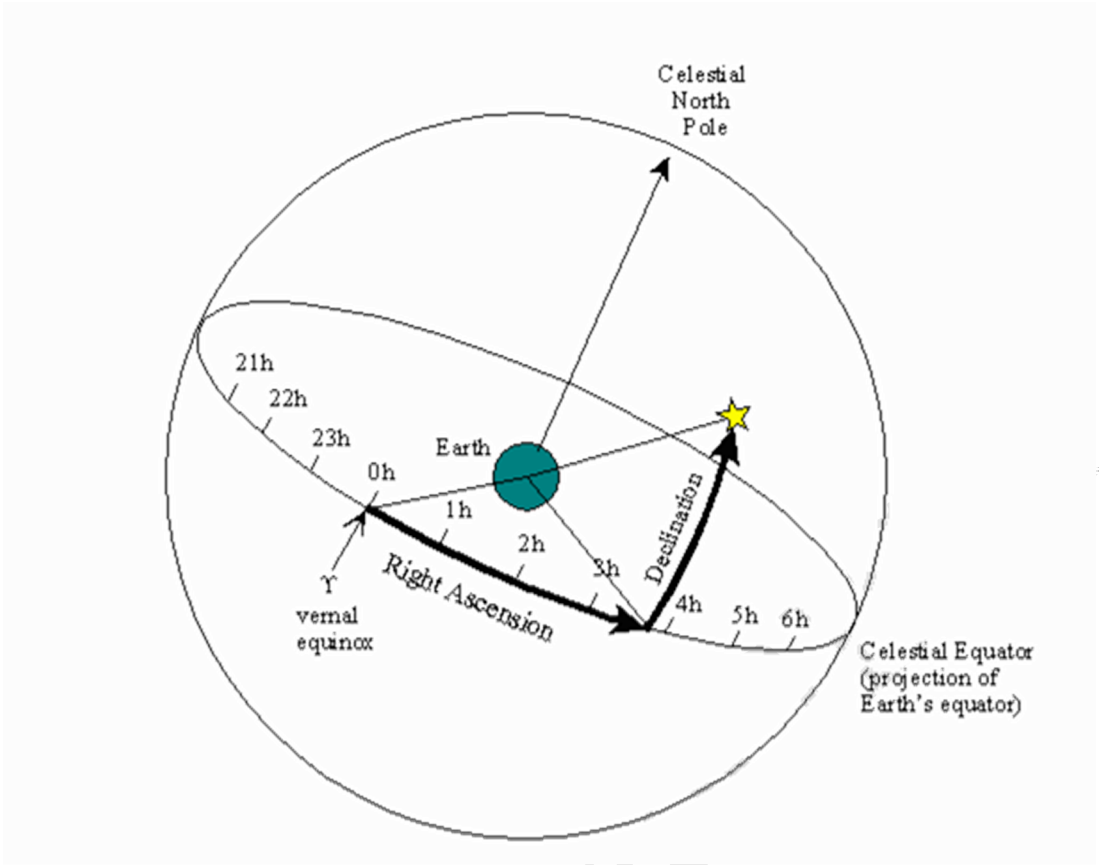
نجوم ژئودزی روشی بود برای **تعیین موقعیت مطلق** نقاط.

در حالی که ژئودزی کلاسیک روشی بود برای **تعیین موقعیت نسبی** نقاط.

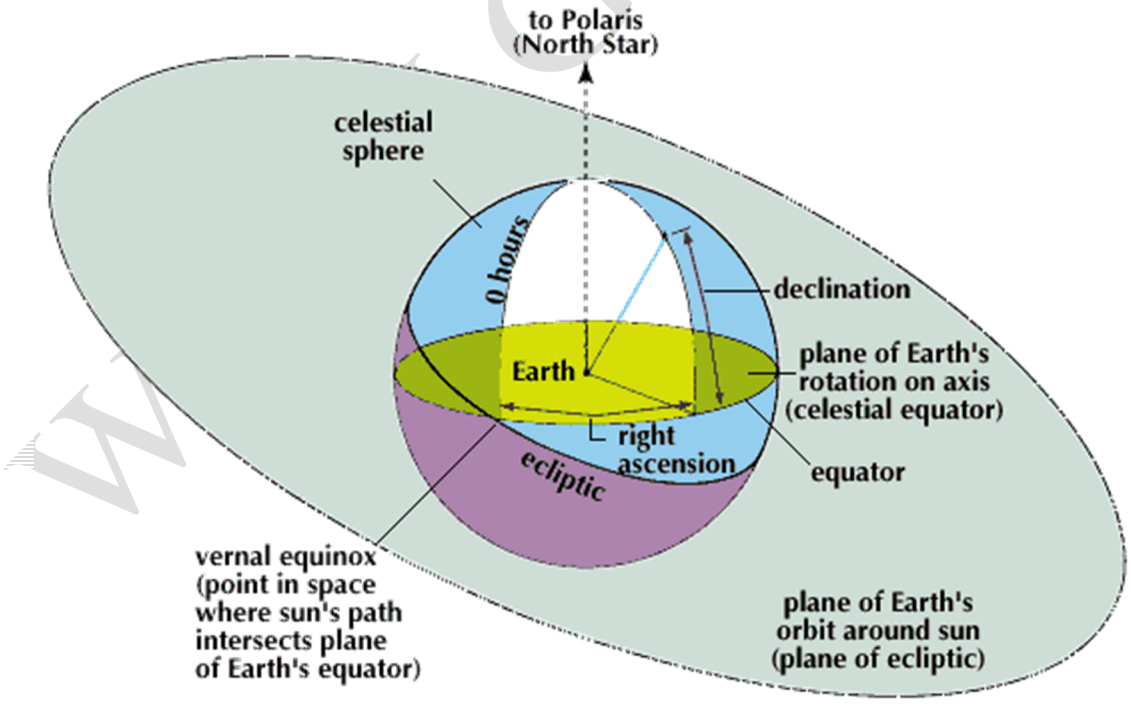
این دو روش مکمل هم بودند و در کنار هم قادر بودند تا با ایجاد شبکه نقاط کنترل زمینی به بخشی از نیازهای ژئوماتیک و ژئودزی پاسخ دهند.

امروزه می‌توان گفت: ژئودزی ماهواره ای جایگزین نجوم ژئودزی و ژئودزی کلاسیک شده است.



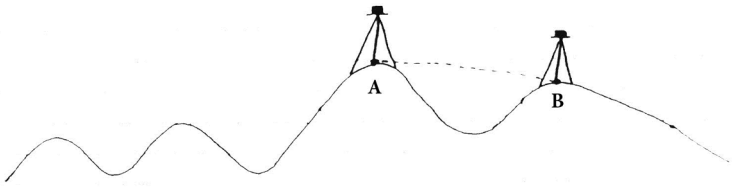


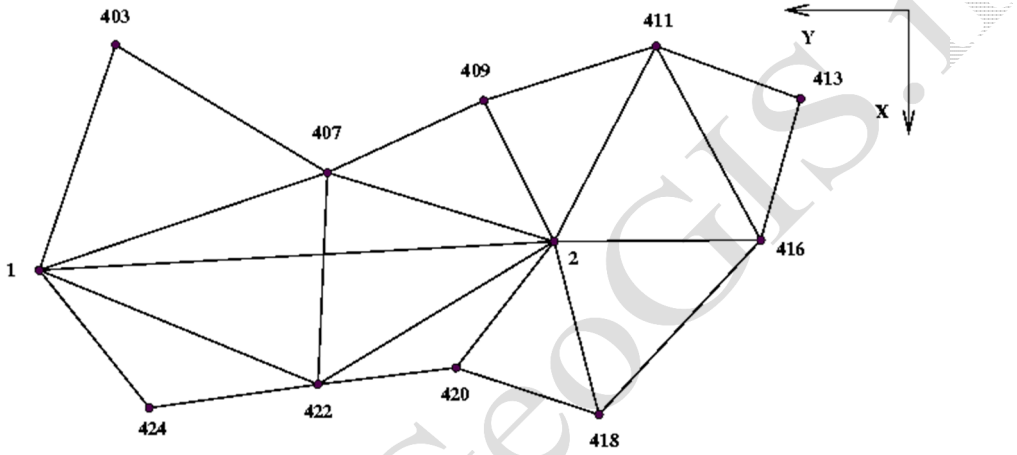
در نجوم ژئودزی، مشاهدات ما عبارت بودند از : زاویه (افقی و عمودی) و زمان



ولی در ژئودزی کلاسیک، مشاهدات ما عبارت انداز: زاویه و طول

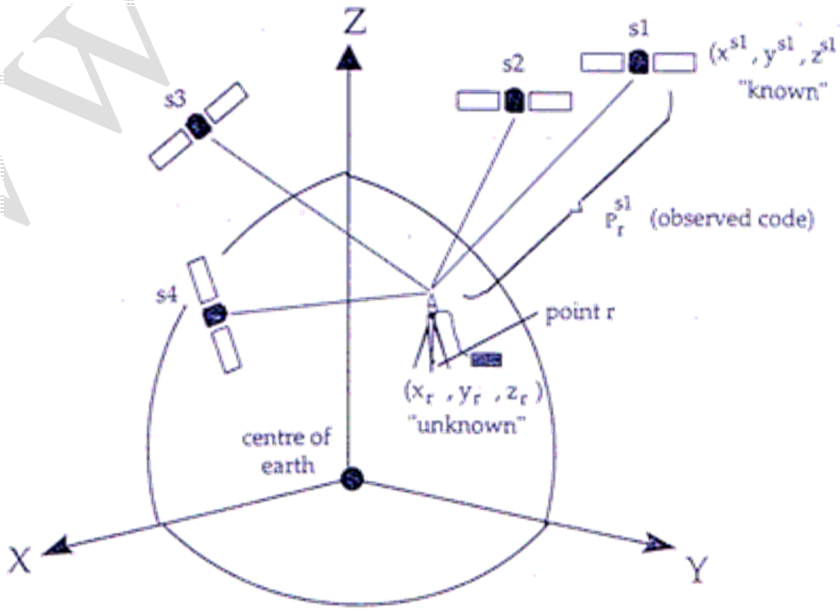
در ژئودزی کلاسیک از طریق اندازه گیری طول‌ها و زوایا شبکه نقاط کنترل مسطحاتی (درجه I، درجه II و...) ایجاد می‌گردد. ژئودزی کلاسیک روشی است برای **تعیین موقعیت نسبی** نقاط.

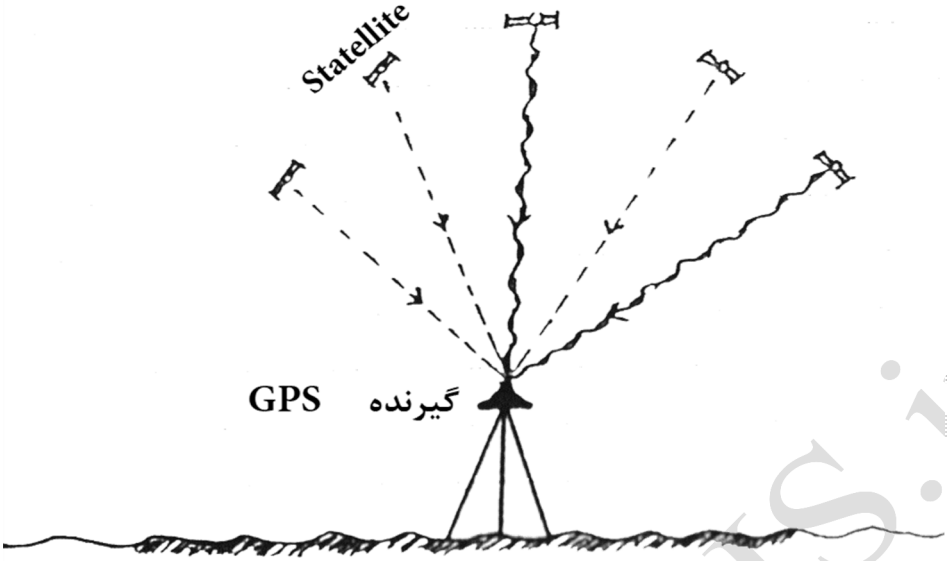




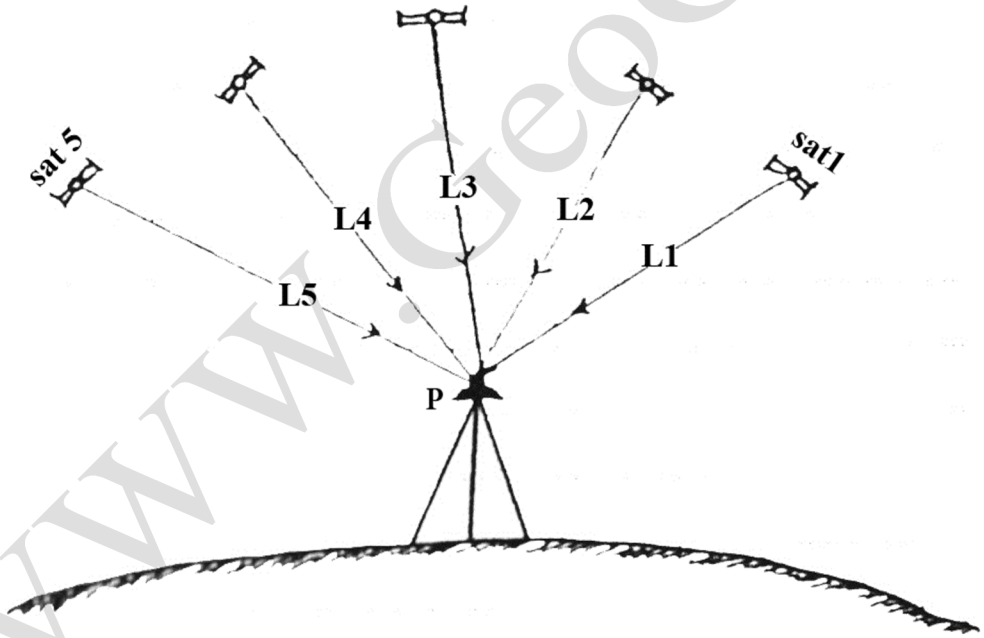
اگر امکان این فراهم بود که با استفاده از نجوم ژئودزی به سادگی موقعیت مطلق نقاط را به دقت تعیین کرد. هرگز سراغ ژئودزی کلاسیک نمی‌رفتند.

به تدریج این ایده به ذهن دانشمندان و متخصصین خطور کرد که از **ماهواره‌ها** به عنوان جایگزین **ستاره‌ها** استفاده کنند. (ژئودزی ماهواره ای جایگزین نجوم ژئودزی و ژئودزی کلاسیک شده است)





اساس کار در ژئودزی ماهواره‌ای مبتنی بر اندازه‌گیری طول است، نه اندازه گیری زاویه.



مجهول: مختصات نقطه‌ای است که روی آن گیرنده را مستقر نموده‌ایم.

معلوم: مختصات ماهواره است در فضا.

در حقیقت «عملیات ترفیع» صورت می‌گیرد یعنی نشانه روی از روی نقطه مجهول به چندین نقطه با مختصات معلوم.

مزایای ژئودزی ماهواره‌ای به عنوان جایگزینی مناسب برای نجوم ژئودزی و ژئودزی کلاسیک

۱. نیای به رؤیت ستاره‌ها در شب نیست.
۲. نیازی به صاف بودن آسمان شب نیست.
۳. نیازی به ایستگاه‌گذاری در جاهای محدود (مثلاً نوک تپه‌ها) نیست.
۴. نیازی به ایستگاه‌گذاری طولانی مدت در یک نقطه نیست.
۵. احتیاج به نیروی انسانی متخصص و اپراتور متخصص کاهش یافته است.
۶. در نجوم ژئودزی، یک اپراتور در یک لحظه فرضاً به یک ستاره می‌توانست نشانه‌روی کند. در حالی که یک گیرنده GPS در یک لحظه می‌تواند با چندین Satellite ارتباط برقرار کند. (که همین خود از مهمترین دلایل افزایش سرعت و دقت در تعیین موقعیت به کمک ژئودزی ماهواره‌ای است)
۷. در ژئودزی کلاسیک احتیاج به برقراری دید بین دو نقطه بود، در حالی که با استفاده از گیرنده‌های GPS احتیاج به برقراری دید بین دو نقطه نیست.
۸. مشکل اساسی دیگر در ژئودزی کلاسیک، مجزا بودن Datum ارتفاعی بود از Datum مسطحاتی که منجر شده بود به مجزا شدن شبکه نقاط کنترل ارتفاع از شبکه نقاط کنترل مسطحاتی.

که خوشبختانه در ژئودزی ماهواره‌ای با استفاده از گیرنده‌های GPS، بیضوی WGS84 هم به عنوان سطح مبنای ارتفاعی و هم به عنوان سطح مبنای مسطحاتی فرض شده است.

Datum = دیتوم =سطح مبنا

۹. دیگر مزیت استفاده از بیضوی WGS84 به عنوان سطح مبنای مسطحاتی و ارتفاعی در GPS، این است که استفاده از بیضوی‌ها و سطوح مبنای محلی و منطقه ای در حال منسوخ شدن است و کشورها و سازمان‌های گوناگون جهانی مایل هستند در یک سطح مبنای واحد (دیتوم واحد) تعیین مختصات می‌کنند.

برای مثال می‌توان به بیضوی‌های منطقه ای و محلی همچون NAD-1927، Clark 1866، ED-50 و بیضوی هایفورد اشاره کرد که امروزه جای خود را به WGS-84 داده‌اند.

۱۰. کاهش وابستگی مشاهدات به همدیگر در ژئودزی ماهواره‌ای.
۱۱. امکانات گسترده‌ای که GPS در اختیار ما می‌گذارد. همچون دسترسی به زمان دقیق، سرعت وسایل نقلیه، جهت حرکت وسایل نقلیه و ...
۱۲. برخی از پروژه‌ها، مثل برخی پروژه‌های تحقیقاتی در خصوص زمین‌شناسی و ژئودینامیک Geo-Dynamic صرفاً با استفاده از گیرنده‌های GPS امکان‌پذیر است.

نتیجه گیری:

افزایش سرعت انجام کار توأم با بهبود دقت انجام پروژه در کنار کاهش هزینه های انجام یک پروژه سبب شده که ژئودزی ماهواره ای جایگاه ممتاز و برجسته ای در بازار امروزی روش‌های تعیین موقعیت بیابد.

سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره ای از گذشته تا کنون:

از گذشته تاکنون سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای گوناگونی به کار گرفته شده که از مشهورترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای داپلر (ترانزیت) (NNSS) که سال‌هاست استفاده از آن منسوخ شده است.

۲. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای GPS که جایگزین داپلر شده است.

۳. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای GLONASS که متعلق به روسیه است و عملکرد آن و طراحی آن بسیار مشابه با GPS آمریکاست.

۴. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای Galileo متعلق به اتحادیه اروپا که هنوز به بهره‌برداری نرسیده است.

۵. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای چین مشهور به Compass که مراحل اولیه شروع به کار خود را تجربه می‌کند.

سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای داپلر (ترانزیت)

قرار بود این سیستم از شش ماهواره تشکیل شود که پنج ماهواره آن به درستی در مدار قرار گرفت و شروع به کار نمود. این سیستم توسط نیروی دریایی ارتش امریکا طراحی و راه‌اندازی شده بود و هدف اولیه ایجاد آن کاربردهای صرفاً ناوبری نظامی بود. (بیشتر به منظور تعیین موقعیت کشتی‌ها و ناوها).

این پنج ماهواره در مدارات تقریباً قطبی به دور زمین می‌چرخیدند. ارتفاع آن‌ها تقریباً ۱۰۷۵ کیلومتر از MSL است. (زاویه میل مدارها نزدیک به ۹۰ درجه بود).

هر کدام از پنج ماهواره ترانزیت در دو فرکانس به سمت زمین سیگنال ارسال می‌کردند.

$$150^{MHZ} = 0.15^{GHZ} \quad \rightarrow \quad \lambda_1 = 2^m$$
$$400^{MHZ} = 0.4^{GHZ} \quad \rightarrow \quad \lambda_2 = 0.75^m$$
$$\lambda.f = 0.3\times10^9 \ {}^{m}\!/_{s}$$

بر طبق برنامه قرار بود تا سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای جدیدی با تعداد ماهواره‌های زیادتر و پیشرفته‌تر طراحی و جایگزین داپلر (ترانزیت) شود. بعدها سیستم جدید "GPS" نام گرفت.

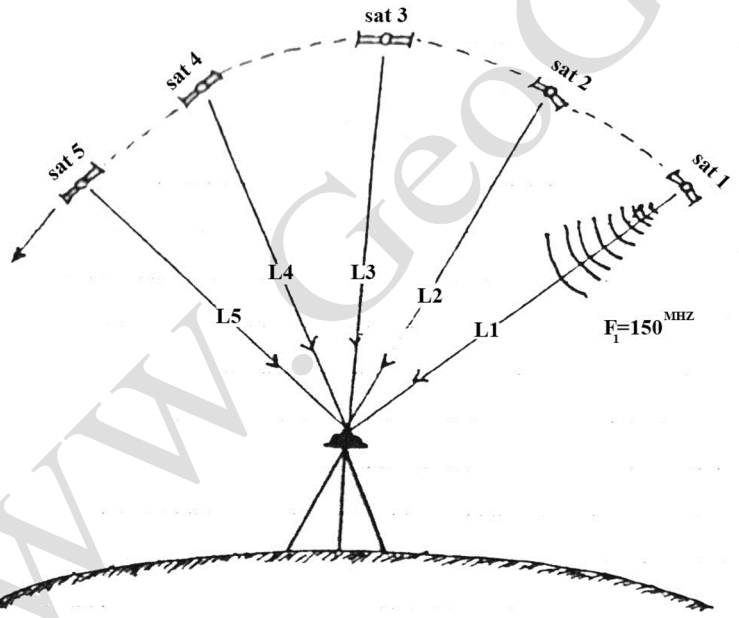
نام دیگر سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای داپلر، N.N.S.S بود.

Navy Navigation Satellite System.

علت اینکه نام این سیستم «داپلر» شد این بود که اساس کار گیرنده‌هایشان مبتنی بر اندازه‌گیری «شیفت داپلر» بود.

پدیده فیزیکی داپلر

پدیده‌ای است که در خصوص اختلاف بین **فرکانس ارسالی** توسط فرستنده و **فرکانس دریافتی توسط گیرنده** در اثر وجود سرعت نسبی بین گیرنده و فرستنده رخ می‌دهد.



ماهواره‌های ترانزیت صرفاً از طریق اندازه‌گیری شیفت داپلر تعیین موقعیت را انجام می‌دهند. در حالی که ماهواره‌های GPS، سه تکنولوژی مختلف برای تعیین موقعیت دارند.

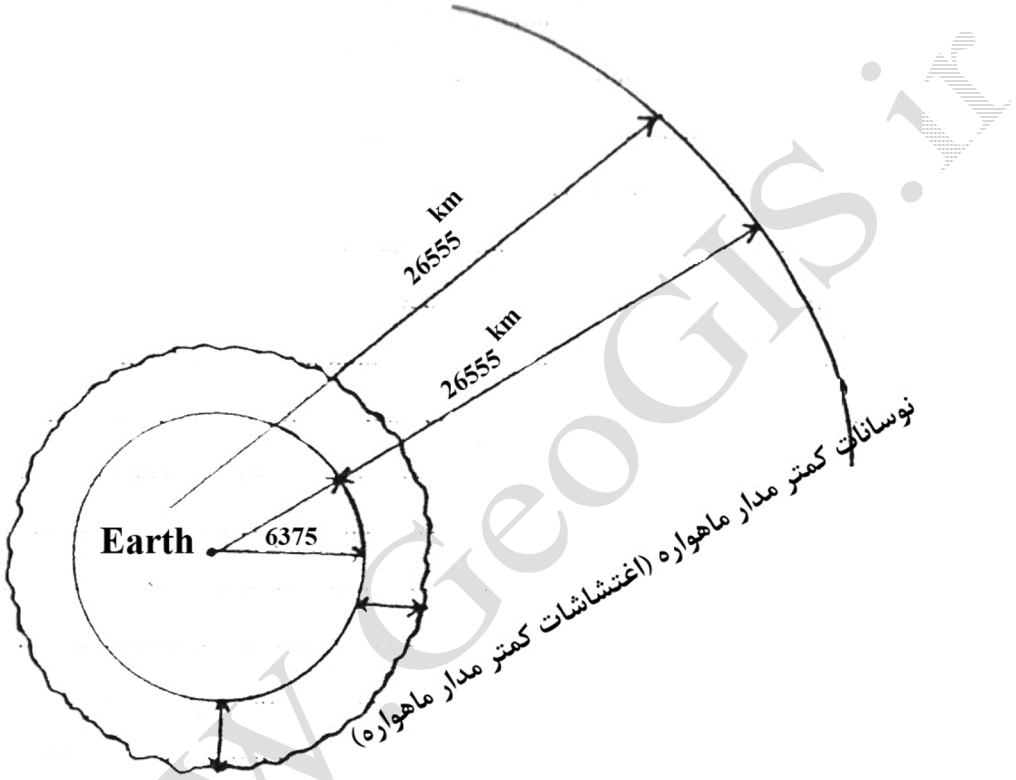
انواع مشاهدات پایه یک گیرنده GPS
- ۱) فاز موج حامل (Carrier phase)
- ۲) شبه فاصله (کد C/A یا کد P)
- ۳) شیفت داپلر

مزایای سیستم تعیین موقعیت GPS نسبت به داپلر (ترانزیت) :

۱) تعداد بیشتر ماهواره های GPS در فضا

۲) ارتفاع بیشتر ماهواره‌های GPS (20200 km) در مقایسه با ماهواره های داپلر (1100 km) سبب می‌شود که رؤیت ماهواره‌های GPS از سطح زمین راحت‌تر باشد.

۳) ارتفاع بیشتر ماهواره‌های GPS سبب می‌شود که ماهواره‌های GPS کمتر تحت تأثیر نوسانات میدان ثقل زمین قرار بگیرند. در نتیجه مدار ماهواره‌های GPS به پیش‌بینی مدار آن‌ها نزدیک است.



(فاصله بین مرکز زمین تا یک ماهواره GPS حدود ۲۶۵۷۵ کیلومتر می‌باشد)

۴) طول موج‌های مورد استفاده ماهواره‌های GPS (^{cm} 19.04 , ^{cm}24.44) در مقایسه با طول موج‌های داپلر (^{cm} 75 , ^{cm}200)، کوچکتر است لذا دقت اندازه‌گیری با امواج GPS بیشتر است.

۵) وجود قطعات و تجهیزات به مراتب پیشرفته‌تر در ماهواره‌های GPS؛ برای مثال بکارگیری ساعت‌های بسیار دقیق اتمی در ماهواره‌های GPS (سزیمی، روبیدیومی) در مقایسه با ساعت‌های کوارتز بکار گرفته شده در ماهواره های سیستم ترانزیت.

۶) زاویه میل ماهواره‌های GPS برابر با ۵۵ درجه است؛ لذا ماهواره های GPS برای مناطق با عرض‌های جغرافیایی از ۷۰- درجه تا ۷۰+ خیلی راحت‌تر قابل رویت هستند. در حالی که ماهواره های سیستم داپلر که مدارات قطبی داشتند در مناطق قطبی به راحتی قابل رویت بودند (در حقیقت وقت ماهواره های داپلر متأسفانه بر فراز مناطق قطبی و نزدیک به قطب تلف می‌شد).

کاربردهای امروزی ژئودزی ماهواره ای

امروزه ژئودزی ماهواره ای در موارد گوناگونی با در نظر گرفتن دو پارامتر اساسی یعنی:

الف) فواصل بین ایستگاه‌ها و ب) دقت مورد نیاز. هم در کارهای عمومی و عادی و هم در پروژه های پژوهشی و بسیار دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخشی از این کاربردها به شرح ذیل می‌باشد:

۱- ایجاد شبکه های مرجع مختصات جهانی، منطقه ای و ملی

۲- بررسی رفتار پوسته زمین و مسایل ژئودینامیکی

۳- امور ناوبری

٤- تولید انواع گوناگون نقشه‌ها

٥- میکروژئودزی

٦- مشارکت در انواع گوناگون بسیار متنوع اندازه گیری‌ها از جمله پایش های جوی

۷- .....

انواع امواج ←
- الکترومغناطیس (مثل نور، امواج مایکروویو، مادون قرمز و...)
- صوتی
- ...

ماهواره‌های GPS امواج خود را در دو فرکانس ارسال می‌دارند که هر دو فرکانس در محدوده UHF امواج مایکروویو قرار دارند.

$$UHF : 0.3^{GHZ} \le f \le 3^{GHZ}$$
$$L : 1.0^{GHZ} \le f \le 2.0^{GHZ}$$

باند L به محدوده‌ای از امواج مایکروویو گفته می‌شود که فرکانس بین یک تا دو گیگا هرتز دارند.
امواج الکترومغناطیس به راحتی از خلأ عبور می‌کنند؛ یک قانون مهم برای امواج الکترومغناطیس در خلأ برقرار است و آن اینکه:

$$\lambda \cdot f \cong 0.3 \times 10^{9} \quad m / s$$

λ طول موج (واحد : متر)

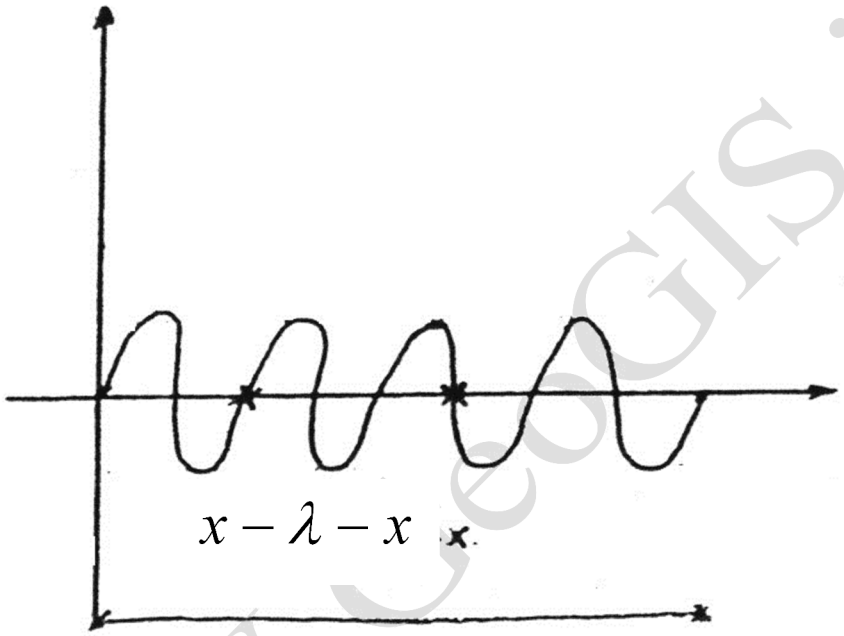
f فرکانس (واحد: HZ)

T پریود (دوره تناوب) (واحد : ثانیه)

مثال: وقتی گفته می‌شود برق شهری دارای فرکانس 50^{HZ} است یعنی

$T = 0.02$ ثانیه

مثال: اگر فرکانس یک موج برابر ۵ هرتز باشد، این موج در مدت ۷ ثانیه چقدر جلو رفته است؟



$\Delta t = 1^{\sec}$

زمان × سرعت = مسافت

$= \text{سرعت} \times 7^{Sec}$

$= f \times \lambda \times 7^{Sec}$

$= 5 \times \lambda \times 7^{Sec}$

$= 35\ \lambda$

در خصوص هر عملیاتی با گیرنده GPS پاسخ به هر سه سؤال زیر ضروری است:

(به طور خلاصه می‌توان گفت از سه نقطه نظر گوناگون عملیات تعیین موقعیت با گیرنده GPS را باید مورد بررسی قرار داد)

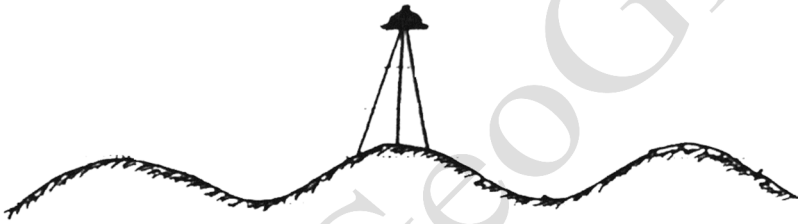
۱) تعیین موقعیت در این پروژه نسبی بوده است یا مطلق؟...

۲) تعیین موقعیت در این پروژه استاتیک بوده است یا کینماتیک؟...

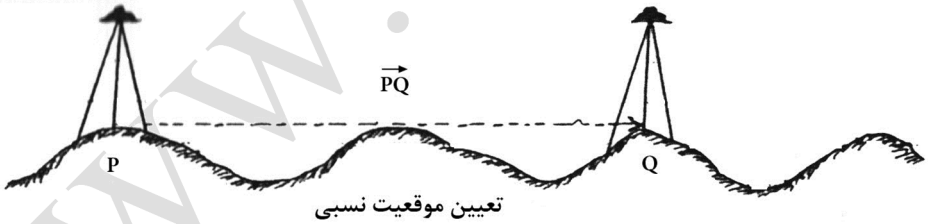
۳) تعیین موقعیت در این پروژه پس پردازش بوده است یا آنی؟...

تعیین موقعیت نسبی در مقابل تعیین موقعیت مطلق

Absolute point positioning تعیین موقعیت مطلق	VS	Relative point positioning تعیین موقعیت نسبی
اگر فقط یک گیرنده GPS بر روی نقطه مستقر شود و مختصات آن نقطه را در یک سیستم مختصات ژئوسنتریک مثلاً WGS84 به ما بدهد آنگاه می‌گویند؛ تعیین موقعیت به صورت مطلق صورت گرفته است.		حداقل دو گیرنده GPS احتیاج داریم و هدف محاسبه بردار مکانی بین دو نقطه‌ای است که گیرنده‌های GPS بر روی آن‌ها مستقر یافته است.



تعیین موقعیت مطلق



تعیین موقعیت نسبی

در تعیین موقعیت نسبی، هدف محاسبه بردار $\overrightarrow{PQ}$ است با استفاده از استقرار گیرنده‌های GPS در نقاط P و Q.

تعیین موقعیت مطلق یک نقطه (که معمولاً با استفاده از فقط یک گیرنده GPS صورت می‌گیرد) عمدتاً کاربردهای ناوبری (Navigation) دارد در حالی که تعیین موقعیت نسبی دو نقطه نسبت به همدیگر (که با حداقل دو گیرنده GPS باید صورت گیرد) عمدتاً کاربردهای نقشه‌برداری (Surveying) دارد.

در تعیین موقعیت نسبی، ما معمولاً به دقت‌های بهتر و یا بسیار بهتر می‌رسیم. (در مقایسه با تعیین موقعیت مطلق).

برای مثال در حال حاضر (۲۰۱۱ میلادی) یک گیرنده GPS تک فرکانسه در حالت تعیین موقعیت مطلق دقتی حدود متر تا 10±متر دارد. در حالی که در تعیین موقعیت نسبی می‌توان به دقت‌های بهتر از ۱۰ سانتیمتر نیز دست یافت.

تعیین موقعیت کینماتیک در مقابل تعیین موقعیت استاتیک

Static Point positioning v.s. Kinematic Point Positioning

اگر هر دو گیرنده در هنگام جمع‌آوری سیگنال‌های GPS ثابت باشند، آنگاه تعیین موقعیت از نوع استاتیک نام خواهد گرفت. اگر یکی از دو گیرنده متحرک باشد، آنگاه تعیین موقعیت را از نوع کینماتیک می‌نامیم. اگر فقط یک گیرنده GPS داشته باشیم بسته به ثابت یا متحرک بودن همین یک گیرنده روش تعیین موقعیت استاتیک (در صورت ثابت بودن) و کینماتیک (در صورت متحرک بودن) نام خواهد گرفت.

به لحاظ دقت، روش استاتیک از دقت بهتری در مقایسه با کینماتیک برخوردار است.

تعیین موقعیت استاتیک عمدتاً کاربردهای نقشه‌برداری (surveying) دارد. در حالی که تعیین موقعیت کینماتیک هم کاربردهای نقشه‌برداری گوناگون دارد و هم کاربردهای ناوبری متنوع.

تعیین موقعیت پس پردازشی در مقابل تعیین موقعیت آنی

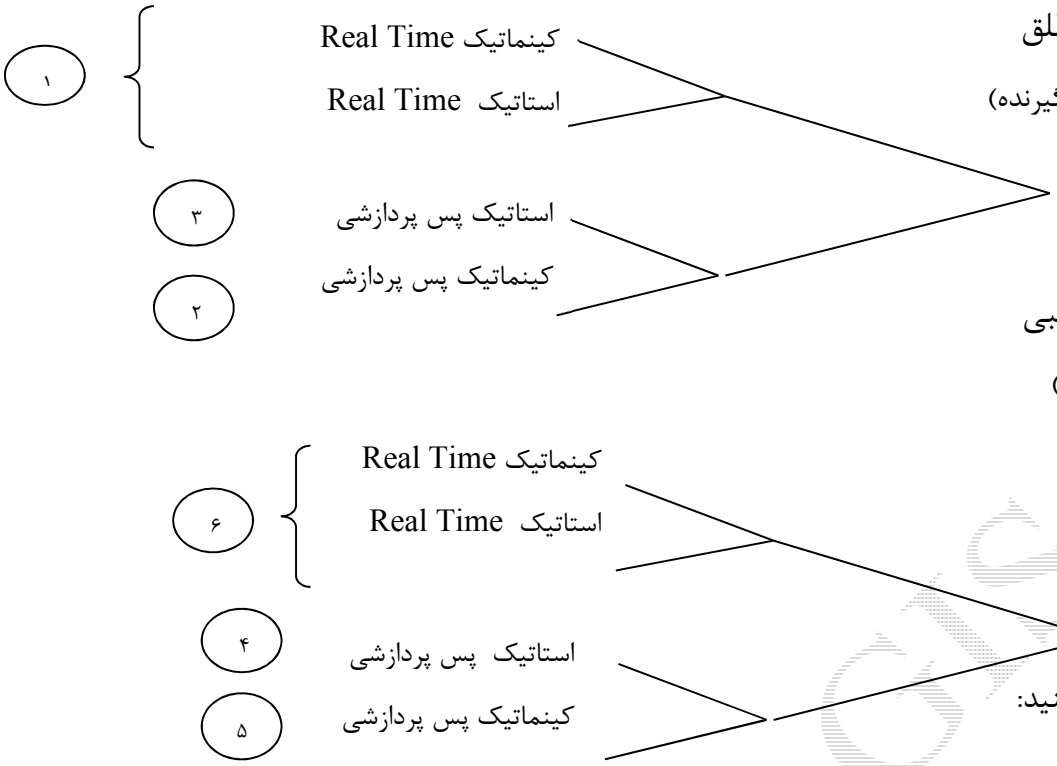
Post process Positioning v.s. Real Time Positioning

در صورتی که موقعیت گیرنده GPS در عملیات زمینی در همان لحظه بر روی LCD گیرنده GPS به نمایش درآید می‌گویند تعیین موقعیت Real Time است. اما اگر داده‌های جمع آوری شده توسط گیرنده GPS را پس از اتمام عملیات زمینی به دفتر کار انتقال دهیم و در کامپیوتر یا لپ‌تاپ تخلیه نموده و پردازش کنیم، تا مختصات محاسبه شود، گویند تعیین موقعیت از نوع Post process (پس پردازشی) است.

بدیهی است که تعیین موقعیت پس پردازشی در مقایسه با Real Time، دقت بهتری دارد.

تعیین موقعیت پس پردازشی عمدتاً کاربردهای نقشه‌برداری دارد در حالی که تعیین موقعیت Real Time هم کاربردهای نقشه برداری دارد و هم ناوبری.

بنابراین ظاهراً می‌توان 2×2×2=8 حالت را در نظر گرفت که البته در عمل برخی از آن‌ها را باید با هم ادغام شده در نظر گرفت. یا به عبارت بهتر می‌توان گفت که بعضی از این ۸ حالت کاربردی ندارند



به شماره‌ها توجه کنید:

(۱) مطلق Real Time : که چه در حالت استاتیک و چه در حالت کینماتیک، دقت بالایی ندارد. این نوع از تعیین موقعیت، کاربردهای ناوبری دارد.

(۲) مطلق کینماتیک پس پردازشی چون دقتی مشابه با مطلق کینماتیک Real-Time دارد، جنبه کاربردی ندارد.

(۳) مطلق استاتیک پس پردازشی، کاربردهای نقشه‌برداری دارد و در بین انواع روش‌های تعیین موقعیت مطلق بهترین دقت را دارد.

(۴) "نسبی استاتیک پس پردازشی" بیشترین دقت را برای ما در بین روش‌های گوناگون به ارمغان می‌آورد. (هر دو گیرنده ثابت و برای چند ده دقیقه اقدام به جمع‌آوری داده می‌کنند).

(۵) نسبی کینماتیک پس پردازشی دقت نسبتاً خوبی دارد ولی به "نسبی استاتیک پس پردازشی" نمی‌رسد. (یک گیرنده ثابت و دیگری متحرک است و هر دو همزمان به جمع‌آوری داده مشغولند).

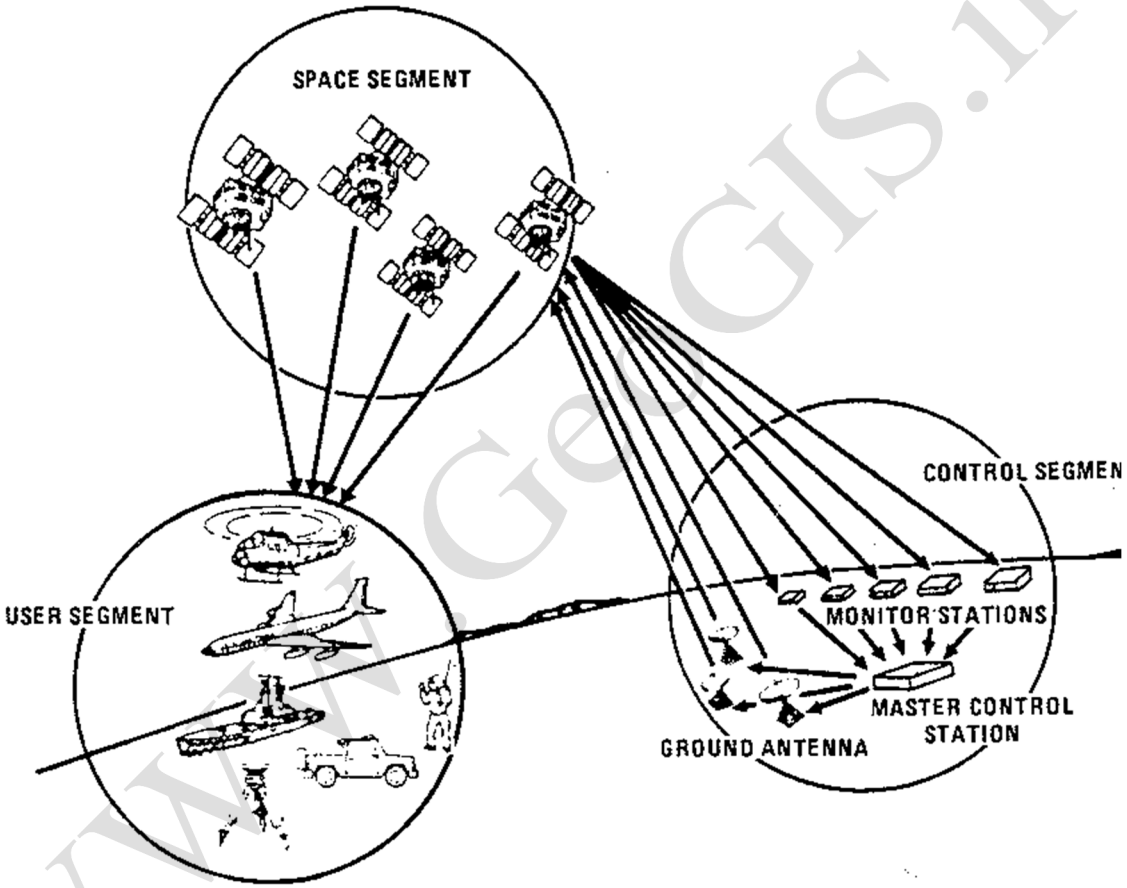
(۶) در عمل حالت Real Time Static حالت خاصی از Real Time Kinematic به حساب می‌آید. صرفاً گیرنده‌هایی قابلیت تعیین موقعیت Real Time Kinematic را دارند که: اولاً دو فرکانسه باشند. ثانیاً رادیو مودم داشته باشد. به عبارت دقیق‌تر قابلیت RTK منحصر به گیرنده‌های GPS دو فرکانسه مجهز به رادیو مودم است.

فصل دوم

اجزاء تشکیل دهنده سیستم GPS

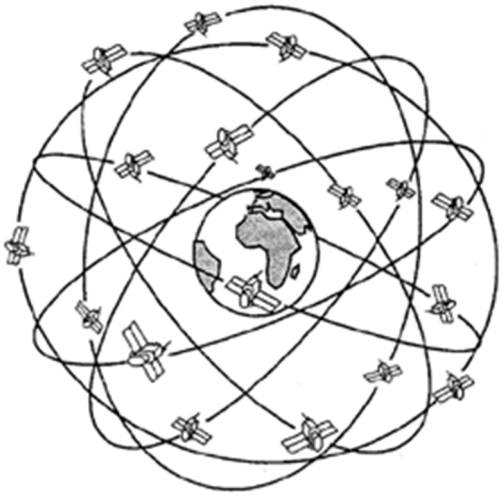
به طور کلی گفته می‌شود که سیستم GPS از سه قسمت اساسی تشکیل شده است:

- Space Segment (قسمت فضایی)
- Control Segment (قسمت کنترل)
- User Segment (قسمت کاربر)



قسمت فضایی (Space Segment):

شامل ماهواره‌ها و تجهیزات مربوط به آن‌ها و نحوه قرار گرفتن آن‌ها در فضا می‌باشد. قسمت فضایی خود شامل دو بخش است:



یک بخش به نام کانستلیشن لقب گرفته که در آن اطلاعات عمومی مربوط به مدار ماهواره و چگونگی قرار گرفتن ماهواره در فضا بیان شده است که شامل موارد زیر است:

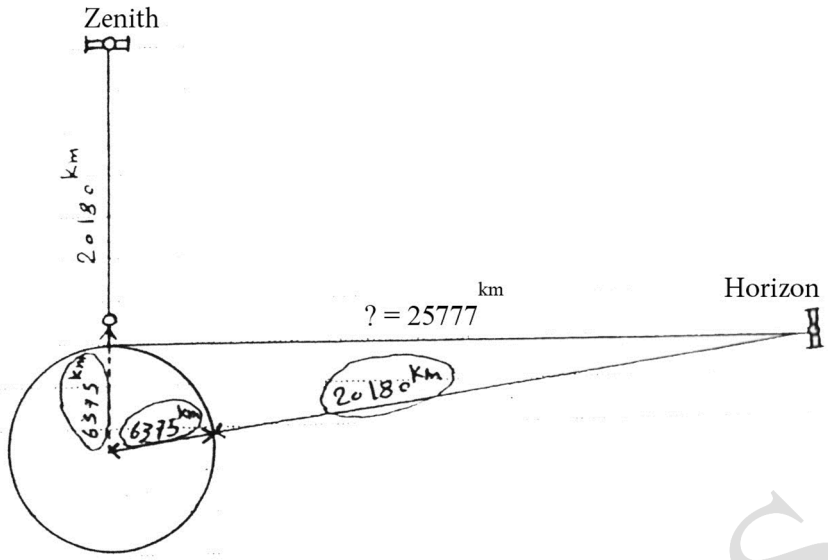
- بر طبق طراحی اولیه سیستم GPS باید از حداقل ۲۴ ماهواره تشکیل گردد (۴ ماهواره در هر مدار)
- سیستم GPS دارای ۶ صفحه مداری (Orbital plane) می‌باشد که همگی زاویه میل تقریباً ۵۵ درجه دارند.
- بر طبق طراحی اولیه از این ۲۴ ماهواره باید ۲۱ ماهواره فعال و ۳ ماهواره به صورت یدک باشد.
- در حال حاضر تعداد ماهواره‌های GPS به ۳۲ عدد رسیده است.
- ارتفاع این ماهواره‌ها تا نقطه نادیرشان بر روی سطح زمین تقریباً برابر 20200^{km} می‌باشد. بنابراین نیم قطر اطول آن‌ها با احتساب شعاع کره زمین برابر 26575^{km} خواهد بود.

مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک ماهواره GPS یک دور کامل به دور کره زمین بچرخد تقریباً برابر 11^{h} و 58^{min} می‌باشد یعنی تقریباً ۱۲ ساعت.

$$h \approx 20200^{km}$$
$$a \approx 26575^{km}$$
$$\tau = 11^{h}\ 58^{min} \approx 12^{h}$$
$$i \approx 55^{o}$$

وقتی که ماهواره در zenith ما قرار بگیرد، فاصله آن تا گیرنده GPS به حداقل خود یعنی ^{km}۲۰۲۰۰ می‌رسد. برعکس، وقتی که ماهواره در افق به سختی رؤیت می‌شود فاصله آن تا گیرنده GPS به حداکثر خود یعنی 25777^{km} می‌رسد.

$$20200^{km} < x < 25777^{km}$$



$$\sqrt{(20200+6375)^2-(6375)^2}=25777^{km}$$

بخش دیگر قسمت فضایی اصطلاحاً بخش satellite نام دارد.

در بخش satellite به مسائل فنی داخل ماهواره‌ها اشاره شده مثل اینکه این ماهواره‌ها امواج الکترومغناطیسی را در چه فرکانسی و چگونه بفرستند. از دیگر مسائل این بخش ساعت‌های اتمی ماهواره‌ها، کامپیوتر آن‌ها، باطری خورشیدی آن‌ها و ... می‌باشد.

Space segment (قسمت فضایی)

- بخش کانستلیشن (مجموعه ای از ستاره‌ها – لغت از نجوم)
- بخش ماهواره (satellite)
  - مسائل فنی داخل ماهواره
  - ساعت اتمی
  - فرکانس
  - باطری
  - پانل‌های خورشیدی
  - کامپیوتر

قسمت کنترل (Control Segment):

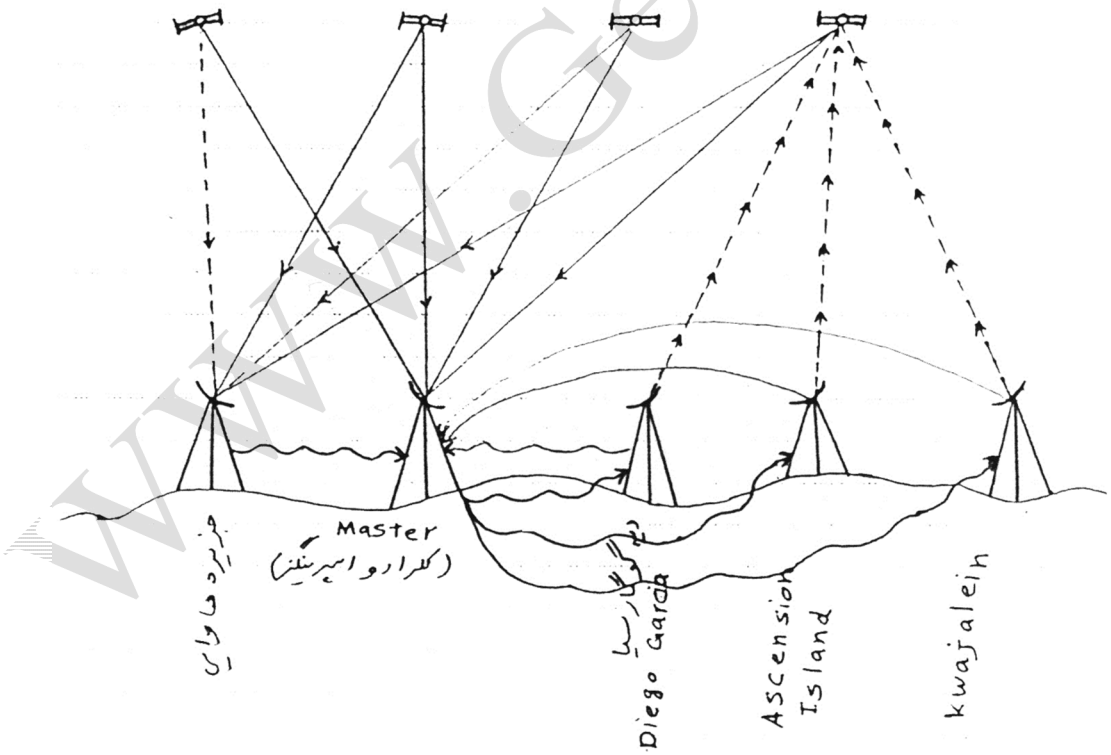
وظیفه این بخش زیر نظر داشتن وضعیت ماهواره‌ها می‌باشد. وضعیت ماهواره‌ها از نقطه نظر گوناگون همچون سلامتی ماهواره‌ها، مدار ماهواره‌ها، ساعت اتمی ماهواره و همزمانی آن‌ها با همدیگر و نیز وضعیت ارسال امواج از ماهواره‌های GPS و اوضاع و احوال باطری، کامپیوتر و پانل‌های خورشیدی آن‌ها.

- به طور کلی ۶ ایستگاه کنترل زمینی بر روی سطح کره زمین وجود دارد که یکی از آن‌ها به صورت یدک است و ۵ تای دیگر مشغول کنترل ماهواره‌ها هستند.

این ایستگاه‌ها وظایف گوناگونی دارند: یکی از آن‌ها که به ایستگاه Master شهرت یافته است؛ ایستگاه واقع در کلرادو اسپرینگز (Colorado Springs) است.

در این ایستگاه محاسبات لازم بر روی اطلاعات دریافتی پنج ایستگاه مانیتورینگ زمینی صورت می‌گیرد و نتیجه محاسبات به سه عدد از ایستگاه‌ها که موظف به ارسال نتایج محاسبات و دیگر اطلاعات به ماهواره‌ها هستند، مخابره می‌شوند.

Master Control Station



هر پنج ایستگاه تقریباً در نزدیکی مدار استوا واقع هستند و طوری پراکنده هستند که تقریباً پراکندگی متعادلی دارند. (خود ایستگاه Master یکی از (۵) ایستگاه مانیتورینگ است)

پنج ایستگاه مانیتورینگ زمینی اصطلاحاً world-wide monitoring station نامیده شده‌اند در هر پنج ایستگاه از گیرنده‌های بسیار دقیق مجهز به ساعت‌های اتمی دقیق و توانایی رمزگشایی P-Code استفاده شده است.

هر پنج ایستگاه به صورت شبانه‌روزی و بدون وقفه با ماهواره‌های قابل رؤیت در ارتباطند و کلیه سیگنال‌های دریافتی از ماهواره‌های GPS را ثبت کرده و برای ایستگاه Master ارسال می‌دارد.

از این پنج ایستگاه سه ایستگاه موظفند نتایج محاسبات ایستگاه Master را به ماهواره‌ها تزریق کنند. به این سه ایستگاه اصطلاحاً Ground Control Station نیز گفته می‌شود.

این سه ایستگاه در Kwajalein ، Diego Garcia و Ascension Island مستقر هستند.

ایستگاه وندنبرگ (به عنوان یدک ایستگاه Master):

یک ایستگاه در وندنبرگ آماده است تا در صورت بروز مشکل در کلرادو اسپرینگز هدایت عملیات را بر عهده بگیرد.

بخش کاربر (User Segment)

این قسمت مربوط به استفاده کنندگان از گیرنده‌های GPS است. گیرنده‌های GPS را به دو بخش اساسی تقسیم نموده‌اند:

الف ـ آن‌هایی که فقط می‌توانند از سرویس S.P.S استفاده کنند. (مشهور به گیرنده‌های Civil یا گیرنده‌های غیرنظامی) این گیرنده‌ها به P(Y)-Code دسترسی ندارند. (توانایی رمزگشایی از کد P(Y)-Code را ندارند)

این گیرنده‌ها به راحتی به C/A-code و نیز فاز موج حامل دسترسی دارند.

S.P.S= Standard Position Service

(سرویس تعیین موقعیت استاندارد)

ب ـ گیرنده‌هایی که می‌توانند از P.P.S نیز استفاده کنند. این گیرنده‌ها صرفاً در اختیار نیروهای نظامی مورد اعتماد ارتش آمریکا می‌باشد.

- این گیرنده‌ها قادر به رمزگشایی از P(Y)-Code هستند.

P.P.S = Precise Positioning Service

(سرویس تعیین موقعیت دقیق)

- مهمترین ویژگی گیرنده‌های قادر به رمزگشایی *P(Y)-Code*: تعیین موقعیت Real Time دقیق‌تر است. این گیرنده‌ها در حالت پس پردازشی تفاوت قابل ملاحظه‌ای با گیرنده‌های غیرنظامی ندارند.
- دریافت *C/A-code* می‌تواند برای ما دقتی در حدود ۷ تا ۸ متر را در حالت Real-Time به ارمغان بیاورد در حالی که گیرنده های نظامی (که قدرت رمز گشایی *P(Y)-Code را دارند*) می‌توانند دقت یک متر را در حالت Real-Time به ارمغان بیاورند.

سطح مبنای مورد استفاده در سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای GPS:

در GPS، هم سطح مبنای مسطحاتی و هم سطح مبنای ارتفاعی، بیضوی ژئوسنتریک WGS-84 می‌باشد.

یعنی $(\lambda \quad \varphi \quad h)$ نقاط نسبت به سطح بیضوی WGS-84 محاسبه می‌شود.

λ : *طول ژئودتیک نقطه نسبت به نصف‌النهار ژئودتیک گرینویچ*

ϕ : *عرض ژئودتیک نقطه نسبت به استوای ژئودتیک*

h : *ارتفاع ژئودتیک نقطه نسبت به سطح بیضوی*

مختصات یک نقطه نسبت به بیضوی WGS-84 منحصر به فرد است: زیرا ماهیتی سه بعدی دارد. ولی چون معمولاً می‌خواهیم مختصات سه بعدی $(\lambda \quad \phi \quad h)$ را به سیستم تصویر مورد نظر (دلخواه) ببریم (در حقیقت از فضای سه بعدی به فضای دو بعدی می‌خواهیم برویم) : بنابراین بسته به ویژگی‌های سیستم تصویر نقشه، این مختصات متفاوت خواهد شد.

بدیهی است که مقادیر $\varphi \ , \lambda$ تحت تأثیر نوع سیستم تصویر نقشه، تغییر می‌کند و مقدار h تغییر نخواهد داشت.

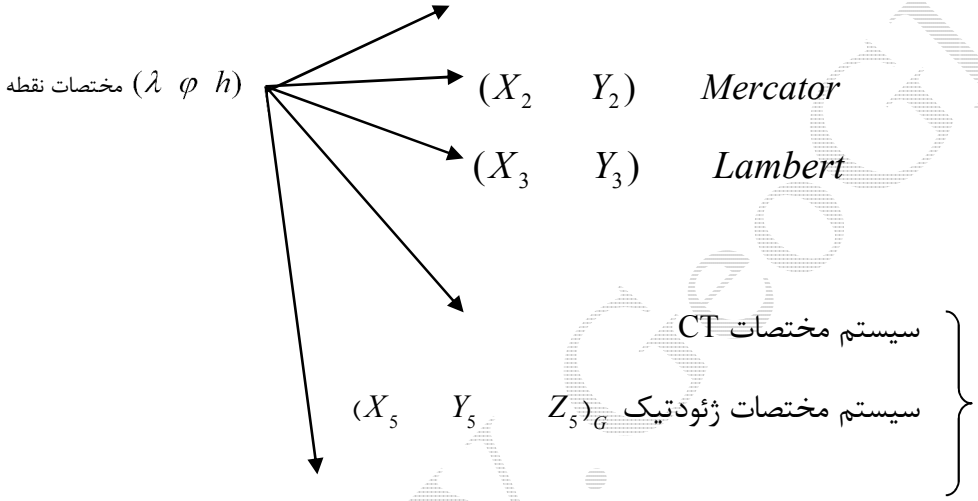
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\,Cos\phi\,Cos\lambda \\ (N+h)\,Cos\phi\,Sin\lambda \\ (N\,b^2/a^2+h)\,Cos\phi\,Cos\lambda \end{bmatrix}$$

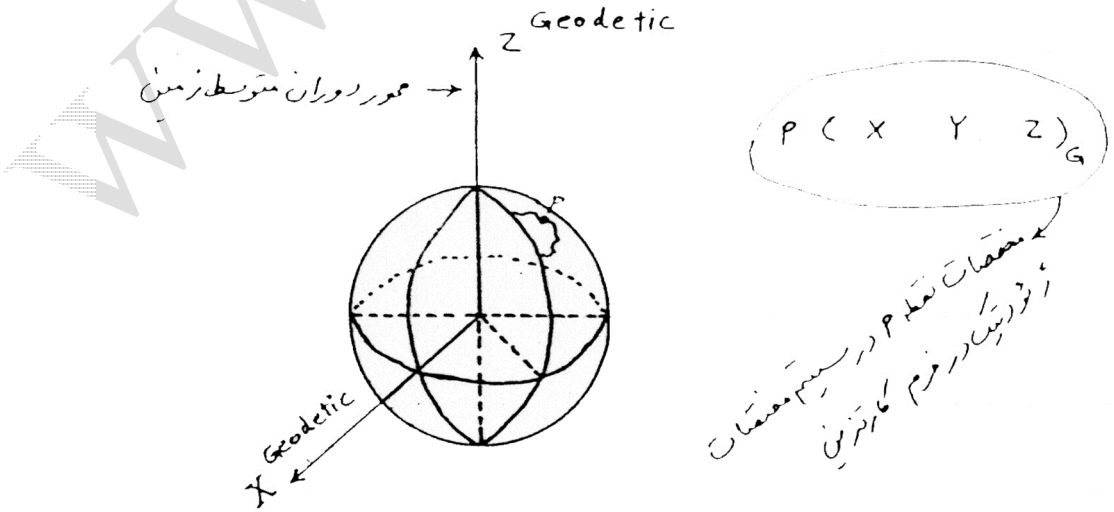
$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 Sin^2\phi}}$$

a : نیم قطر اطول بیضوی

b : نیم قطر اقصر بیضوی

فضای سیستم تصویر (که یک فضای دو بعدی است) فضای بیضوی WGS-84

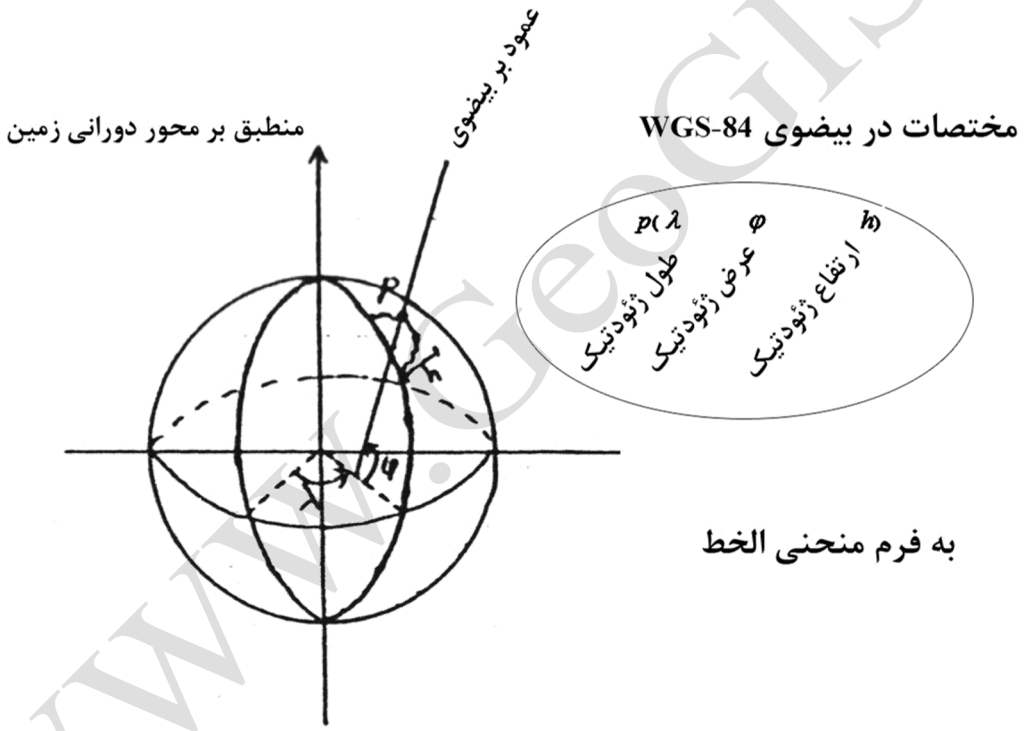




بیضوی مورد استفاده در GLONASS:

بیضوی مورد استفاده در GLONASS، بیضوی PZ-90 است که بسیار شبیه به بیضوی WGS-84 است؛ فرق اصلی بیضوی PZ-90 با بیضوی WGS-84 نوک محور Z آن‌ها با همدیگر است: نوک محور Z در بیضوی WGS-84، قطب متوسط زمین تا سال ۱۹۸۴ است در حالی که نوک محور Z بیضوی PZ-90 قطب متوسط زمین در فاصله سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۰۵ یا همان CIO است.

به هر حال با یک ترانسفورماسیون ساده، می‌توان مختصات را از بیضوی PZ-90 به بیضوی WGS-84 تبدیل نمود.



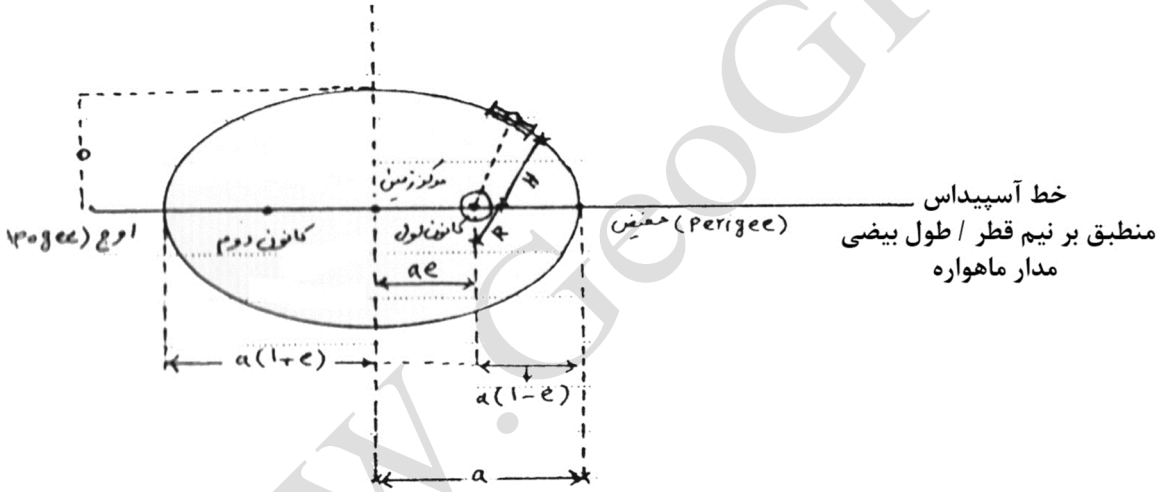
سیستم تصویر مرکاتور (Mercator) :مهمترین ویژگی آن حفظ اصل تشابه است (حافظ آزیموت‌هاست)

سیستم تصویر UTM: تقریباً هم از شکل منطقه و هم از مساحت منطقه نسبتاً محافظت خوبی می‌کند.

قوانین کپلر

قانون اول کپلر: مدار حرکت هر سیاره به دور خورشید یک بیضی است که خورشید در یکی از دو کانون بیضی قرار دارد؛ بنابراین مدار حرکت هر ماهواره به دور زمین یک بیضی است که مرکز زمین در یکی از دو کانون بیضی قرار دارد.

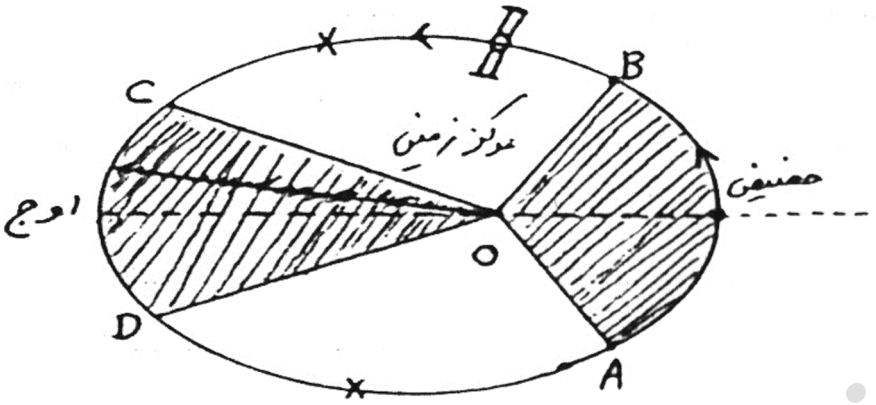
- حرکت یک ماهواره ایده‌آل (آرمانی) در این مدار بدون آنکه نیاز به موتور (یا صرف انرژی) باشد تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد.



$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 1 - \frac{b^2}{a^2}$$

قانون دوم کپلر: هر سیاره به دور خورشید، در مدت زمان‌های مساوی، مساحت‌های مساوی را جاروب می‌کند (نسبت به کانون حرکت) بنابراین هر ماهواره به دور مرکز زمین، در مدت زمان‌های مساوی مساحت‌های مساوی را جاروب می‌کند (نسبت به کانون حرکت)

"سرعت مساحتی ماهواره نسبت به مرکز زمین ثابت است"



$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{CD} \Leftrightarrow S_{OCD} = S_{OAB}$$
$$A\hat{B} \neq C\hat{D}$$

بنابراین

اولاً: سرعت ماهواره در گردش به دور زمین ثابت نیست هرچه مدار ماهواره بیضی‌تر باشد، تغییرات سرعت آن بیشتر است.

ثانیاً: ماهواره در نقطه حضیض، بیشترین سرعت را دارد و در نقطه اوج، کمترین سرعت را دارد.

قانون سوم کپلر: مربع پریود حرکت یک سیاره به دور خورشید تقسیم بر مکعب نیم قطر اطول بیضی مدارش عددی است ثابت.

بنابراین مربع پریود حرکت یک ماهواره به دور مرکز زمین تقسیم بر مکعب نیم قطر اطول مدارش عددی است ثابت.

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{عدد ثابت} = \frac{4\pi^2}{GM}$$ خورشید

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{عدد ثابت} = \frac{4\pi^2}{GM}$$ زمین

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

T : مدت زمان گردش یک دور کامل ماهواره به دور زمین G: ثابت جهانی گرانشی

A: طول نیم قطر / طول بیضی مدار ماهواره M: جرم زمین بر حسب کیلوگرم

مثال: برای یک ماهواره با $T = 11^{h}\ 58^{min}$ حساب کنید ارتفاع متوسط ماهواره را از سطح زمین؟

$$11\times3600+58\times60=43080^{Sec}$$

$$\frac{43080^2}{a^3}=\frac{4\pi^2}{3.986\times10^{14}} \Rightarrow a^3=1.8738247\times10^{22}$$

$$\Rightarrow a=\sqrt[3]{1.8738247\times1.22}$$

$$\Rightarrow a\approx26560000^{m}$$

$$\Rightarrow a\approx26560^{Km}$$

a = شعاع کره زمین + ارتفاع ماهواره تا سطح زمین

$$26560^{km}=6375^{km}+H \qquad \Rightarrow H\approx20185^{km}$$

سؤال: اگر نیم قطر اطول یک ماهواره را ۳ برابر کنیم به نظر شما دوره تناوب (پریود) آن چند برابر می‌شود؟

$\frac{T^2}{a^3}$ = عددی ثابت

T^2 متناسب a^3

$\sqrt{T^2}$ متناسب $\sqrt{a^3}$

T متناسب $a\sqrt{a}$ ← Very important

3 متناسب $3\sqrt{3}$

یعنی دوره تناوب آن $3\sqrt{3}$ برابر خواهد شد.

بنابراین با افزایش نیم قطر اطول بیضی مدار ماهواره، پریود آن افزایش می‌یابد ولی با سرعت بیشتر یعنی با نسبت $a\sqrt{a}$.

سرعت زاویه متوسط $\bar{w}=\frac{2\pi}{T} \Rightarrow \bar{w}$ متناسب $\frac{1}{T}$

$\bar{w}$ متناسب $\frac{1}{a\sqrt{a}}$

با فرض آنکه مدار حرکت ماهواره تقریباً دایروی باشد (e=0) آنگاه محیط این دایره:

$2\pi a$

آنگاه سرعت خطی متوسط ماهواره در مدار (V) خواهد بود:

$$\overline{V} = \frac{\text{مسافت}}{\text{زمان}} = \frac{2\pi a}{T}$$

$$\left.\begin{array}{l} \text{T متناسب } a\sqrt{a} \\ \text{V متناسب } \dfrac{a}{T} \end{array}\right\} \bar{v} \text{ متناسب } \frac{1}{\sqrt{a}}$$

یعنی با افزایش نیم قطر اطول بیضی مدار ماهواره هم سرعت زاویه‌ای آن کاهش می‌یابد و هم سرعت خطی آن. البته سرعت زاویه‌ای خیلی شدیدتر کاهش می‌یابد.

مثال: در صورتی که نیم قطر اطول مدار یک ماهواره را $\frac{1}{9}$ حالت اولش کنند:

با فرض تقریباً دایروی بودن مدار ماهواره:

الف ـ دوره تناوب آن چه تغییری می‌کند؟

ب ـ سرعت متوسط زاویه‌ای آن چه تغییری می‌کند؟

ج ـ سرعت متوسط خطی آن چه تغییری می‌کند؟

$$a_D = \frac{1}{9} a_c$$

$$\frac{T_D^2}{a_D^3} = \frac{T_c^2}{a_C^3}$$

$$\frac{T_D^2}{(\frac{1}{9}a_c)^3} = \frac{T_c^2}{(a_C)^3} \Rightarrow \frac{T_D^3}{(\frac{1}{9})^3} = T_C^2 \Rightarrow T_D = T_C\sqrt{\frac{1}{9}\times\frac{1}{9}\times\frac{1}{9}}$$

$$\Rightarrow T_D = \frac{T_C}{27}$$

یعنی دوره تناوب آن $\frac{1}{27}$ برابر می‌شود.

بنابراین

$$\overline{w}_D = 27\overline{w}_C$$

$$\overline{V}_D = \sqrt{9}\,\overline{V}_C = 3\overline{V}_C$$

$$\overline{V}_D = 3\overline{V}_C$$

ماهواره	ارتفاع (H)	نیم قطر اطول (a)	دوره تناوب (T)	سرعت خطی $(\overline{V})$
لندست (سنجش از دور)	705^{km}	7080^{km}	$100^{\min}$	۷.۵ $^{km/s}$
GPS	20200	26575^{km}	$11^{h}\ 58^{\min}$	۳.۸ $^{km/s}$
Geostationary	35800^{km}	42175^{km}	$23^{h}\ 56^{\min}$	۳ $^{km/s}$
کره ماه	378625	385000^{km}	روز ۲۷.۳	$1^{km/s}$

فصل چهارم

سیستم مختصات مداری[1]

سیستمی است برای بیان موقعیت و حرکت ماهواره که دارای مشخصات زیر است:

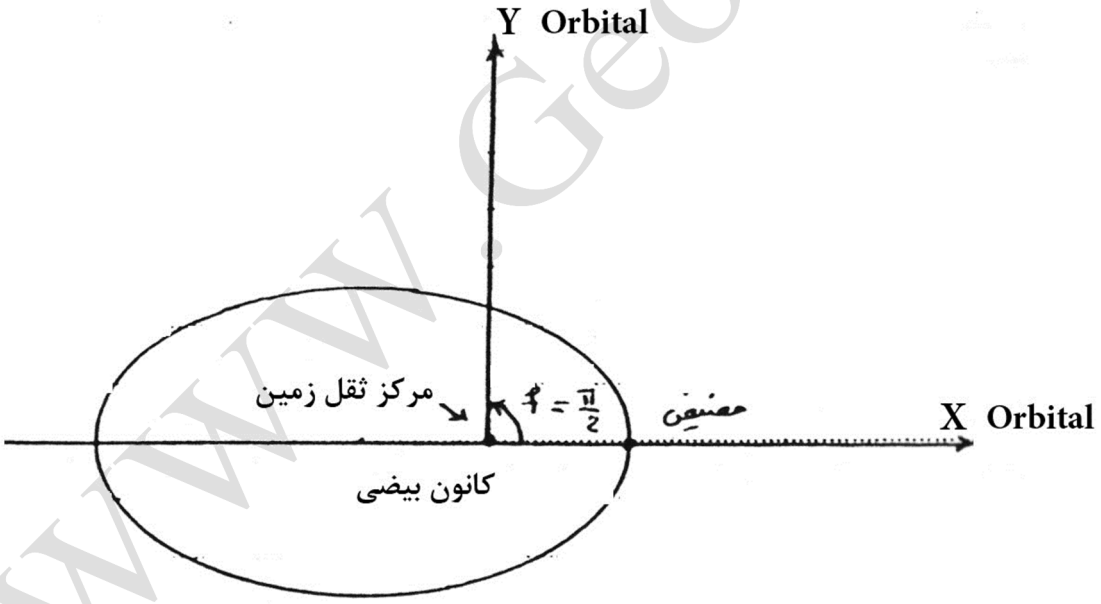
الف ـ مبدأ: منطبق است بر مرکز ثقل زمین

ب ـ محور X : منطبق بر خط آپسیداس به نحوی که جهت مثبت محور X به سمت نقطه حضیض نشانه‌گیری می‌شود.

ج ـ محور Y: در صفحه حرکت مدار ماهواره و عمود بر X در نظر گرفته می‌شود. (عمود بر خط آپسیداس) به نحوی که $f = \frac{\pi}{2}$.

صفحه XY منطبق بر صفحه حرکت ماهواره فرض می‌شود.

د ـ محور Z : عمود بر صفحه حرکت ماهواره به نحوی تعریف می‌شود که سیستم مختصات حاصل را راستگرد می‌کند.



محور Z سیستم مختصات Orbital عمود است بر صفحه XY لذا رسم آن در این شکل امکان‌پذیر نیست.

آنومالی[2]

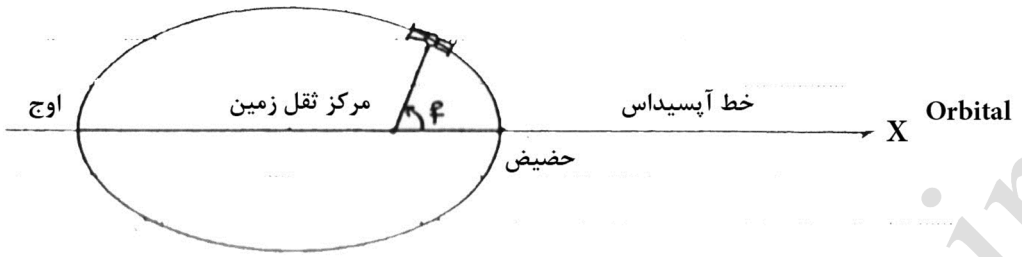
زاویه بین خط آپسیداس با خط متصل کننده ماهواره به مرکز زمین که در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت اندازه‌گیری می‌شود را آنومالی گویند که در سه نوع مختلف تعریف شده است:

---

[1] Orbital Coordinate System
[2] Anomaly

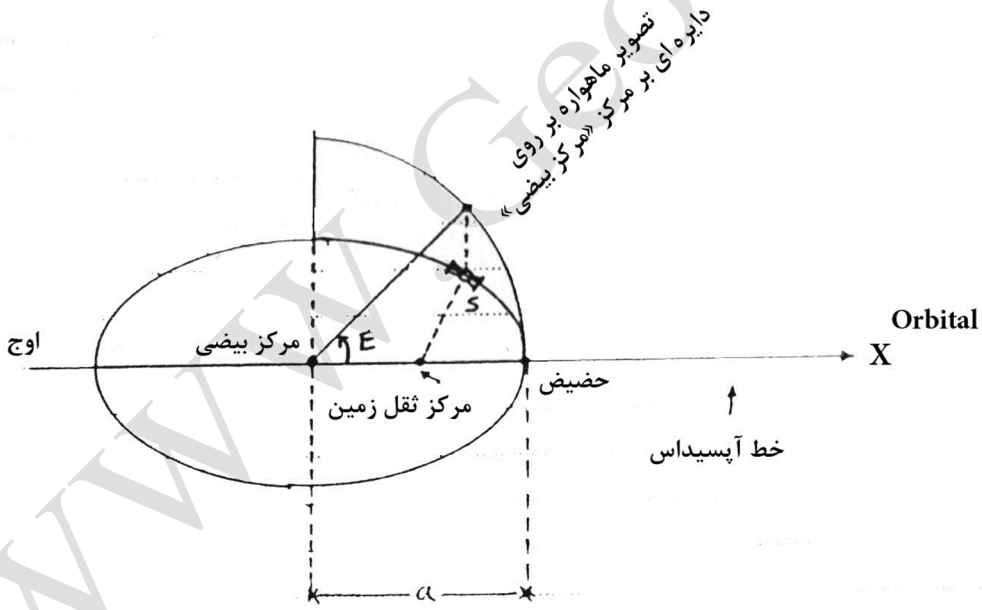
۱- آنومالی حقیقی (واقعی) (f) True Anomaly

که عبارت است از زاویه بین خط آپسیداس با خط واصل بین مرکز ثقل زمین با ماهواره که در خلاف جهت عقربه‌های ساعت اندازه‌گیری می‌شود.



۲- آنومالی خارج از مرکزی (E) Eccentric Anomaly

E عبارتست از زاویه بین خط اپسیداس با خط متصل کننده تصویر ماهواره بر روی دایره‌ای به مرکز «مرکز بیضی» و به **سمت مرکز بیضی**، در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت.



۳- آنومالی متوسط (میانگین) (M) Mean Anomaly

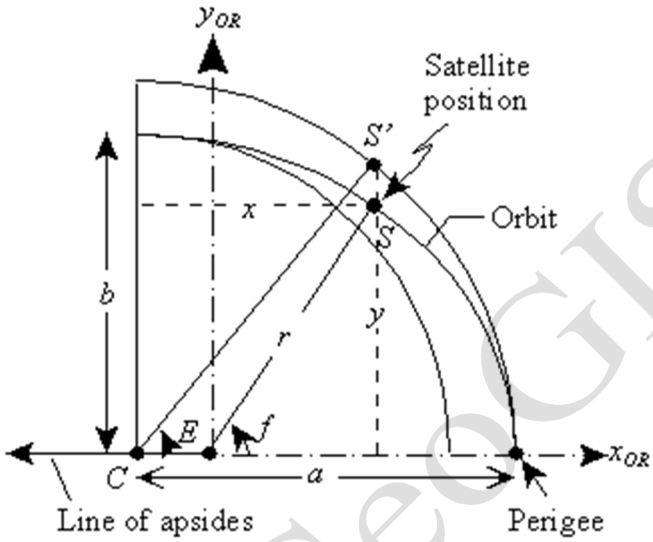
آنومالی متوسط عبارتست از آنومالی حقیقی مربوط به یک ماهواره فرضی که با سرعت زاویه‌ای یکنواخت در مدار خود حرکت می‌کند.

نکته:

شایان ذکر است که:

ماهواره برای ما مقدار M (آنومالی متوسط) را توسط سیگنال‌هایشان ارسال می‌دارد و ما باید با استفاده از یکسری فرمول‌ها (روابط ریاضی) مقدار آنومالی حقیقی (f) را محاسبه کنیم.

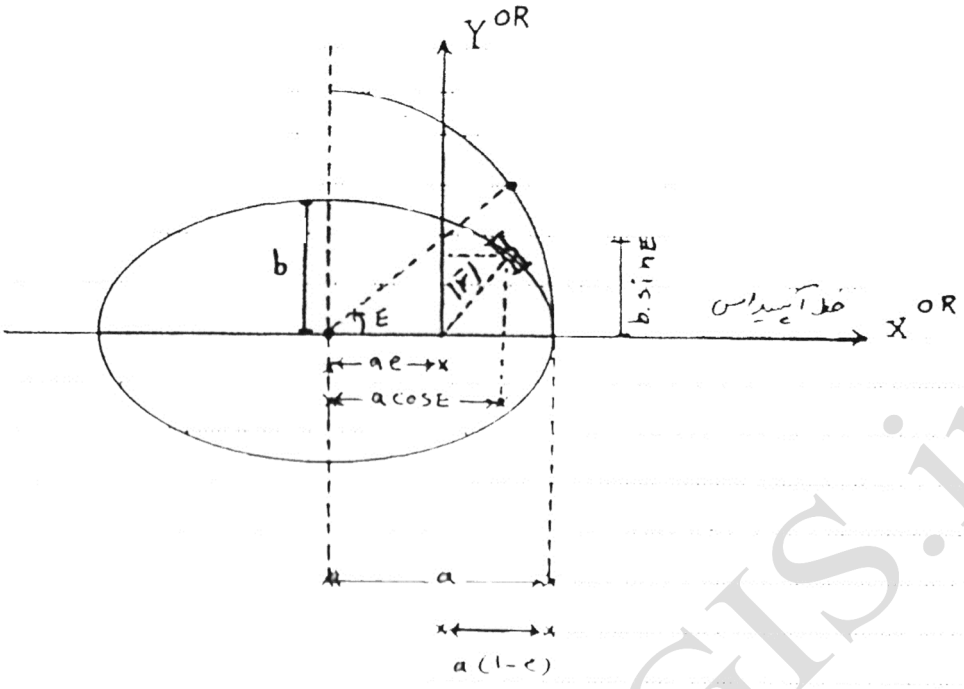
برای این منظور ابتدا، M به E تبدیل می‌شود و سپس E را به f تبدیل می‌کنیم.



روابط بین سه آنومالی مذکور :

ماهواره در سیستم مختصات مداری $(x,y) \rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = |r| \bullet \begin{bmatrix} \mathrm{Cos}\, f \\ \mathrm{Sin}\, f \end{bmatrix}$

$$= \begin{bmatrix} aCosE - a.e \\ b.SinE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(CosE - e) \\ a\sqrt{1-e^2}.SinE \end{bmatrix}$$



$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 1 - \frac{b^2}{a^2} \Leftrightarrow \frac{b^2}{a^2} = 1 - e^2 \Leftrightarrow b = a\sqrt{1-e^2}$$

در این رابطه با داشتن مقادیر E و e به راحتی می‌توان f را محاسبه نمود. $tgf = \frac{\sqrt{1-e^2}\,SinE}{CosE - e}$

بدون اثبات می‌پذیریم: $M = E - e.SinE$

این رابطه به سادگی مقدار M را به E متصل می‌کند.

فرض $\frac{\pi}{3} = E - 0.02SinE$

ماهواره مقدار M را به $\frac{\pi}{3}$ فرستاده و ما می‌دانیم که e مدارهای ماهواره‌های GPS برابر تقریباً 0.02 است:

حال E=?

چنین معادلاتی با روش‌هایی همچون نیوتن ـ رافسون و یا دیگر روش‌های رسیدن تکراری به جواب، به سادگی قابل حل است.

کافی است از معادلات مذکور مشتق بگیریم و ...

سیستم مختصات بعدی (R.A) و المان‌های کپلری

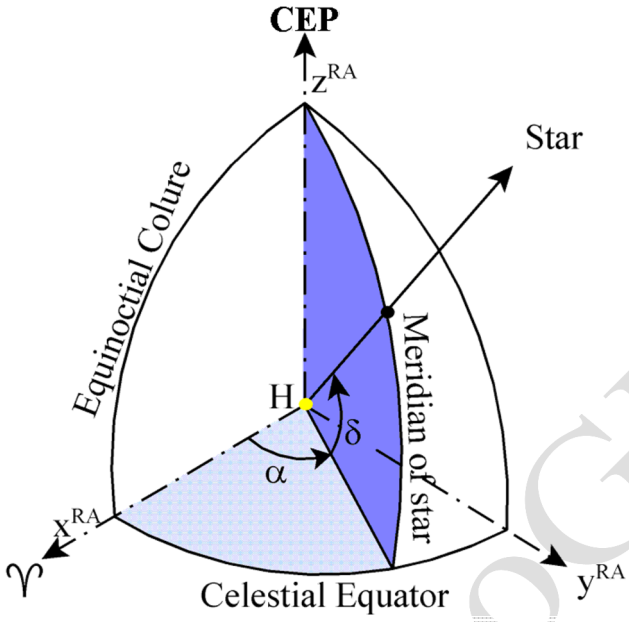


Figure 2

ویژگی‌های سیستم مختصات R.A (سیستم مختصات بعدی) :

الف ـ مبدأ منطبق است بر مرکز زمین

ب ـ محور Z آن منطبق است بر محور دوران زمین

ج ـ صفحه XY آن منطبق بر صفحه استوای زمین

د ـ محور X آن در صفحه استوای زمین است به سمت نقطه γ (گاما).

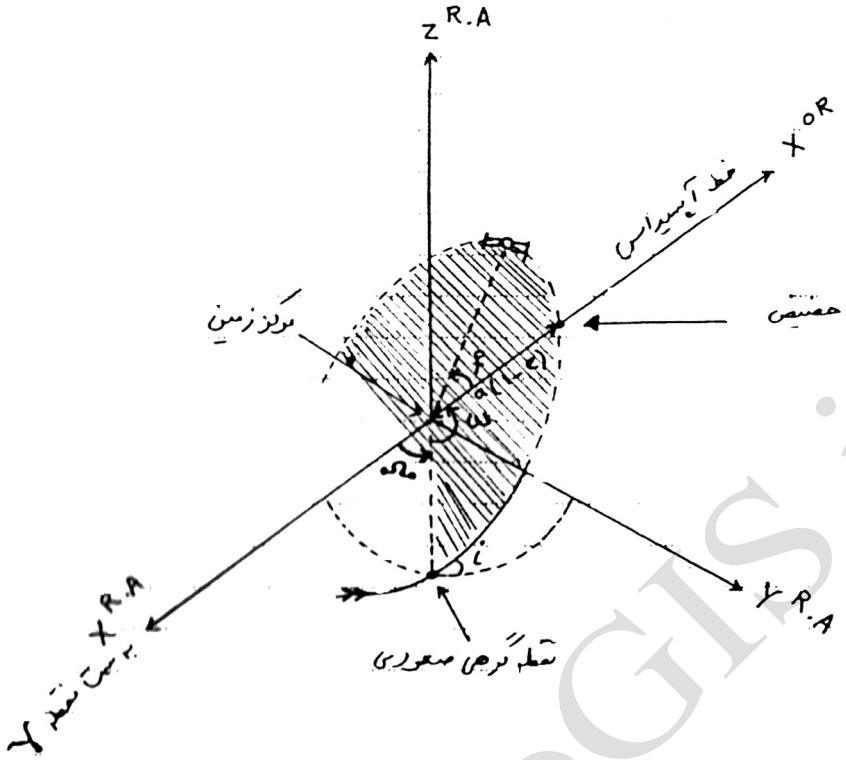
المان‌های کپلری (Keplerian Elements):

المان‌های کپلری ششش عدد هستند این شش المان مشخص می‌کند که :

الف ـ شکل مدار ماهواره چگونه است (ابعاد فشردگی مدار ماهواره)

ب ـ توجیه فضایی صفحه حرکت مدار ماهواره نسبت به سیستم مختصات بعدی (RA) چگونه است؟

ج ـ ماهواره در کجای مدارش در این لحظه قرار دارد.



۱) بعد نقطه گرهی صعودی (Ω) : عبارت است از زاویه ژئوسنتریک بین نقطه گرهی صعودی با محور X سیستم مختصات بعدی که در صفحه استوا و در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت اندازه‌گیری می‌شود.

۲) آرگومان حضیض (آرگومان Perigee): (ω) : عبارت است از زاویه ژئوسنتریک بین امتداد نقطه گرهی صعودی با امتداد نقطه حضیض که در صفحه حرکت مدار ماهواره باید اندازه‌گیری شود.

۳) زاویه میل مدار ماهواره (i)

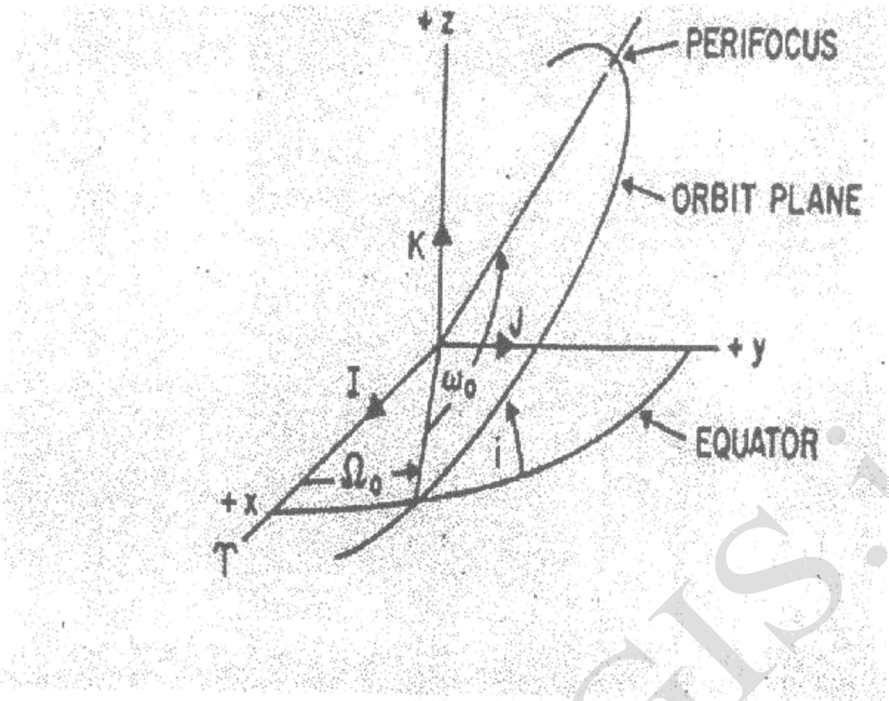
که عبارت است از زاویه بین صفحه مدار حرکت ماهواره با صفحه استوا

شکل و میزان فشردگی

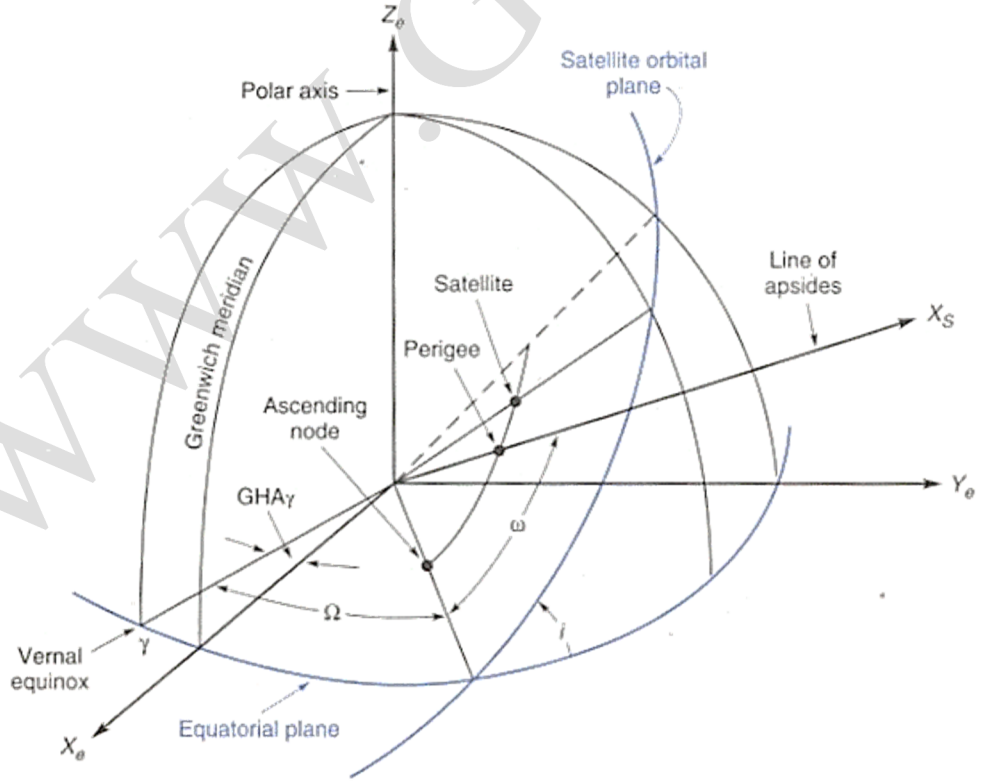
۴) نیم قطر اطول مدار ماهواره (a) ← ابعاد مدار ماهواره

۵) خروج از مرکزیت اول بیضی مدار ماهواره (e) ←میزان فشردگی

۶) آنومالی حقیقی (f): که نشان دهنده این است که در این لحظه ماهواره در کجای مدارش قرار دارد.



Ω_0 — right ascension of ascending node
ω_0 — argument of perigee
i — inclination

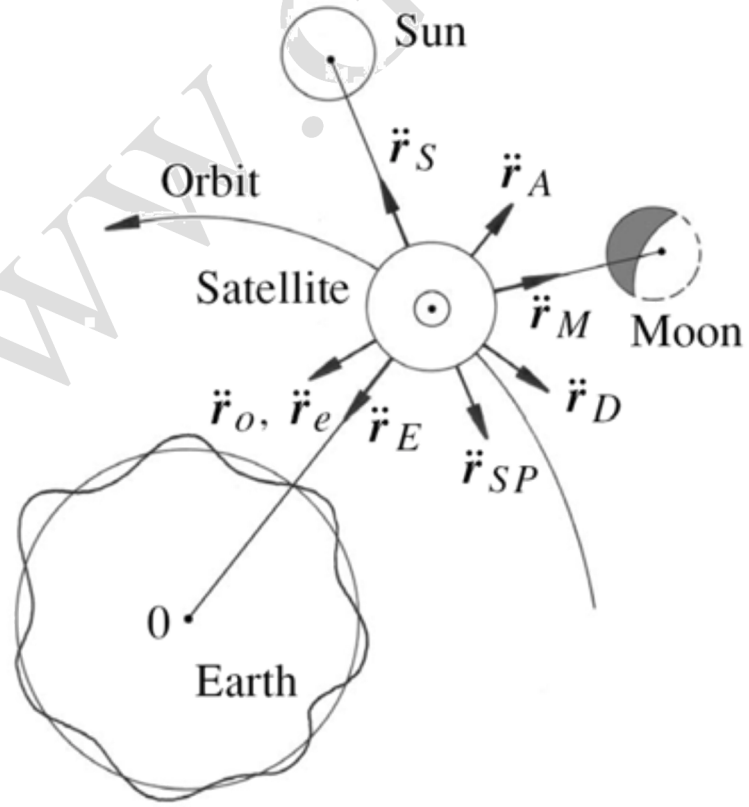


WWW.GeoGIS.ir

اغتشاش در مدار ماهواره

به علت وجود سایر نیروهای اثرگذار بر حرکت مداری ماهواره، هیچیک از پارامتر های کپلری مدار ماهواره ثابت نیستند. بنابراین برای محاسبه دقیق مختصات ماهواره باید نیروهای اعوجاج دهنده، در نظر گرفته شوند. نیروهای اعوجاج دهنده یا همان نیروهای اغتشاشی، نیروهایی هستند که سبب انحراف ماهواره از مسیر بیضی تعریف شده (طبق قانون کپلر) می‌شوند . اغتشاش در مدار به علت‌های گوناگونی رخ می‌دهد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به اغتشاش به علت غیر مرکزی بودن میدان جاذبه زمین و اغتشاش به علت تأثیر جاذبه خورشید بر روی ماهواره اشاره نمود. فشار تشعشعات خورشیدی و کشش ناشی از اصطکاک اتمسفر از دیگر نیروهای اغتشاشی به حساب می‌آیند. هر چه ارتفاع مدار ماهواره کمتر باشد اثر نیروهای اغتشاشی بر حرکت مداری ماهواره بیشتر است.

به عبارت بهتر به استثنای نیروی جاذبه زمین که ماهواره را به سمت زمین می‌کشد و نیروی ناشی از حرکت سریع ماهواره در فضا (که در لحظه پرتاب و قرار دادن ماهواره در مدار به آن اعمال شده) که در کنار هم سبب می‌شوند ماهواره در مداری مشخص به صورت دائم بر طبق قوانین کپلر به دور زمین بچرخد؛ نیروهایی وجود دارند که باعث می‌شود مدار ماهواره دقیقاً منطبق بر قوانین کپلر (مدار آرمانی ما) نباشد.



این نیروهای اغتشاشی را به طور کلی به دو بخش تقسیم‌بندی نموده‌اند:

۱) نیروهای جاذبی ۲) نیروهای غیرجاذبی

۱) نیروهای جاذبی[1]

الف ــ نیروی ناشی از غیر مرکزی بودن میدان جاذبه زمین

تحت تأثیر تغییر چگالی در نقاط مختلف

تحت تأثیر شکل غیر کروی زمین

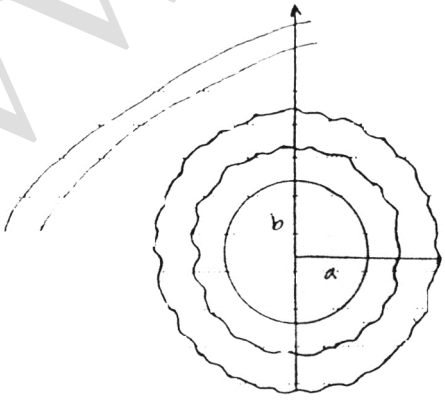
ب ــ اثر جسم سوم[2]

مقصود از اثر جسم سوم، تأثیر جاذبه دیگر اجرام آسمانی همچون خورشید، ماه، کره مریخ و ... می‌باشد.

جسم سوم به دو گونه می‌تواند تأثیرگذار باشد: الف: اثر مستقیم و ب) اثر غیر مستقیم

الف) اثر مستقیم: جاذبه خود جرم آسمانی (ماه، خورشید و ...) مستقیماً بر مدار ماهواره اثر می‌گذارد.

ب) اثر غیرمستقیم: جاذبه جرم آسمانی روی کره زمین تأثیر می‌گذارد و تغییر کره زمین سبب تغییر در شکل میدان جاذبه زمین شده و در نتیجه مدار ماهواره تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای مثال: جاذبه ماه و خورشید سبب جزر و مد (Tide) می‌شود و جزر و مد (Tide) سبب تغییر در خطوط هم پتانسیل کره زمین می‌گردد.

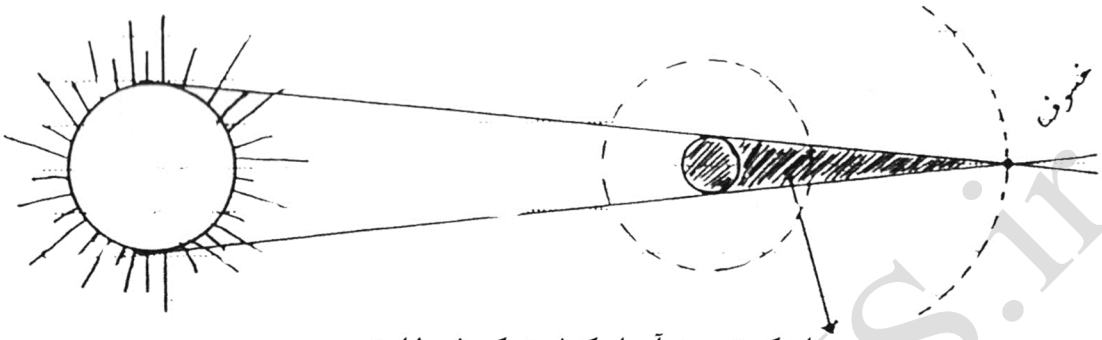


b < a

[1] Gravitational Forces
[2] Third Body Effect

۲) نیروهای غیرجاذبی[1]

۲-۱) اثر سایه (مقصود از اثر سایه این است که آیا ماهواره در سایه کره زمین قرار گرفته است یا نه)



سایه کره زمین در آسمان که شبیه یک مخروط است.

هرچه ماهواره به کره زمین نزدیک‌تر باشد (مدارات با ارتفاع پایین) احتمال اینکه در سایه کره زمین قرار بگیرد بیشتر است. از طرف دیگر، میل مدار ماهواره نیز تأثیر گذار است. ماهواره‌هایی که میل مدار آن‌ها نزدیک به ۹۰ درجه است، امکان دارد با توجه به موقعیت کره زمین قرار به ندرت در سایه کره زمین قرار بگیرند. رفتن به داخل سایه کره زمین، یعنی مصون شدن از تشعشعات خورشیدی و نیز پایین آمدن سریع دمای ماهواره.

۲-۲) فشار تشعشعات خورشیدی و رابطه آن با سطح مقطع ماهواره:

فشار تشعشعات خورشیدی ناشی از برخورد فوتون‌های نور خورشید روی بدنه ماهواره است. پارامترهای اصلی در محاسبه اثر این شتاب، سطح موثر ماهواره (سطح عمود بر امتداد تابش خورشید)، قابلیت انعکاس سطح، درخشش خورشید و فاصله ماهواره تا خورشید است. محاسبه سطح موثر ماهواره‌ها به دلیل پیچیدگی شکل آن‌ها کار دشواری است. با این وجود مدل‌های مختلفی برای برآورد آن و نهایتاً محاسبه فشار تشعشعات خورشیدی ارائه شده است. برای ماهواره‌هایی که در مناطق سایه قرار می‌گیرند، فشار تشعشعات خورشیدی صفر می‌شود. بنابراین در محاسبات دقیق با در نظر گرفتن موقعیت‌های نسبی خورشید، زمین و ماهواره لازم است منطقه ای که از آن به عنوان سایه زمین نام برده می‌شود به دقت تعیین شود.

به هر حال چنانچه نیاز به مدارات خیلی دقیق و به تبع آن تعیین موقعیت‌های خیلی دقیق باشد، باید تا حد امکان فشار تشعشعات خورشیدی را مدل‌سازی نمود.

[1] None –Gravitation Forces

هر چه طراحی ماهواره به گونه‌ای باشد که سطح مقطع آن کمتر باشد، آنگاه ماهواره کمتر تحت تأثیر فشار تشعشعات خورشیدی قرار می‌گیرد. برای ماهواره‌هایی که در ارتفاعات کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر پرتاب شده‌اند؛ کاهش سطح مقطع ماهواره مزیت دیگری نیز دارد و آن مزیت این است که سطح اصطکاک ماهواره با مولکول‌های موجود در اتمسفر کاهش می‌یابد.

۲-۳) جرم ماهواره:

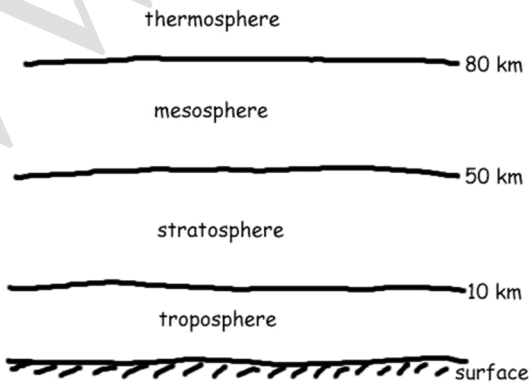
هرچه جرم ماهواره بیشتر باشد، کمتر تحت تأثیر تشعشعات خورشیدی و اصطکاک اتمسفری قرار می‌گیرد.

۲-۴) سرعت ماهواره

۲-۵) چگالی اتمسفر:

هر چه از سطح زمین بالاتر می‌رویم، چگالی اتمسفر کاهش می‌یابد تا جایی که می‌توان گفت چگالی اتمسفر از ارتفاع ۲۰۰ کیلومتری به بالا تقریباً به صفر می‌رسد. به همین دلیل پرتاب ماهواره‌ها به مداراتی با ارتفاع کمتر از ۲۰۰ کیلومتر به ندرت و فقط در صورت اجبار صورت می‌گیرد.

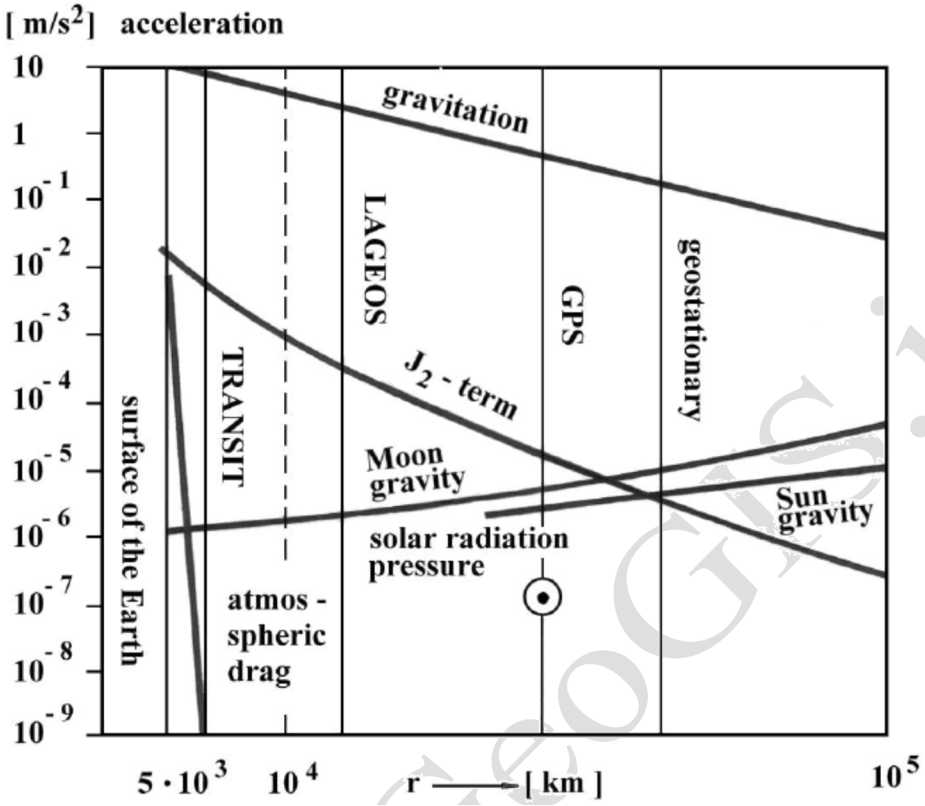
(حتی ماهواره‌های سنجش از دور که برای وضوح تصویر آن‌ها مجبور هستند که آن‌ها را در ارتفاعات پایین قرار دهند، باز هم چنین ماهواره‌هایی معمولاً در ارتفاعات ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر پرتاب می‌شوند)



اثرات نیروهای اغتشاشی بر روی مدارات ماهواره‌ها

اثر بعضی از نیروهای اغتشاشی بر روی حرکات مداری برخی از ماهواره‌ها بر حسب متر بر مجذور ثانیه در گراف زیر نمایش داده شده است. همان طور که در گراف پیداست، اثر نیروهای اغتشاشی مختلف بر حسب

ارتفاع مدار متغیر است. (در گراف زیر محور X نمایانگر ارتفاع مدار ماهواره بر حسب کیلومتر و محور Y نمایانگر تأثیر نیروی اغتشاشی مورد بحث بر مدار ماهواره بر حسب متر بر مجذور ثانیه است).



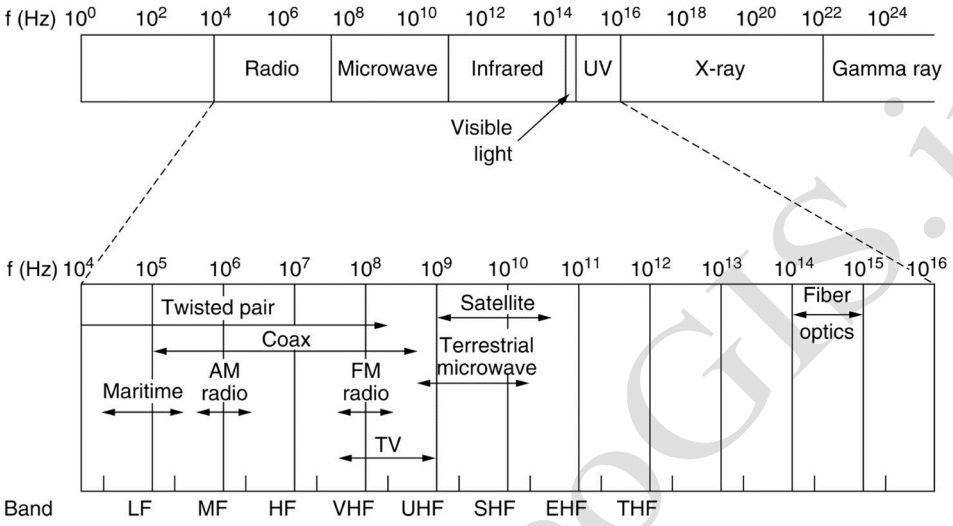
به عنوان مثال، ماهواره های LANDSAT و SPOT ، ماهواره های TRANSIT و ماهواره های ارتفاع سنجی نظیر GEOS- 3 و ERS-1/2 و SEASAT-1 که در ارتفاعات تقریباً 1000 کیلومتری بالای سطح زمین قرار گرفته‌اند.

ماهواره های فاصله یابی لیزری ماهواره ای مانند LAGEOS-1 و LAGEOS-2 در ارتفاع تقریباً ۶۰۰۰ کیلومتری سطح زمین قرار گرفته‌اند.

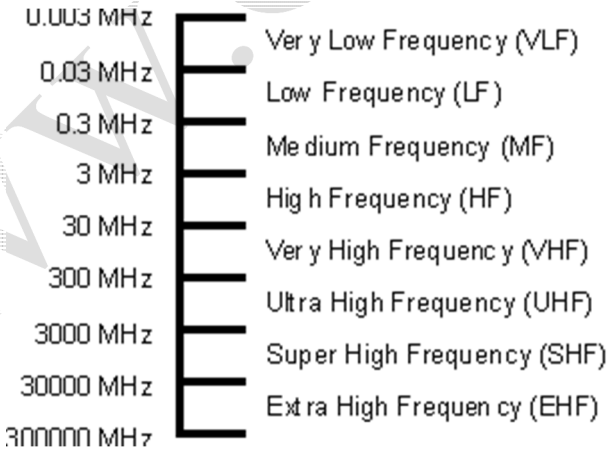
ماهواره های GPS و ماهواره های GLONASS نیز در ارتفاع تقریباً 20000 کیلومتری از سطح زمین قرار دارند. بنابراین اثر نیروهای اغتشاشی مختلف بر روی این دسته ماهواره‌ها متفاوت است و باید برای هرکدام به صورت جداگانه این اثرات محاسبه و اعمال شوند.

امواج ماهواره‌های GPS

جنس امواج ماهواره‌های GPS از جنس امواج الکترومغناطیس است. شکل زیر جایگاه امواج Microwave را در میان دیگر نواحی طیف امواج الکترومغناطیس نمایش می‌دهد:



شکل مقابل باندهای مختلف امواج مایکروویو و امواج رادیویی را نشان می‌دهد:



به امواجی که طول موجب بین ^{mm} ۱ تا ^{mm} ۱۰۰۰ دارند، امواج microwave می‌گویند. این امواج فرکانس‌هایی بین ^{GHZ} ۳۰۰ تا ^{GHZ} ۰.۳ دارند.

ماهواره های GPS امواج خود را در باند L ناحیه UHF امواج مایکروویو ارسال می‌دارند. یکی از دلایل اصلی ارسال امواج ماهواره‌های GPS (و نیز GLONASS و...) در باند L این است که چنین طول موج‌هایی هم به راحتی از لایه های گوناگون اتمسفر زمین عبور می‌کنند و هم طول موج آن‌ها، به قدر کافی کوچک است.

زیرا طول موج‌های کوچکتر دقت‌های بیشتری را در اندازه‌گیری‌ها به ارمغان می‌آورد.

(معمولاً و با تکنولوژی‌های فعلی به دقت‌های بهتر از ۰/۰۱ طول موج نمی‌توان دست یافت)

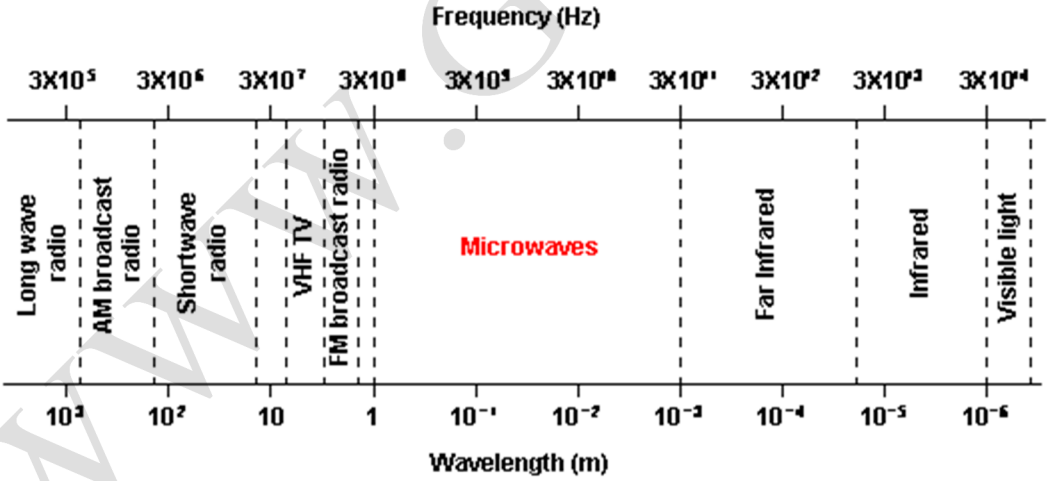
EHF $1\ ^{mm} \rightarrow 10\ ^{mm}$

SHF $10^{mm} \rightarrow 100\ ^{mm}$

UHF $100^{mm} \rightarrow 1000\ ^{mm}$ ← L باند $150\ ^{mm} \xrightarrow{\lambda} 300\ ^{mm}$

$1\ ^{GHz} < \text{Frequency} < 2\ ^{GHz}$

- اتمسفر اجازه عبور امواج EHF را نمی‌دهد.
- اتمسفر به بخشی از امواج SHF که فرکانس‌های پایین‌تر دارند اجازه عبور می‌دهد ولی به فرکانس‌های بالاتر SHF اجازه عبور نمی‌دهد.



Typical Frequencies		Approximate Band Designations	
AM broadcast band	535 - 1605 kHz	L-band	1 - 2 GHz
Shortwave radio	3 - 30 MHz	S-band	2 - 4 GHz
FM broadcast band	88 - 108 MHz	C-band	4 - 8 GHz
VHF TV (2-4)	54 - 72 MHz	X-band	8 - 12 GHz
VHF TV (5-6)	76 - 88 MHz	Ku-band	12 - 18 GHz
UHF TV (7-13)	174 - 216 MHz	K-band	18 - 26 GHz
UHF TV (14-83)	470 - 890 MHz	Ka-band	26 - 40 GHz
Microwave ovens	2.45 GHz	U-band	40 - 60 GHz

علل انتخاب باند L از ناحیه UHF برای ارسال سیگنال‌های ماهواره‌های GPS به شرح زیر است:

۱) برای رسیدن به دقت‌های مورد نظر در تعیین موقعیت و نیز رسیدن به دقت در حدود (ثانیه/cm) برای سرعت احتیاج به طول موج‌های در محدوده باند (^{mm}۱۵۰ تا ^{mm}۳۰۰) داریم.

قبلاً گفته شده که با تکنولوژی‌های کنونی به دقتی در حدود 0.01 طول موج در بهترین شرایط می‌توان دست یافت.

۲) امواج ماهواره‌های GPS در مسیر خود از ماهواره تا گیرنده (روی سطح زمین) از لایه‌های گوناگون اتمسفر از جمله یونسفر عبور می‌کنند.

هرچه فرکانس امواج بالاتر باشد، تأثیر سوء لایه یونسفر بر روی این امواج کمتر است. (لایه یونسفر سبب می‌شود که امواج الکترومغناطیس سرعتی نامساوی با سرعت نور داشته باشند)

۳) از طرف دیگر نمی‌توانیم فرکانس امواج GPS را خیلی بالا ببریم چون اتمسفر امواج با فرکانس خیلی بالا همچون امواج EHF را به طور کلی جذب یا پراکنده می‌کند؛ اتمسفر حتی امواج SHF با فرکانس بالا را نیز به شدت جذب یا پراکنده می‌کند.

جمع بندی:

در مجموع می‌توان گفت : باند L، یک باند بهینه برای ارسال امواج GPS است.

$$\text{باند L} \begin{cases} 150\ ^{mm} < \lambda < 300\ ^{mm} \\ 1\ ^{GHZ} < f < 2\ ^{GHZ} \end{cases}$$

ماهواره‌های GPS سیگنال‌های خود را در دو فرکانس موسوم به L1 و L2 در باند L ارسال می‌دارند که عبارتند از:

L_1: $f_1 = 1.57542$ GHZ $\quad (\lambda_1 \approx 19.04^{cm})$

L_2: $f_2 = 1.22760$ GHZ $\quad (\lambda_2 \approx 24.44^{cm})$

گیرنده‌های تک فرکانسه صرفاً L1 را دریافت می‌کنند. (مقصود گیرنده‌های تک فرکانسه رایج در سال‌های اخیر)

گیرنده‌های دو فرکانسه هم L1 و هم L2 را دریافت می‌کنند.

تقسیم بندی گیرنده های موجود:

۱) **گیرنده‌های نظامی:** توانایی رمزگشایی از P-Code را دارند.

۲) **گیرنده‌های عمرانی**(Civil): توانایی رمزگشایی از P-Code را ندارند.

گیرنده های نظامی، صرفاً در اختیار نیروهای نظامی ارتش آمریکا و متحدین نظامی آمریکاست.

در ادامه بحث به تشریح انواع گیرنده های عمرانی خواهیم پرداخت.

گیرنده های عمرانی موجود در بازار را به دو دسته اصلی می‌توان تقسیم بندی نمود:

الف) گیرنده های دستی (ساده) که تقریباً همگی تک فرکانسه هستند. گیرنده های دستی توانایی اندازه گیری فاز موج حامل را ندارند. در نتیجه این نوع از گیرنده‌ها با استفاده از مشاهده شبه فاصله (C/A-Code) موقعیت مکانی که در آن قرار گرفته‌اند (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع) را تعیین می‌کنند. انواع گوناگونی از این نوع گیرنده‌ها هم اکنون در بازار موجود است. امروزه بسیاری از گوشی‌های تلفن همراه نیز مجهز به این نوع گیرنده‌ها شده‌اند. کاربردهای این نوع از گیرنده‌ها به شدت و با سرعت رو به افزایش است. گرچه دقت این نوع از گیرنده‌ها نه به دقت گیرنده های ژئودتیک می‌رسد و نه به دقت گیرنده های نظامی ولی با این وجود کاربردهای گوناگونی دارند.

از این گیرنده‌ها می‌توان برای تعیین موقعیت مطلق نقاط با دقت مسطحاتی در حدود ۵ متر بهره برد. این گیرنده‌ها علاوه بر اینکه قادرند موقعیت مکانی که در آن قرار گرفته‌اند (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع) را تعیین می‌کنند به سادگی می‌توانند سرعت وسیله نقلیه و جهت حرکت آن را محاسبه و نشان دهند. امکانات دیگری نیز در انواع مختلف گیرنده های دستی (ساده) برای راحتی استفاده کنندگان از آن‌ها فراهم دیده شده است. که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) محاسبه مساحت اراضی
۲) دسترسی به زمان دقیق
۳) راهنمایی کاربر برای رسیدن به مقصد در صورت معرفی مختصات مقصد به گیرنده
۴) تخمین زمان مورد نیاز جهت رسیدن به مقصد، در صورت معرفی مختصات مقصد به گیرنده
۵) نشان دادن مسیر حرکت کاربر و فاصله کاربر تا مقصد
۶) برداشت مختصات نقاط مسیر با دقت مسطحاتی ۵ متر و در نتیجه امکان محاسبه مسافت پیموده شده و سرعت متوسط و نیز سرعت لحظه ای
۷) محاسبه ساعت طلوع و غروب خورشید برای مکانی که کاربر در آن واقع است.

ب) گیرنده های ژئودتیک (گیرنده های حرفه ای) : که می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم بندی نمود:

- تک فرکانسه (Single Frequency)
- دو فرکانسه (Dual Frequency)

*** نکته:**

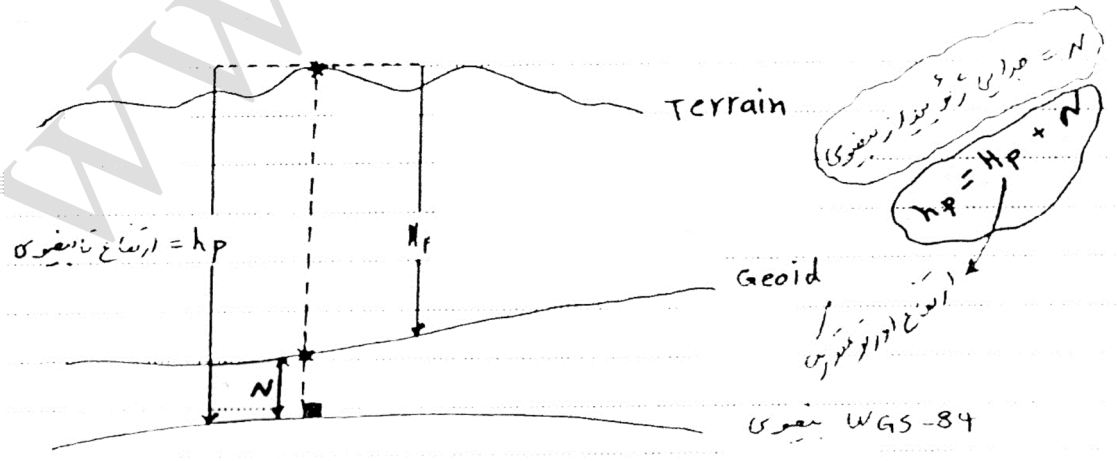
گیرنده‌های حرفه‌ای (Geodetic) حتماً با خود یک آنتن External دارند. ضمناً این نوع گیرنده‌ها حتماً قادرند که فاز موج حامل (Carrier phase) را نیز اندازه‌گیری کنند؛ لذا گیرنده های حرفه ای علاوه بر آنکه کلیه قابلیت‌های یک گیرنده دستی (ساده) را دارند به لحاظ دقت به مراتب دقیق‌تر از گیرنده های دستی (ساده) می‌باشند.

گیرنده های دو فرکانسه پیشرفته تر، دقیق‌تر و در نتیجه گران‌بها تر از گیرنده های تک فرکانسه حرفه ای هستند.

گیرنده های دو فرکانسه مجهز به رادیو مودم (Radio Modem) . قابلیت ویژه ای به نام RTK دارند.

RTK= Real Time Kinematic

به این مفهوم که قادرند به صورت Real Time (آنی) موقعیت نقاط را با دقت در حد چند cm پیاده کنند. (البته در صورت استفاده دیفرانسیلی (تفاضلی))



گیرنده‌های ۳ فرکانسه موجود بازار علاوه بر دریافت فرکانس‌های L1 و L2 ماهواره‌های GPS از ماهواره‌های روسیه GLONASS نیز یک فرکانس دریافت می‌کنند و لذا گیرنده‌های سه فرکانسه نام گرفته‌اند.

بر روی امواج L1 و L2 سوار شده‌اند:
- P-code
- C/A – code
- و پیغام ناوبری (Navigation message)

ساختار سیگنال‌های GPS

فرکانس مبنا	$\lambda_0 = 29.3^m$	$f_0 = 10.23^{MHZ}$
موج حامل L1	$\lambda_{L1} = 19.04^{cm}$	$154 f_0 = 1.57542^{GHZ}$
موج حامل L2	$\lambda_{L2} = 24.44cm$	$120 f_0 = 1.22760^{GHZ}$
C/A-code	$\lambda_{C/A} = 293^m$	$\frac{f_0}{10} = 1.023^{MHZ}$
P-code	$\lambda_p = 29.3^m$	$f_0 = 10.23^{MHZ}$
پیغام ناوبری	۳۰ ثانیه طول می‌کشد تا پیغام ناوبری به طور کامل دریافت شود. $30 \times 50 = 1500\ bits$	$\frac{f_0}{204600} = 50 \frac{bits}{\sec}$

*** نکته:**

C/A-code فقط روی L1 سوار شده در حالی که **P-code هم روی L1 و هم روی L2** سوار شده است.

پرسش: برای تعیین موقعیت دیفرانسیلی (که هدف از آن تعیین موقعیت با دقت بالاست (در حد چند میلیمتر))؛ از کدامیک از انواع مشاهدات (C/A-Code یا P-code یا فاز موج حامل) باید استفاده نمود؟

پاسخ: چون با تکنولوژی‌های کنونی، دقت تعیین موقعیت نهایی در بهترین شرایط (حداقل خطاهای اتمسفری و تعداد زیاد ماهواره های قابل دسترس و آرایش هندسی خوب ماهواره‌ها در فضا) به حدود یک صدم طول موج نیز $(0.01 \times \lambda)$ می‌تواند برسد، لذا:

	طول موج	طول موج × ۰.۰۱
C/A – code	293 m	2.93 m
P- code	29.3 m	0.29 m
فاز موج حامل L1	19.04cm	1.9 mm

بنابراین تعیین موقعیت با استفاده از فاز موج حامل دقت بهتری را برای ما به می‌تواند به ارمغان آورد. دقتی در حدود $2\ ^{mm}$ بنابراین برای رسیدن به دقت‌های بالا، چاره ای نیست جز **اندازه گیری فاز موج حامل**.

WWW.GeoGIS.ir

فصل هشتم

انواع خطاهای مهم موجود در عملیات با استفاده از گیرنده GPS

۱) خطای ساعت گیرنده
۲) خطای ساعت ماهواره (همزمانی ساعت ماهواره‌ها و نیز دقت ساعت‌های داخل ماهواره)

شایان ذکر است در حال حاضر در هر یک از ماهواره های GPS حداقل دو و حداکثر چهار ساعت اتمی وجود دارد که بسیار بسیار دقیق هستند. علاوه بر این‌ها، یکی از مهمترین وظایف ایستگاه‌های کنترل زمینی، همزمان نمودن ساعت‌های اتمی تمامی ماهواره‌های GPS با همدیگر و با ساعت اتمی جهانی است.

۳) خطای مداری (ماهواره از مدار پیش‌بینی شده‌اش همواره فاصله کمی دارد) همین فاصله کم، در تعیین موقعیت ما خطا ایجاد می‌کند. این خطا اصطلاحاً خطای مداری نامیده می‌شود.

آلمانک (برنامه زمانی حرکت ماهواره‌ها در فضا به صورت تقریبی)

افمریز پیش بینی شده: حاوی اطلاعات نسبتاً دقیق در خصوص مدار ماهواره‌هاست. این اطلاعات همان اطلاعاتی است که از طریق ایستگاه‌های کنترل زمینی به ماهواره‌ها تزریق شده است.

افمریز دقیق مبتنی بر مشاهده مدار حقیقی ماهواره است یعنی باید منتظر ماند تا ماهواره به حرکت خود ادامه دهد و فاصله آن تا مدار پیش بینی شده توسط ایستگاه‌های کنترل زمینی به دقت محاسبه می‌شود. مقادیر افمریز دقیق به صورت real time قابل دسترسی نیست بلکه باید منتظر نتایج محاسبات و آنالیزهای ایستگاه‌های کنترل زمینی بمانیم تا آن‌ها نتایج محاسبات خود را بر روی صفحات وب در اختیار عموم قرار دهند.

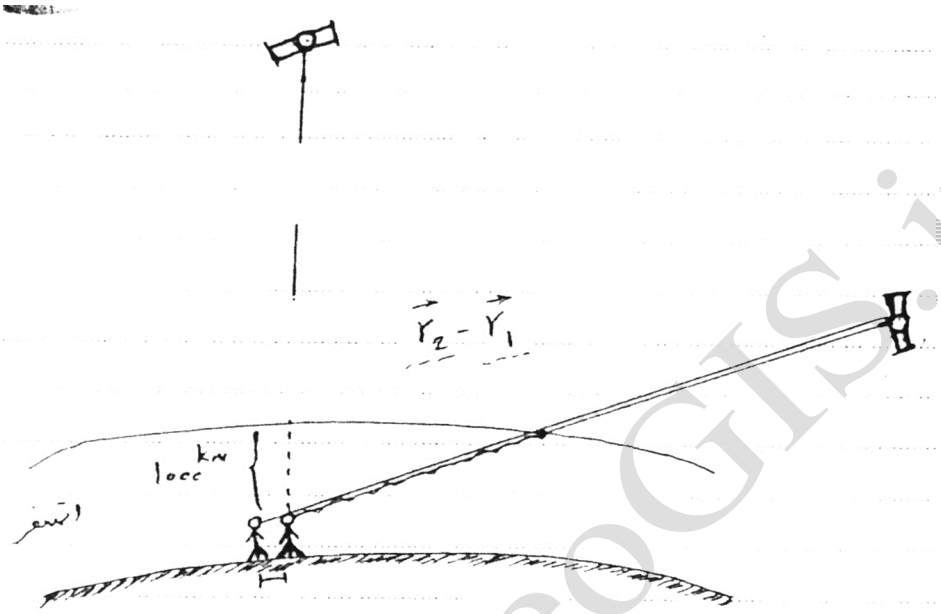
خطاهای ناشی از اتمسفر

- ناشی از یونسفر (فرض شده که یونسفر به لایه ای از جو گفته می‌شود که از ارتفاع ۵۰km تا ۱۰۰۰km می‌باشد)
- ناشی از تروپوسفر (فرض شده که تروپوسفر به لایه ای از جو گفته می‌شود که از سطح زمین تا ارتفاع ۵۰km می‌باشد)

ویژگی‌های خطای یونسفر:

اولاً: خطای یونسفر از خطای تروپوسفر بزرگ‌تر است و برخلاف تروپوسفر، مقدار آن در حدی نیست که بتوان از آن چشم پوشی کرد.

ثانیاً: ماکزیمم خطای یونسفری برای ماهواره‌ای در زنیت به حداکثر ۵۰ متر می‌رسد در حالی که ماکزیمم خطای یونسفری برای ماهواره‌ای در افق به ۱۵۰ متر هم می‌رسد. (شایان ذکر است جهت خطای یونسفری دارای این ویژگی است که شبه فاصله را دارای سرعتی کمتر و فاز موج حامل را دارای تقدم فاز می‌کند)



ثالثاً: مقدار این خطا در هنگام روز به پنج برابر آن در نیمه شب می‌رسد.

رابعاً: در ماه نوامبر به چهار برابر ماه **جولای** می‌رسد. (جولای ماه هفتم سال میلادی و نوامبر=ماه یازدهم سال میلادی)

خامساً: در ماکزیمم فعالیت خورشیدی به چهار برابر حالت مینیمم خود می‌رسد. (ماکزیمم فعالیت خورشیدی دارای دوره تناوب ۱۱ سال است)

معمولاً هنگامی که خورشید در اوج فعالیت خود قرار می‌گیرد توصیه می‌شود که عملیات تعیین موقعیت دقیق نقاط به زمان دیگری موکول شود.

به طور کلی می‌توان گفته که مقدار این خطا برای یک ماهواره می‌تواند از حداقل ۵ متر تا حداکثر ۱۵۰ متر متفاوت باشد.

۱۵۰m: برای ماهواره‌ای در Horizon در هنگام ظهر در ماه نوامبر در ماکزیمم فعالیت خورشیدی.

۵ m: برای ماهواره‌ای در Zenith در نیمه شب در ماه جولای در مینیمم فعالیت خورشیدی.

لایه یونسفر حاوی الکترون‌های آزاد است که بر روی سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس تأثیر سوئی می‌گذارد. بنابراین سیگنال‌های GPS در حین عبور از لایه یونسفر دچار ضایعه می‌شوند به علت تغییر ضریب انکسار محیط، مشاهدات شبه فاصله دارای سرعت کمتر و مشاهدات فاز موج حامل دارای سرعت‌های بیشتری می‌شوند بنابراین تصحیح‌های مربوط به خطای یونسفری (بایاس یونسفری) برای مشاهدات شبه

فاصله و فاز موج حامل دارای علامت‌های مخالف می‌باشد. به هر صورت خطای یونسفری متناسب است با تعداد الکترون‌های آزاد موجود در مسیر عبور سیگنال و این تعداد از الکترون‌ها به عواملی همچون میزان تابش خورشید و فعالیت‌های مغناطیسی خورشید و نیز زاویه ارتفاعی ماهواره بستگی دارد.

روش‌های گوناگون برخورد با خطای یونسفر:

الف) استفاده از روش‌های تفاضلی (دیفرانسیلی)

ب) استفاده از گیرنده های دو فرکانسه

ج) استفاده از مدل‌های جهانی یونسفر

د) استفاده از مدل‌های محلی یونسفر

خطای تروپوسفری:

انتشار سیگنال GPS در تروپوسفر مستقل از فرکانس آن می‌باشد. در نتیجه تأخیر تروپوسفری روی هر دو موج حامل (L1 & L2) و نیز بر روی فاز موج حامل و شبه فاصله تأثیر یکسان دارد.

انکسار در محیط تروپوسفر را می‌توان بیشتر با شرایط جوی مرتبط دانست از طرف دیگر می‌توان با اندازه‌گیری دقیق پارامترهای جوی این خطا را حتی تا حد 99.8 درصد برآورد نمود.

میزان این خطا برای یک ماهواره در زنیت حداکثر به ۲.۳ متر خواهد رسید؛ در حالی که برای یک ماهواره در افق این خطا به ۲۰ متر هم می‌رسد. با استفاده از گیرنده‌های دو فرکانسه نمی‌توان خطای (بایاس) تروپوسفری را حذف نمود زیرا همچنان که قبلاً گفته شد، **خطای (بایاس) تروپوسفری مستقل از میزان فرکانس است.**

راه‌های مقابله با خطای تروپوسفری:

۱) استفاده از روش‌های تفاضلی (دیفرانسیلی)
۲) استفاده از مدل‌های محلی انکسار
۳) استفاده از مدل‌های جهانی انکسار

به هر حال باید توجه داشت که خطای تروپوسفری به مراتب کوچکتر از خطای یونسفری است.

خطای SA (در گذشته وجود داشت) :

این خطا تا روز اول ماه May سال ۲۰۰۰ میلادی وجود داشت:

خطای SA یک خطای عمومی بود که سبب می‌شود دقت تعیین موقعیت Real time برای اندازه‌گیری‌های civil تضعیف شود. این خطا سبب می‌شد که دقت تعیین موقعیت مسطحاتی گیرنده‌های GPS تا ±۱۰۰ متر و دقت تعیین موقعیت ارتفاعی گیرنده های GPS تا ±۱۵۶ متر برسد.

این خطا به سادگی با روش‌های دیفرانسیلی قابل حذف بود لذا این خطا تأثیری در تعیین موقعیت دقیق ژئودتیکی (با استفاده از پس پردازش فاز موج حامل) نمی‌گذاشت.

خطای چند مسیری[1]

خطای چند مسیری عبارتست از دریافت سیگنال‌های GPS توسط گیرنده از یک مسیر غیرمستقیم به واسطه انعکاس سیگنال از روی اشیاء و سطوح منعکس کننده اطراف آنتن. این خطا هم بر روی مشاهده شبه فاصله اثر می‌گذارد و هم بر روی مشاهده فاز موج حامل.

مقدار این خطا برای مشاهده فاز موج حامل خیلی کمتر از مقدار همین خطا بر روی مشاهده شبه فاصله است.

مقدار این خطا برای C/A – code حدود ۲۹۳ متر (حداکثر) و برای P-Code حداکثر ۲۹.۳ متر می‌باشد.

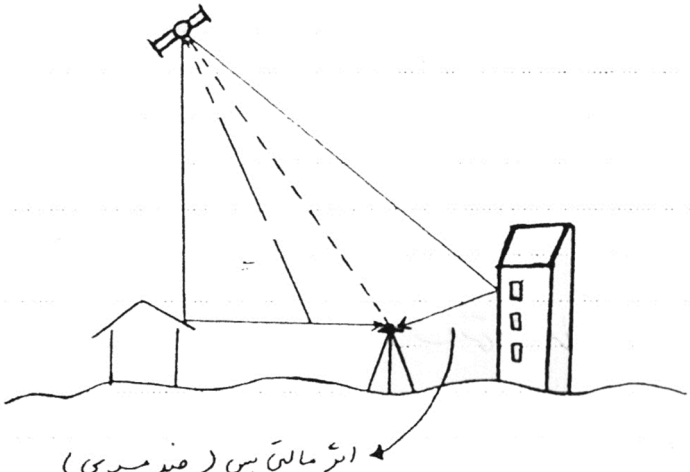
در حالی که برای فاز موج حامل (Carrier- phase) این خطا در حد ۵cm می‌باشد.

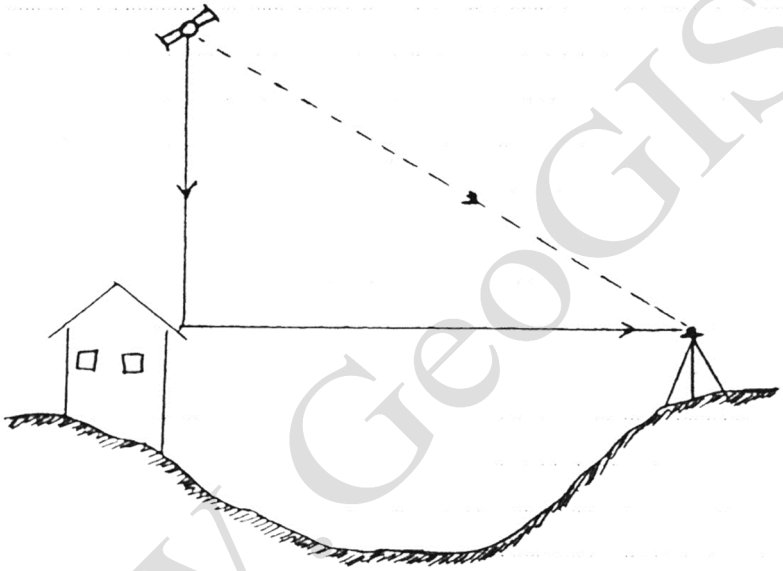
اثر چند مسیری در مکان‌هایی قابل توجه است که موانع انعکاس دهنده و سطوح تخت مانند دیوار ساختمان‌ها و یا شیروانی ساختمان‌ها زیاد باشد.

در نقشه برداری به صورت استاتیک خطای چند مسیری در محیط‌های با انعکاس بالا باعث کاهش دقت اندازه‌گیری شبه فاصله تا حد ۱۰ متر و کاهش دقت اندازه‌گیری فاز موج حامل در حد چند سانتی‌متر می‌شود.

در کاربردهای کینماتیک به واسطه سطوح نویز بیشتر، این خطا حتی می‌تواند باعث قطع ارتباط گردد.

[1] Multi- path





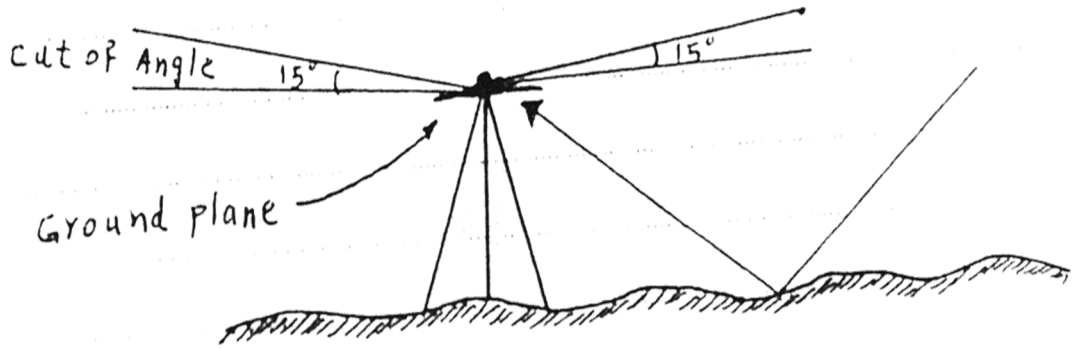
چند روش رایج برای مقابله با خطای چند مسیری

(۱) از آنجایی که خطای چند مسیری به صورت روزانه برای جفت آنتن و ماهواره در همان مکان دوباره تکرار می‌شود، به عبارت دیگر همبستگی روزانه وجود دارد لذا با بررسی همبستگی روزانه باقیمانده‌ها می‌توان به این خطا پی برد.

(۲) انتخاب دقیق و محتاطانه نوع آنتن ← برای مثال آنتن‌های Choke-Ring که طوری طراحی شده‌اند که در مقابل خطای multi-path مقاوم باشند.

(۳) استفاده از صفاتی مشهور به Ground plane که بر روی سه پایه و زیر آنتن نصب می‌شوند.

Ground plane : صفحه زمینی



(۴) زاویه cut of angle مناسب (زاویه ارتفاعی مناسب (Elevation Angle

(Mask Angle)

از جمله زوایای رایج برای cut of angle زوایای ۱۰ تا ۱۵ درجه می‌باشد. یعنی ماهواره‌هایی که ارتفاع آن‌ها از ۱۰ یا ۱۵ درجه کمتر است را نمی‌خواهیم.

(۵) متوسط گیری زمانی روی یک فاصله زمانی بزرگ

(۶) ترکیب مشاهدات فاز و کد که میزان خطای چند مسیری مشاهدات کد را کاهش می‌دهد.

(۷) انتخاب محلی مناسب برای استقرار آنتن.

خطای جهش فاز[1]

جهش فاز یا Cycle slip اکثراً در نتیجه وجود مانع بین گیرنده و ماهواره به وجود می‌آید به طور کلی وقتی ارتباط بین گیرنده و ماهواره قطع می‌شود اندازه‌گیری هم انجام نشده و لذا در اندازه‌گیری فاز موج حامل عدد ابهام فاز از دست خواهد رفت پس از گذشت مدتی که سیگنال ماهواره مجدداً توسط گیرنده دریافت می‌شود اندازه‌گیری فاز نیز شروع خواهد شد و در این حالت مقدار ابهام فاز مانند شروع اندازه‌گیری مجهول است و باید تعیین گردد.

علت‌های اساسی قطع ارتباط (بروز جهش فاز) عبارتند از:

الف – وجود مانع بین گیرنده و ماهواره

ب – شتاب ناگهانی گیرنده

ج – خرابی نرم افزار گیرنده

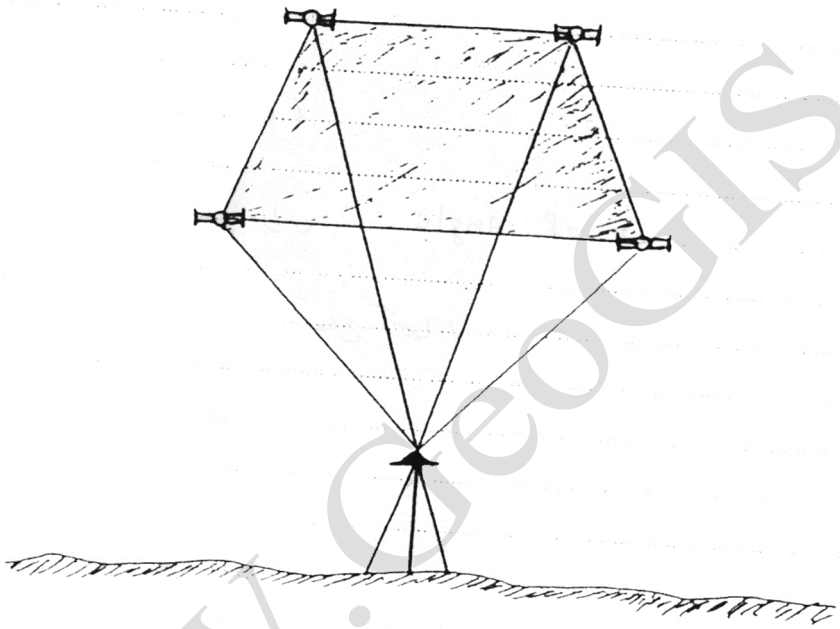
[1] Cycle slip

علاوه بر موارد فوق گاهی اختلالات یونسفریکی، پدیده چند مسیری، تداخل سیگنال ماهواره با سیگنال‌های دیگر و ... باعث ایجاد جهش در فاز می‌شود. به هر صورت جهش فاز ناشی از قطع ارتباط گیرنده با ماهواره است.

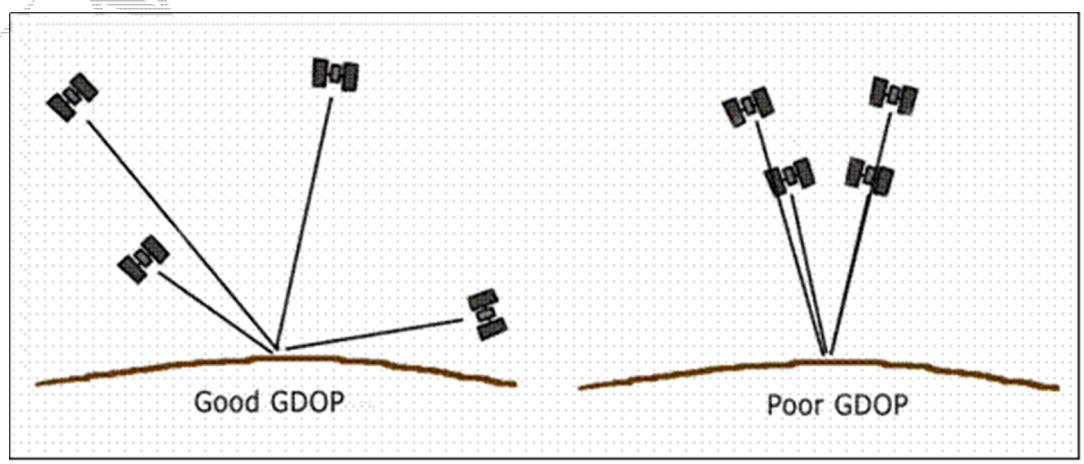
DOP

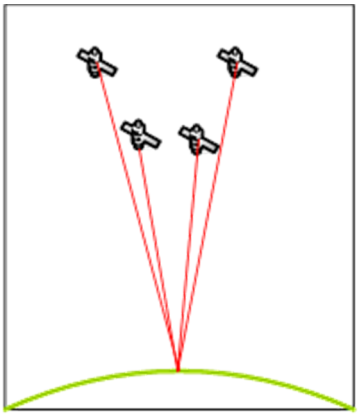
آرایش هندسی ماهواره‌ها در فضا یعنی نحوه قرار گرفتن ماهواره‌ها در فضا نسبت به گیرنده در دقت تعیین موقعیت نقطه بسیار تأثیرگذار است. DOP معیاری است نمایانگر وضعیت آرایش هندسی ماهواره‌ها در فضا.

$$DOP \propto \frac{1}{\text{حجم هرم}}$$

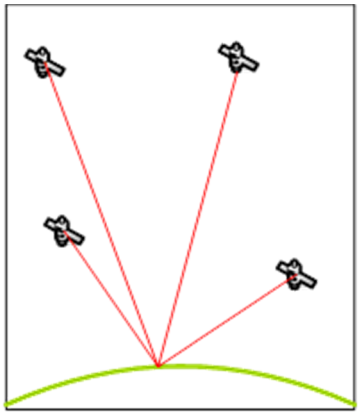


هر چه حجم هرم بزرگ‌تر، آنگاه عدد DOP کوچکتر می‌شود و دقت تعیین موقعیت بهبود می‌یابد. پس ما دنبال DOP کوچک هستیم. DOP کمتر از عدد شش داپ نسبتاً خوبی است. امروزه به دلیل تعداد زیاد ماهواره‌های GPS، در حال حاضر در اکثر اوقات، عدد DOP در محدوده ایران خوشبختانه از عدد ۳ نیز کوچکتر است.

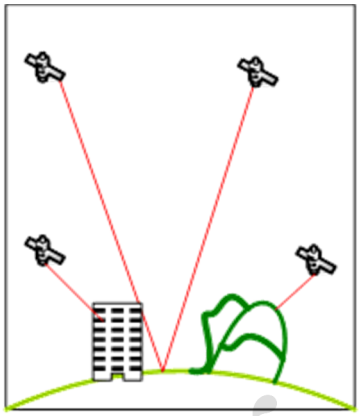




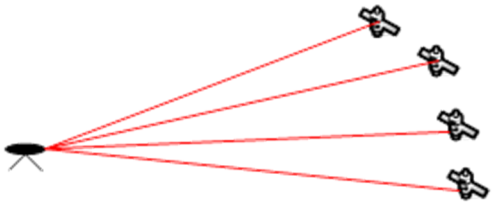
Poor GDOP



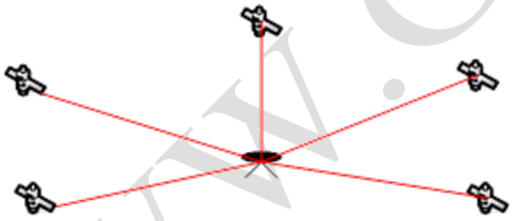
Good GDOP



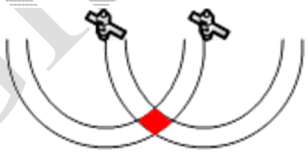
Good GDOP –
Bad Visibility



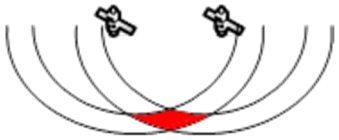
Poor GDOP



Good GDOP



Well spaced satellites- low
uncertainty of position



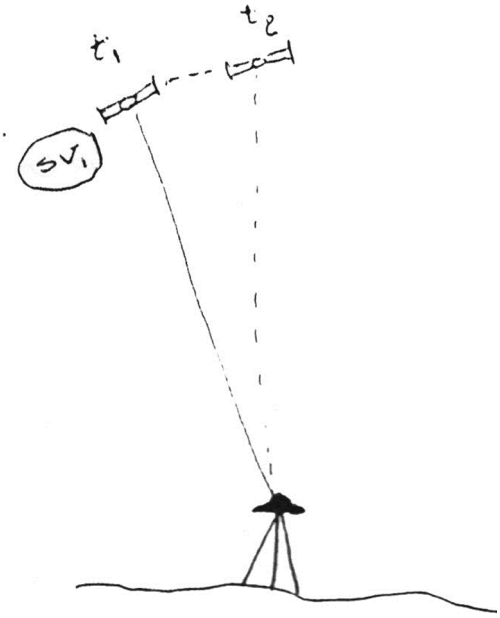
Poorly spaced satellites –
high uncertainty of position

Geometry in 2-D (GPS Basics, 2000)

WWW.GeoGIS.ir

فصل دهم

انواع اندازه‌گیری‌های تفاضلی (دیفرانسیلی)



۱– تفاضلی یگانه بین اپکها (بین دو لحظه) صرفاً با یک گیرنده GPS

مهمترین مزیت تفاضلی یگانه بین اپکها عاری بودن از خطای ابهام فاز می‌باشد.

از دیگر مزایای آن می‌توان به کاهش خطاهای مداری و اتمسفری اشاره کرد.

تفاضلی یگانه بین اپکها شیوه خوبی برای کشف Cycle Slip می‌باشد. مهمترین عیب این روش این است که استحکام هندسی خوبی ندارد زیرا معادلات و مشاهدات آن منتهی به LOP ها و SOPهای هذلولی می‌شوند.

۲– تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها:

مزایا: ۱) حذف خطای ساعت ماهواره

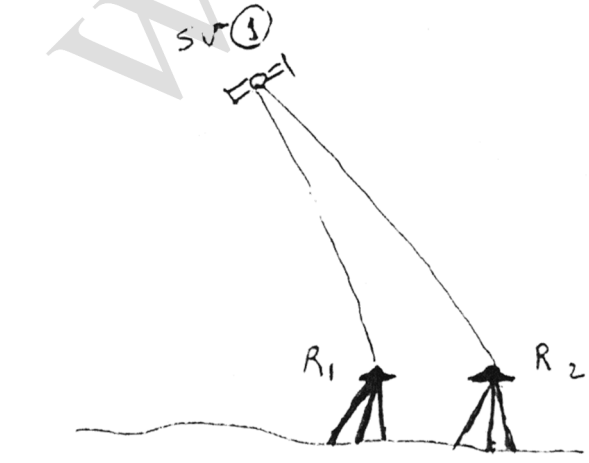
۲) کاهش خطاهای مداری و خطاهای اتمسفری (هرچه فاصله بین دو گیرنده کمتر باشد، میزان کاهش خطاهای مذکور بیشتر است)

معایب:

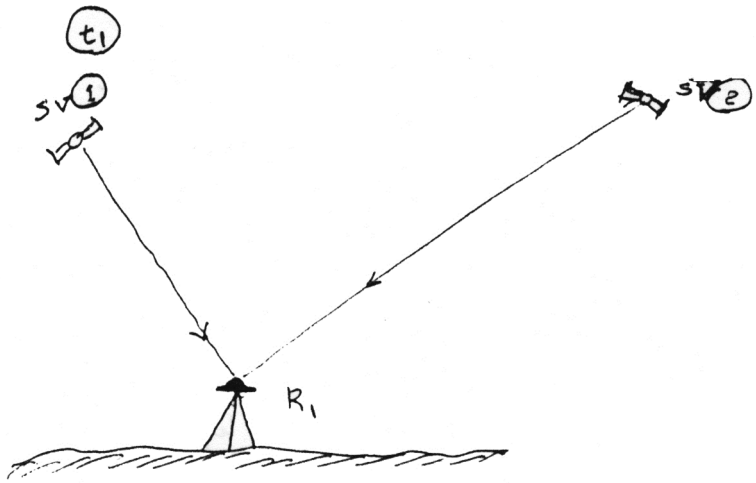
۱) cycle slip به راحتی قابل تشخیص نیست.

۲) پیدا کردن عدد ابهام فاز بسیار دشوار است.

۳) خطای ساعت گیرنده حذف نمی‌شود.



۳– تفاضلی یگانه بین ماهواره‌ها (یک گیرنده و دو ماهواره در یک لحظه)



مزایا:

۱) حذف خطای ساعت گیرنده

۲) کاهش خطای مداری و اتمسفری (در صورتی که ماهواره‌ها به هم نزدیک‌تر باشند میزان کاهش خطاها بیشتر است)

معایب:

۱) سخت بودن پیدا کردن عدد ابهام فاز (N)

۲) عدم حذف خطای ساعت ماهواره

۴– تفاضلی دوگانه گیرنده ــ زمان

این روش بر اساس مشاهده از دو ایستگاه به یک ماهواره در طول یک بازه زمانی استوار است.

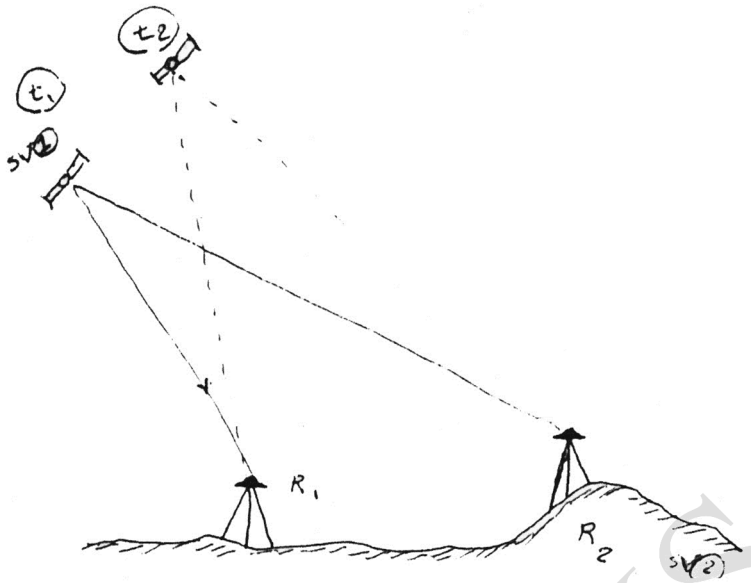
مزایای آن عبارتند از:

الف ـ حذف خطای ابهام فاز

ب ـ حذف خطای ساعت ماهواره

ج ـ کاهش خطاهای مداری و اتمسفری (هرچه طول خط مبنا و طول بازه زمانی کوتاه‌تر باشد، کاهش خطاهای مداری و اتمسفری بیشتر خواهد شد)

عیب اصلی این روش این است که این روش استحکام هندسی خوبی ندارد زیرا LOP و SOP در آن هذلولی است.



۵– تفاضلی دوگانه ماهواره ـ زمان

این روش مبتنی است بر مشاهده توسط یک گیرنده به دو ماهواره

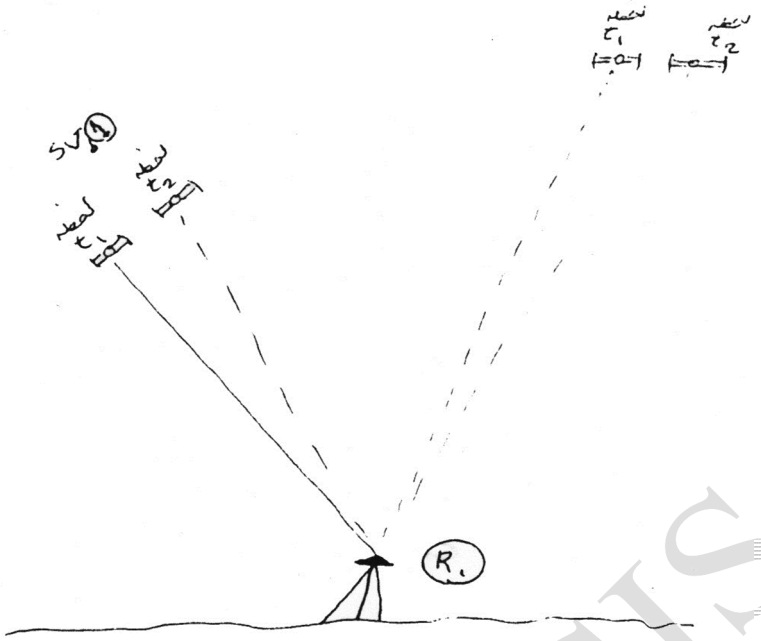
در بازه زمانی از t1 تا t2 :

مزایای این روش عبارتند از:

۱) حذف خطای ساعت گیرنده

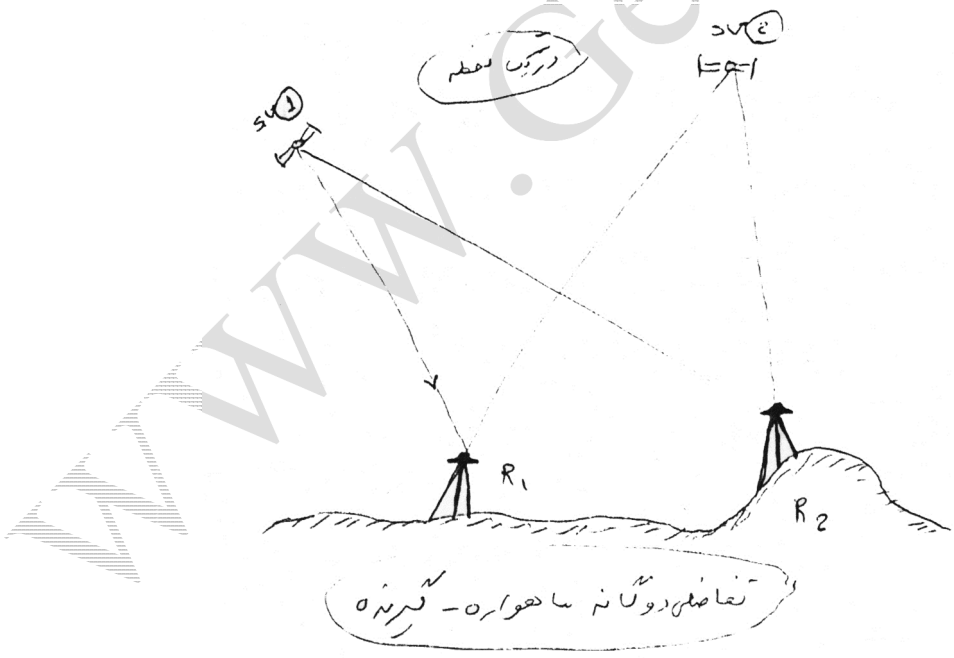
۲) حذف عدد ابهام فاز (البته در مشاهده فاز موج حامل)

۳) کاهش خطای مداری و اتمسفری (بدیهی است که هرچه ماهواره‌ها به هم نزدیک‌تر باشد و بازه زمانی مشاهداتی نیز کوتاه‌تر باشد، کاهش خطاها بیشتر است)



عیب این روش این است که استحکام هندسی خوبی ندارد زیرا LOP و SOP در این روش هذلولی می‌شود.

۶ – تفاضلی دوگانه ماهواره و گیرنده



مزایا:

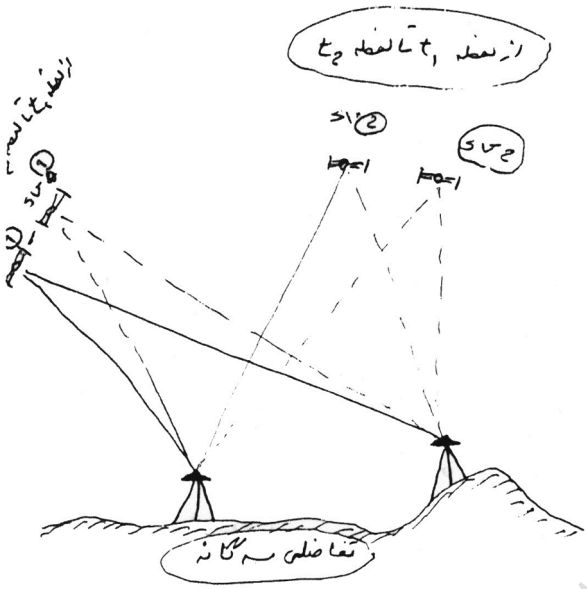
۱) حذف خطای ساعت گیرنده

۲) حذف خطای ساعت ماهواره

۳) کاهش خطاهای مداری و اتمسفری

۴) استحکام هندسی مناسب (LOP و SOP در این روش دایروی است)

عیب این روش این است که کشف cycle slip ها از آن مشکل و به دست آوردن عدد ابهام فاز نیز به این سادگی فراهم نیست.



۷ – تفاضلی سه‌گانه (گیرنده – ماهواره – زمان)

این روش در حقیقت تلفیقی است از سه روش تفاضلی یگانه

مزایا:

۱) حذف خطای ساعت گیرنده

۲) کاهش خطاهای ساعت ماهواره

۳) کاهش خطاهای مداری و اتمسفری

۴) حذف خطای ابهام فاز

۵) این روش برای برآورد مختصات اولیه و نیز کشف cycle slip بهترین روش است.

عیب این روش این است که استحکام هندسی خوبی ندارد زیرا LOP و SOP آن به صورت هذلولی است.

فصل یازدهم

مقایسه بین GPS (آمریکا) و GLONASS (روسیه)

بر طبق طراحی اولیه هر دو سیستم می‌بایست حداقل شامل ۲۴ ماهواره باشند ولی در حال حاضر GPS شامل ۳۲ ماهواره و GLONASS دارای ۲۹ ماهواره در فضا می‌باشد. (مارس ۲۰۱۴). از ۳۲ ماهواره GPS، ۲۸ ماهواره فعال است، در حالی که از ۲۹ ماهواره GLONASS، ۲۴ ماهواره فعال است. ماهواره‌های GPS آمریکا در شش صفحه مداری با زاویه میل ۵۵ درجه قرار گرفته‌اند در حالی که ماهواره‌های GLONASS در سه صفحه مداری با زاویه میل ۶۴.۸ درجه قرار گرفته‌اند.

ارتفاع ماهواره‌های GPS نسبت به MSL، 20200^{km} و دوره تناوب آن‌ها $11^{h}\ 58^{min}$ در حالی که ارتفاع ماهواره‌های GLONASS نسبت به MSL، 19100^{km} و دوره تناوب آن‌ها $11^{h}\ 15^{min}$ می‌باشد. بیضوی مورد استفاده در GPS بیضوی WGS 84 است. در حالی که بیضوی مورد استفاده توسط GLONASS، بیضوی PZ-90 است.

یکایک ماهواره های GLONASS همچون GPS، هم L1 می‌فرستند و هم L2 . البته GLONASS دارای سیستم FDMA است نه CDMA.

یعنی تمایز ماهواره‌های GLONASS از همدیگر از طریق تمایز در فرکانس‌های ارسالی آن‌هاست نه از طریق تمایز بین کدهای ارسالی.

آلمانک‌ها در GPS هر شش روی یک‌بار update می‌شوند؛ در حالی که آلمانک‌ها در GLONASS هر روز update می‌شوند.

در حال حاضر افمریزهای BroadCast برای ماهواره‌های GPS هر یک ساعت یک‌بار update می‌شوند در حالی که افمریزهای BroadCast برای ماهواره‌های GLONASS هر نیم ساعت یک‌بار update می‌شوند.

منابع و مآخذ

۱) جزوه ژئودزی ماهواره ای، تدوین شده توسط مرضیه باعث

۲) جزوه کلاسی درس GPS آقای دکتر حمید عبادی

۳) جزوه کلاسی درس ژئودزی ماهواره ای دکتر نهاوندچی

۴) جزوه کلاسی درس سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای دکتر یحیی جمور

۵) کتاب Satellite Geodesy (مؤلف: Günter Seeber)