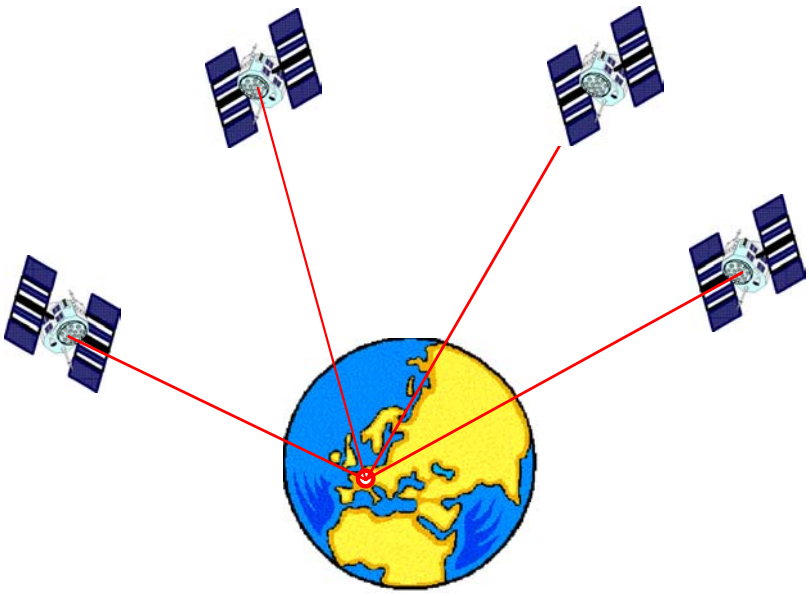
جزوه درسی

سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای
در مهندسی نقشه برداری



تهیه کننده : یحیی جمور

پاییز ۱۳۸۸

پیشگفتار

سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای GNSS، سامانه های ناوبری مبتنی بر فضا، ۲۴ ساعته و دارای قابلیت کارکرد در تمام شرایط آب و هوایی هستند که عموما توسط کشورهای توسعه یافته سرمایه گـذاری، طراحـی، راه اندازی و مدیریت می شوند. نمونه موفق این نوع سامانه ها، سامانه GPS بـود کـه از اواسـط ۱۹۹۳ بطـور کامل عملیاتی شد و بهبود قابل ملاحظه ای در ناوبری و تعیین موقعیت بوجود آورد. هرچند در دهه ۱۹۸۰ نیز سامانه GPS قبل از تکامل آرایش فضایی خود در خیلی از کشورها برای مقاصد نقشه برداری کنترلی بمیـزان خوبی معرفی و بکار گرفته شد. برخلاف مقاصد اولیه نظامی طراحی و راه انـدازی GPS، اولـین اسـتفاده غیـر نظامی از این سامانه در زمینه نقشه برداری کنترلی و شبکه های ژئودزی اتفاق افتاد.

امروزه فنآوری نقشه برداری با GNSS بطورکامل جایگزین فنآوری هایی نظیـر تعیـین موقعیـت مـاهواره ای داپلر و حتی فاصله یاب های الکترونیکی با برد بلند در شبکه های ژئودزی کلاسیک درجه یک گردیده اسـت. البته بکارگیری GNSS در سایر کاربردها مانند نقشه برداری کاداستر، توپوگرافی و مهندسـی راه و سـاختمان بیش از پیش متداول شده است. همچنین هزینه های مربوط به تولید و اسـتفاده از GNSS نیـز بطـور قابـل ملاحظه ای نسبت به قبل کاهش یافته است و این روند همچنان ادامه دارد تا جائیکه پـیش بینـی مـی شـود تمام مهندسین نقشه بردار از آن برای اجرای اهداف خود استفاده نمایند.

بر اساس تجربه آموزشی نگارنده جزوه در دانشگاه ها و مراکز مختلف آموزش عالی و محتوای کتب موجود در زمینه GNSS، مطالبی که در این کتاب در نظر گرفته شده اند به شرح ذیل در ۹ فصل دسته بندی شده اند.

- ژئودزی ماهواره ای و سیر تکوینی آن
- برخی سامانه های ژئودزی ماهواره ای
- دستگاه های مرجع مختصات و زمان
- مدارات، سیگنال ها و مشاهدات ماهواره ای
- منابع خطاها و روش های مقابله با آنها
- مدل های ریاضی تعیین موقعیت ماهواره ای و پردازش داده ها
- گیرنده ها و نرم افزار های پردازش داده های ماهواره ای

- معرفی برخی سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای
- کاردبردهای سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای

نگارنده امیدوار است این جزوه موجب رضایت کلیه خوانندگان محترم بویژه دانشجویان عزیز قرار بگیـرد و بـا این وسیله توانسته باشد خدمتی هر چنـد کوچـک در جهـت توسـعه و اعـتلای مهندسـی نقـشه بـرداری بـه علاقمندان و دانش پژوهان و جامعه دانشگاهی رشته مهندسی نقشه برداری کرده باشد.

یحیی جمور

فصل اول

ژئودزی ماهواره ای و سیر تکوینی آن

ژئودزی فضایی

ژئودزی عبارتست از علم انداره گیری و تعیین شکل و ابعاد زمین، میدان ثقل زمین و بررسی تغییرات زمانی آنها [1] . بنا به این تعریف یکی از وظایف اصلی ژئودزین ها و مهندسین نقشه بردار تعیین مختصات نقاط واقع بر سطح زمین و تغییرات زمانی آنهاست.

امروزه ژئودزی ماهواره ای، فناوری های مشاهداتی و محاسباتی مربوط به حل مسائل تعیین موقعیت را با استفاده از مشاهدات دقیق ماهواره های مصنوعی دگرگون ساخته است. ژئودزی فضایی صورت کلی تری از ژئودزی ماهواره ای است که در آن علاوه بر ماهواره های مصنوعی از ماه، سیارات، امواج رادیویی ستاره ها و کوازرها نیز استفاده می شود. با توجه به تعریف ژئودزی اهداف عمده ژئودزی ماهواره ای عبارتند از:

- تعیین دقیق مختصات سه بعدی در مقیاس های جهانی، منطقه ای و محلی،
- تعیین میدان ثقل زمین،
- اندازه گیری و مدلسازی پدیده های ژئودینامیکی نظیرحرکت قطبی، دوران زمین و تغییرشکل پوسته ای زمین.

لازم به توضیح است که در حال حاضر سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای بویژه سامانه تعیین موقعیت جهانی GNSS نقش بسزایی در موارد فوق ایفا می کند.

مفاهیم اساسی در ژئودزی ماهواره ای

ماهواره ها ی مصنوعی در ژئودزی ماهواره ای به دو صورت ممکن است مورد استفاده قرار گیرند:

۱) نشانه های هندسی قرار گرفته در ارتفاع مداری بالا و قابل رویت در فواصل بلند

۲) حسگرهای میدان ثقل زمین

ارتباط بین ایستگاههای مشاهداتی و ماهواره ها نیز در سه روش دسته بندی شده اند که عبارتند از:

۱) روشهای زمین به فضا (مانند SLR, TRANSIT, GNSS)

۲) روشهای فضا به زمین (مانند Radar Altimetery, InSAR)

۳) روشهای فضا به فضا (مانند ردیابی ماهواره به ماهواره)

تاریخچه توسعه ژئودزی ماهواره ای

آنچه در طی چند دهه اخیر با بهره گیری از ماهواره های تعیین موقعیت بدست آمده است، انقلابی بزرگ در ژئودزی و سایر رشته های علوم زمین بوده است. سرعت بکارگیری و توسعه سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای پس از جنگ جهانی دوم با پیشرفت علوم و فنون بویژه در حوزه فیزیک و الکترونیک دچار یک انقلاب و دگرگونی شگرف شد. مطابق بندهای زیر این تکامل از سال ۱۹۵۸ با مطالعه و توسعه روشهای مورد نظر شروع و در حال حاضر با طراحی و ساخت سامانه هایی نظیر گالیله با شتابی وصف ناپذیر ادامه دارد [2].

- ۱۹۵۸ الی ۱۹۷۰: توسعه روشهای اساسی در مشاهدات و محاسبات ماهواره ای
- ۱۹۷۰ الی ۱۹۸۰: پروژه های علمی و فناوری های جدید مشاهداتی نظیر SLR, TRANSIT Satellite Altimetry
- ۱۹۸۰ الی ۱۹۹۳: استفاده عملی از فناوری های ماهواره ای در ژئودزی، ژئودینامیک و نقشه برداری و جایگزینی روشهای نجومی با GPS
- ۱۹۹۳ تا کنون: توسعه کاربری های GNSS، ارتفاع سنج ها، SAR، TOPEX، ERS-I، ERS-II، ENVISAT، طراحی و راه اندازی سامانه گالیله و ...

ایران نیز مانند سایر کشورها در زمینه یادگیری دانش ژئودزی ماهواره ای و بکارگیری آن در تعیین موقعیت و ناوبری تلاش های قابل توجهی انجام داده است که مختصرا به سابقه تاریخی آن اشاره می شود. در واقع سابقه استفاده از سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای در ایران به سال ۱۳۶۶ بر می گردد که شبکه ای از نقاط کنترل در سطح کشور طراحی و برای اولین بار با بهره گیری از سامانه تعیین موقعیت جهانی GPS اندازه گیری شد [3]. در این شبکه تعداد ۳۸ ایستگاه از ایستگاههای شبکه ماهواره ای با شبکه ژئودزی کلاسیک مشترک بودند. گیرنده های مورد استفاده در این اندازه گیری ها ۳ دستگاه گیرنده WM101 ساخت

شرکت لایکا از اولین نسل گیرنده های GPS بودند. اندازه گیری ایستگاه های این شبکه از شهریور ۱۳۶۷ شروع شد و تا اواخر پاییز ۱۳۶۹ ادامه یافت. ازمجموع ایستگاه های طراحی شده تعداد ۲۴۲ ایستگاه مورد اندازه گیری قرار گرفتند [3]. نگاره ۱ شبکه ژئودزی ماهواره ای درجه یک کشور را که طی سالهای ۱۳۶۷ تا ۱۳۶۹ اندازه گیری شده است، نشان می دهد [4].

نگاره ۱– شبکه ژئودزی ماهواره ای درجه یک [4]

اندازه گیری ها در ژئودزی ماهواره ای

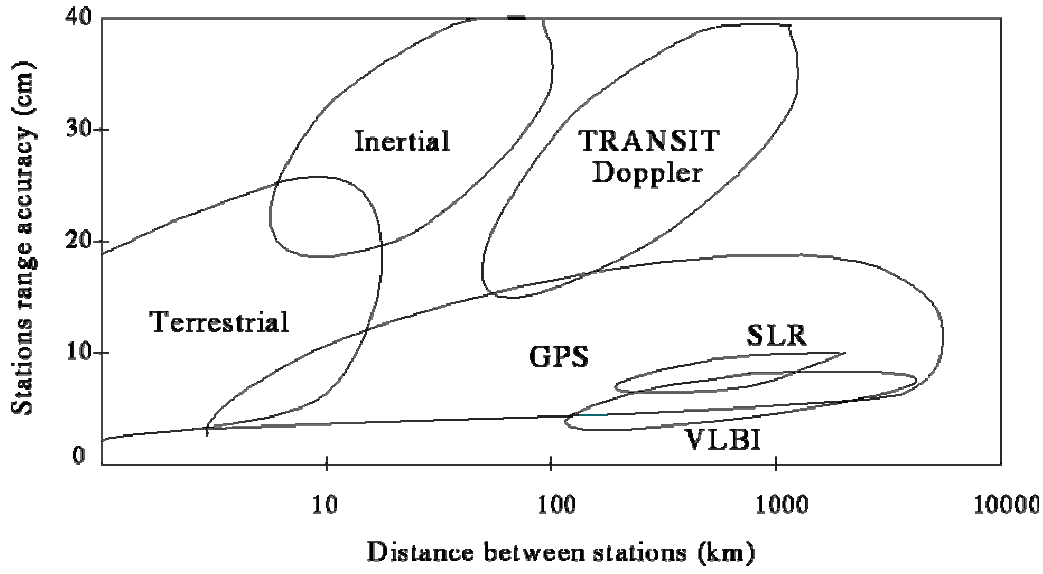
آنچه از آن به عنوان مشاهدات ژئودزی ماهواره ای در تعیین موقعیت یاد می شود، معمولا مشاهدات طولی مبتنی بر ماهواره های مصنوعی واقع در فضا است که به دو روش متمایز هندسی و دینامیکی بدست می آیند. در روش هندسی ماهواره ها به عنوان یک هدف هندسی معلوم در فضا قرار گرفته اند و از ایستگاه های زمینی مورد مشاهده قرار می گیرند که منجر به تعیین موقعیت می شود. در روش دینامیکی، حرکت ماهواره

تابعی از میدان ثقل زمین است و با توجه به ارتباط بین مشاهدات حاصل از این روش و مختصات ایستگاه های مورد اندازه گیری می توان به موضوع تعیین موقعیت پرداخت.

کاربردهای ژئودزی ماهواره ای

امروزه ژئودزی ماهواره ای در موارد زیادی بسته به فواصل بین ایستگاه ها و دقت مورد نیاز (شکل ۱-۱) از کارهای عمومی و عادی گرفته تا موضوعات تحقیقی و دقیق مطرح و مورد استفاده قرار می گیرد. بخشی از این کاربردها به شرح زیر به آنها اشاره می شود [5].

- ایجاد شبکه های مرجع مختصات جهانی، منطقه ای و ملی
- بررسی رفتار پوسته زمین و مسایل ژئودینامیکی
- امور ناوبری و تهیه نقشه
- کنترل پایداری سازه ها و بناهای مهم
- مشارکت در اندازه گیری ها و پایش های جوی



نگاره ۲- دقت تعیین موقعیت ماهواره ای بر حسب فاصله بین ایستگاه ها [5]

فصل دوم

آشنایی با برخی سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای

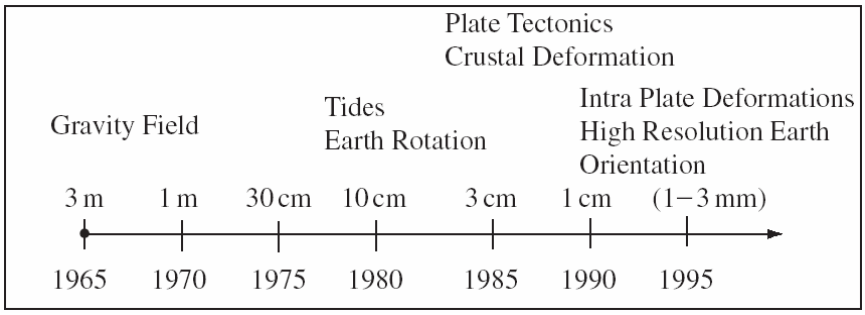
سامانه های تعیین موقعیت ماهواره ای بر پایه آن دسته از ماهواره هایی کـه در حـال چـرخش بـه دور زمـین هستند و با کمک دریافت امواج ارسالی یا انعکاسی از آنها در گیرنده ها، موقعیت نقاط تعیین می شوند، تعریف می شود. سابقه ایجاد این نوع سامانه ها به دهه ۱۹۷۰ میلادی بر می گردد که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود.

سامانه فاصله یابی لیزری ماهواره ای (SLR)

سامانه SLR بر پایه اندازه گیری زمان رفت و برگشت یک پالس لیزری ارسالی از ایستگاه زمینی بـه مـاهواره کار می کند. اولین ماهواره حامل بازتابنده های لیزری، BEACON-B، در ۹ اکتبر ۱۹۶۴ به فضا پرتاب شد و در مداری با ارتفاع تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتری و زاویه میـل ۸۰ درجـه قـرار گرفـت. اولـین انـدازه گیـری هـای موفقیت آمیز همراه با نتایج در حد چند متر دقت در سال ۱۹۶۵ بدست آمدند [1].

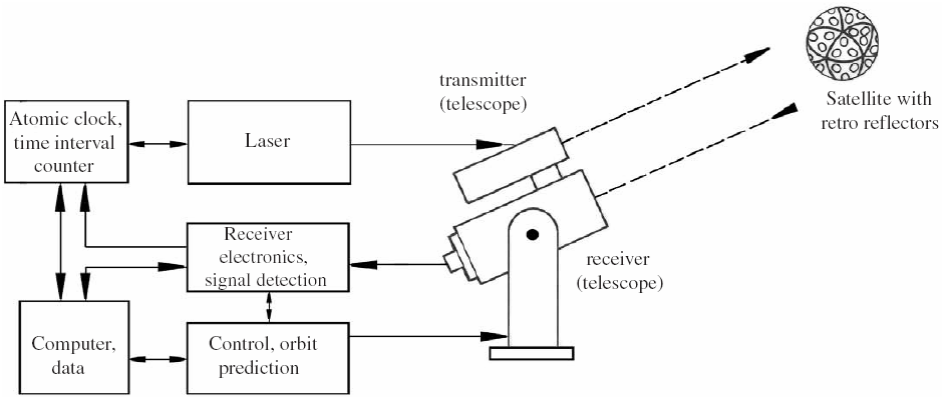
نگاره ۱- ایستگاه زمینی سامانه SLR مستقر در رصد خانه ژئودزی Wettzell، Bavaria (آلمان)

سرعت پیشرفت در این فناوری در سال های بعد به اندازه ای بود که دقت فاصله یابی از چند متر به چند سانتی متر رسید. دقت قابل اکتساب در این سامانه شدیدا وابسته به طول پالس و قدرت تفکیک پالس های لیزری است. به عنوان مثال اندازه گیری زمان رفت و برگشت پالس با دقت ۱ نانو ثانیه (10^{-9} sec) منجر به اندازه گیری فاصله با دقت ۱۵ سانتی متر خواهد شد. همگام با افزایش دقت این سامانه، کاربردهای جدیدتر و وسیع تری نیز پیدا شده است. بویژه با دسترسی به دقتی در حدود سانتی متر و بهتر، این سامانه مشارکت قابل توجهی در مطالعات ژئودینامیک و حرکات پوسته زمین، تجزیه و تحلیل و تعیین دقیق مدارات ماهواره ها، تعیین پارامتر های توجیه زمین و بهبود دستگاه های مختصات دارد. به همین دلیل اندازه گیری های فاصله ای لیزری از اهمیت ویژه ای در ژئودزی ماهواره ای برخوردارند و به طور پیوسته در مسایل علوم زمین مورد استفاده قرار می گیرند.



نگاره ۲- روند بهبود دقت و توسعه کاربرد های SLR [2]

همانطور که اشاره شد اساس اندازه گیری فاصله در سامانه SLR بر پایه اندازه گیری زمان رفت و برگشت پالس لیزری از ایستگاه زمینی تا ماهواره مجهز به بازتابنده های مخصوص است. در واقع همزمان با ارسال پالس های لیزری یک شمارشگر زمانی نیز در ایستگاه زمینی شروع به ثبت زمان می کند و پس از دریافت، تشخیص، تقویت و تجزیه و تحلیل پالس برگشتی برای توقف شمارشگر الکترونیکی استفاده می شود [2].



نگاره ۳- اساس فاصله یابی لیزری ماهواره ای [2]

از آنجا که SLR یک نوع روش اندازه گیری دو طرفه (رفت و برگشت) فاصله است، بنابراین معادله مشاهده آن بسیار ساده به صورت زیر نوشته می شود [2].

$$d = \frac{\Delta t}{2} c + \Delta d_0 + \Delta d_s + \Delta d_b + \Delta d_r + \eta \qquad (۱)$$

که در آن Δt زمان رفت و برگشت سیگنال، c سرعت انتشار سیگنال و d مسافت بین ایستگاه زمینی و ماهواره در لحظه اندازه گیری، Δd_0 تصحیح خروج از مرکزیت ایستگاه زمینی، Δd_s تصحیح خروج از مرکزیت ماهواره، Δd_b تاخیر سیگنال در ایستگاه زمینی، Δd_r تصحیح انکسار و η خطای مشاهداتی تصادفی و سیستماتیک باقیمانده است.

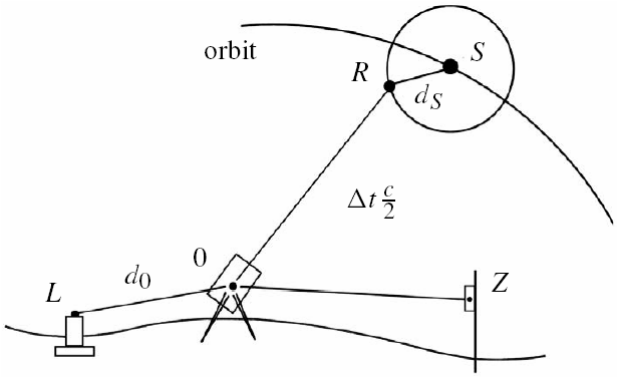
اجزای اصلی ایستگاه زمینی عبارتند از:

الف) واحد تولید و ارسال پالس های لیزری،

ب) واحد تشخیص و تجزیه و تحلیل پالس ها،

ج) واحد اندازه گیری زمان رفت و برگشت پالس ها.

به عنوان یک قاعده عمومی، تمام تصحیحات فیزیکی و هندسی می بایستی با یک درجه دقت بالاتر از قدرت تفکیک پالس ها محاسبه و اعمال شوند. این بدین معنی است که برای فاصله یابی لیزری با دقت ۱-۳ سانتی متر باید تصحیحات با دقت ۱-۳ میلی متر در نظر گرفته شوند.



نگاره ۴- ارتباط هندسی در SLR [2]

توضیح بیشتر در مورد نحوه فاصله یابی لیزری بر اساس معادله (۱) به شرح زیر آمده است.

الف) اندازه گیری زمان Δt

چالش مهم در اندازه گیری زمان رفت و برگشت پالس های لیزری، وجود برخی عدم قطعیت ها در شناسایی و تشخیص سیگنال هاست. کیفیت اندازه گیری های اختلاف زمان Δt یکی از بحرانی ترین محدودیت های دقت را در بین سایر منابع خطاها تشکیل می دهد.

ب) تصحیحات خروج از مرکزیت Δd_0 و Δd_s

معمولا محل تقاطع محورهای افقی و قائم تلسکوپ زمینی به عنوان نقطه مرجع زمینی در سامانه SLR در نظر گرفته می شود (نقطه 0). موقعیت این نقطه می بایست با دقت میلی متر نسبت به نشانه هندسی ایستگاه زمینی معلوم باشد. همچنین ارتباط هندسی بین مرکز جرم ماهواره با مرکز نوری یک بازتابنده لیزری، موسوم به تصحیح مرکز جرم، باید مشخص باشد. این موضوع برای ماهواره های غیرمنظم نمی تواند با دقت بالایی انجام پذیرد ولی برای ماهواره های کروی شکل خیلی مشکل نیست.

ج) تصحیح انکسار Δd_r

عبور امواج لیزری از اتمسفر همراه با تاخیر ناشی از شکست امواج است که برای مثال حدود ۲,۵ متر در راستای زنیتی و ۱۳ متر در زاویه ارتفاعی ۱۰ درجه برآورد شده است. از آنجا که امکان اندازه گیری پارامترهای اتمسفر در طول کامل مسیر وجود ندارد، از مدل های استاندارد موجود که توسط داده های هواشناسی در ایستگاه های اندازه گیری پشتیبانی می شوند استفاده می شود. یکی مدل های موفق تصحیح انکسار مورد تایید مراکز علمی معتبر نظیر IERS که معمولا برای زاویه ارتفاعی بالای ۱۰ درجه بکار می رود، معروف به فرمولسازی Marini و Murray، به صورت زیر بیان می شود [3].

$$\Delta d_r = \frac{f(\lambda)}{f(\varphi,H)} \cdot \frac{A+B}{\sin E + \dfrac{B/(A+B)}{\sin E + 0.01}} \qquad (۲)$$

که در آن

$$A = 0.002357 P_0 + 0.000141 e_0$$

$$B = (1.084\times10^{-8}) P_0 T_0 K + (4.734\times10^{-8}) \frac{P_0^2}{T_0} \cdot \frac{2}{3-(1/K)}$$

$$K = 1.163 - 0.00968\cos 2\varphi - 0.00104 T_0 + 0.00001435 P_0$$

Δd_r: تصحیح فاصله (متر)

E: ارتفاع ماهواره (درجه)

P_0: فشار هوا در ایستگاه زمینی (میلی بار)

T_0: دمای هوا در ایستگاه زمینی (کلوین)

e_0: فشار بخار آب در ایستگاه زمینی (میلی بار)

$f(\lambda)$: پارامتر فرکانس لیزر (λ طول موج بر حسب میکرو متر است)

$f(\varphi, H)$: تابع ایستگاه زمینی (φ عرض جغرافیایی ایستگاه و H ارتفاع ایستگاه بر حسب کیلومتر است)

پارامتر فرکانس لیزر و تابع ایستگاه زمینی عبارتند از

$$f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$$

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.0026\cos 2\varphi - 0.00031H$$

د) تاخیر سیگنال Δd_b در ایستگاه زمینی

نقطه مرجع هندسی 0 در ایستگاه زمینی فاصله یابی لیزری لزوما بـر نقطـه مرجـع الکتریکـی (مرکـز تولیـد و ارسال پالس های لیزری) آن منطبق نیست. این عدم انطباق می بایست به عنوان یک خطای سیستماتیک در نظر گرفته شده و با انجام کالیبراسیون به طور دقیق تعیین گردد.

همانطور که گفته شد دقت قابل دستیابی در سامانه های SLR وابسته به طول پالس و قدرت تفکیک آن می باشد. در جدول زیر دسته بندی نسل های مختلف SLR بر حسب طول پالس و متنـاظر بـا آن دقـت فاصـله یابی آمده است.

جدول ۱- نسل ها و دقت های مختلف سامانه SLR [4]

نسل SLR	طول پالس و دقت فاصله یابی متناظر با آن
اول (۱۹۶۵)	۱۰ تا ۴۰ نانو ثانیه معادل ۱ تا ۶ متر در فاصله
دوم (۱۹۷۰-۱۹۷۵)	۲ تا ۵ نانو ثانیه معادل ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی متر در فاصله
سوم (۱۹۸۰-۱۹۹۰)	۰,۱ تا ۰,۲ نانو ثانیه معادل ۱ تا ۳ سانتی متر در فاصله
چهارم (۱۹۹۵)	۱۰ تا ۲۰ پیکو ثانیه معادل ۱ تا ۳ میلی متر در فاصله

فاصله یابی لیزری تنها با ماهواره هایی امکان پذیر است که مجهز به بازتابنده هـای خاصـی بـه نـام retro-reflector باشند. این نوع بازتابنده ها نور لیزر دریافتی را دقیقا در همان مسیری که آمده است بر می گردانـد. ابعاد این نوع بازتابنده ها باید به اندازه ای بزرگ باشد تا پالس های لیزری بتوانند بـا انـرژی کـافی بـه سـوی ایستگاه های زمینی منعکس شوند. برای همین منظور در بیشتر موارد چندین بازتابنده با قطـر ۲ تـا ۴ سـانتی متر با هم ترکیب می شوند و در یک رشته منظم در کنار یکدیگر قرار می گیرند. در ماهواره هایی که صرفا به منظور فاصله یابی لیزری پرتاب شده اند، بازتابنده ها به صورت یکنواخت روی پوسـته خـارجی کـروی شـکل ماهواره توزیع شده اند. این مورد را می توان در ماهواره هـای LAGEOS-1 و LAGEOS-2، پرتـاب شـده بوسیله آژانس فضایی امریکا (NASA) به ترتیب در تاریخ های ۴ مـی ۱۹۷۶ و ۲۲ اکتبـر ۱۹۹۲، و مـاهواره STARLETTE، پرتاب شده بوسیله آژانس فضایی فرانسه (CNES) در تارخ ۶ فوریه ۱۹۷۵، مشاهده نمود.

نگاره ۵- ماهواره LAGEOS پرتاب شده بوسیله آژانس فضایی امریکا (NASA)

همانطور که اشاره شد برخـی از مـاهواره هـای پرتـاب شـده در فـضا ماننـد LAGEOS، STARLETTE، AJISAI و ETALON تنها برای هدف فاصله یـابی لیـزری بـوده انـد. بـرای آشـنایی بیـشتر خواننـدگان مشخصات مداری دو ماهواره LAGEOS-1 و LAGEOS-2 در زیر آمده است [2].

جدول ۲- مشخصات مداری دو ماهواره LAGEOS-1 و LAGEOS-2 [2]

	LAGEOS-1	LAGEOS-2
Perigee height	5860 km	5620 km
Orbit inclination	109.84 degrees	52.64 degrees
Eccentricity	0.0045	0.0135
Period	225 minutes	223 minutes
Diameter	60 cm	60 cm
Shape	sphere	sphere
Mass	411 kg	405 kg
Reflectors	426 corner cubes	426 corner cubes

طراحی شکل کروی ماهواره های LAGEOS به منظور کاهش اثرات نیروهای سطحی و دستیابی به فاصله یابی لیزری دقیق تر می باشد. همچنین به دلیل ارتفاع مداری بالای آنها، به نیروی اصطکاک اتمسفری و طول موج های کوتاه میدان ثقل زمین خیلی حساس نیستند. همانطور که از نام کامل LAGEOS (LAser GEOdynamic Satellite) بر می آید ماموریت های اصلی این ماهواره عبارت است از: تعیین حرکات صفحات تکتونیکی و جابجایی های پوسته ای منطقه ای، تعیین پارامترهای توجیه زمین، استقرار چارچوب مرجع ژئودزی و مطالعه میدان ثقل زمین.

همانطورکه برای ماهواره LAGEOS مطرح شد، در ادامه به برخی کاربردهای SLR در ژئودزی و ژئودینامیک می پردازیم.

الف) موقعیت ها، خطوط مبنا و حرکات صفحه های تکتونیکی

مدلسازی دینامیکی داده های فاصله یابی لیزری ماهواره ای امکان برآورد موقعیت های سه بعدی ژئوسنتریک ایستگاه های زمینی را فراهم می سازد. پردازش نسبی داده های SLR در یک بازه زمانی معین نیز طول (اختلاف مختصات) دقیق بین هر دونقطه را بدست می دهد. به کمک پایش تغییرات زمانی موقعیت ها و خطوط مبناها می توان به نرخ حرکات تکتونیکی رسید که بویژه برای خطوط مبنای بلند از دقت بسیار مناسبی نسبت به سایر مشاهدات برخوردار است. دقت حاصل از SLR در تعیین موقعیت ها و برآورد نرخ حرکات تکتونیکی به ترتیب حدود ۶ میلی متر و ۲ میلی متر در سال گزارش شده است [5].

ب) تعیین مدارات ماهواره ها و میدان ثقل زمین

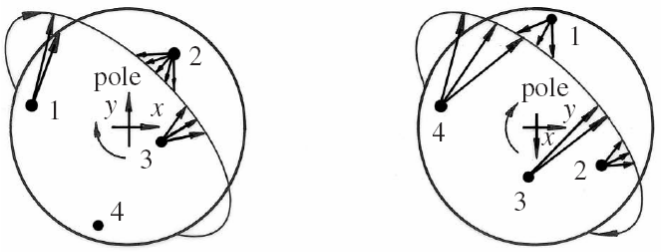
با توجه به اغتشاش حرکات مداری ماهواره های SLR ناشی از میدان ثقل زمین و پایش پیوسته ماهواره ها از ایستگاه های زمینی، می توان با تجزیه وتحلیل این حرکات آشفته ضمن دستیابی به پارامترهای مداری دقیق ماهواره ها، بخش قابل توجهی از رفتار میدان ثقل زمین را مدلسازی نمود یا به عبارت دیگر میدان ثقل زمین را تعیین کرد. به همین دلیل در محاسبه و تعیین مدل های ثقل ارائه شده توسط Goddard (وابسته به NASA) موسوم به مدل های GEM، از مشاهدات SLR به خاطر دقت بالای آنها استفاده شده است. به عنوان نمونه می توان به مدل GEM 9 اشاره کرد که در آن ۲۰۰۰۰۰ مشاهده فاصله یابی لیزری به ۹ ماهواره بکار رفته است.

ج) چاچوب مرجع مختصات و پارامترهای دوران زمین

درجه پایداری و ثبات بالای مداری ماهواره های LAGEOS و ETALON، یک چارچوب مرجع مختصات فضایی مناسب (اینرشیا) برای محاسبه پارامترهای توجیه زمین به کمک مشاهدات فاصله یابی لیزری در ایستگاه های زمینی فراهم نموده است. همانطور که می دانیم این پارامترها عبارتند از: مولفه های حرکت قطبی زمین (X_p, Y_p) و زمان نجومی ظاهری گرینویچ $(GAST = \Theta)$. با معادل در نظر گرفتن زمان نجومی ظاهری گرینویچ و زمان $UT1$ می توان به تغییرات سرعت دوران زمین یا به عبارت دیگر به تغییرات طول یک شبانه روز از طریق پارامتر $UT1-UTC$ پی برد. دقت تعیین مولفه های حرکت قطبی زمین و پارامتر $UT1-UTC$ به ترتیب حدود یک ده هزارم ثانیه کمانی $(0.1\,mas)$ و پنج صد هزارم ثانیه $(0.05\,ms)$ گزارش شده است. در واقع با پذیرش موقعیت مداری ماهواره ها در یک چارچوب مرجع اینرشیا و وجود حرکت قطبی و تغییرات روزانه در سرعت دورانی زمین، می توان اختلاف بین دو سامانه مرجع مختصات زمین چسب (CTS) و فضا چسب یا اینرشیا (CIS) را به صورت زیر فرمولسازی نمود [2].

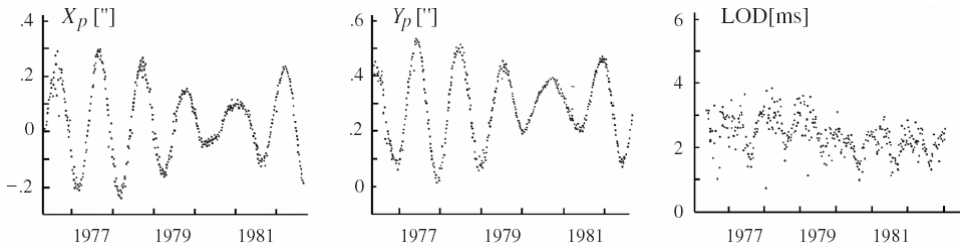
$$X_{CIS} = R_3(-\Theta)R_1(y_p)R_2(x_p)X_{CTS} \qquad (۳)$$

که در آن X_{CIS} و X_{CTS} به ترتیب بردار مختصات نقاط دلخواهی در سامانه مرجع مختصات زمین چسب قرادادی و سامانه مرجع مختصات فضا چسب لحظه ای می باشند.



(a) epoch t (b) epoch $t + \Delta t$

نگاره ۶- تعیین مختصات قطب به کمک مشاهدات فاصله یابی لیزری ماهواره ای [2]



نگاره ۷- پارامترهای توجیه زمین بر اساس مشاهدات ماهواره LAGEOS از ۱۹۷۶ الی ۱۹۸۲ [6]

د) سایر کاربردها

علاوه کابردهای SLR در موارد فوق، کاربردهای دیگری نیز نظیر: مطالعه و مدلسازی جزر و مد اقیانوسی و صلب زمین و تعیین ضرایب مربوط به الاسیسیته زمین مانند اعداد لاو، مقایسه و تبدیلات و تنظیمات دقیق زمان، مطالعات فیزیک پایه از طریق ثابت جاذبی زمین مرکز (GM)، تصحیح مرکز جرم یا آنتن ماهواره های حامل بازتابنده های لیزری و امکان ردیابی آنها در صورت از کار افتادن بخش های الکترونیکی و ... می توان نام برد که از توضیح آنها اجتناب می شود.

هر چند مزیت عمده این سامانه طول عمر بسیار بالای ماهواره ها و دقت یالای آن است ولی از طرف دیگر به شدت به شرایط آب و هوایی وابسته می باشد و با توجه به قیمت بالا و محدودیت در حمل و نقل آن، امکان تهیه آن به سادگی برای همه فراهم نمی باشد.

سامانه فاصله یابی لیزری با ماه (LLR)