ژئودزی فضائی

نوشتهٔ : پرفسور آندر دکاه

ترجمه : مهندس ایرج شمس ملک‌آرا

در روزهای ۲ و ۱۲ و ۶ و ۴ و ۹ و ۱۲ و ۶ و ۴ آقای پرفسور آندره دکاه (André Decae) استاد و متخصص ژئودزی در موضوع ژئودزی فضائی یا ژئودزی بوسیله ماهواره دو سخنرانی در آمفی‌تأتر دانشکده فنی دانشگاه تهران اجرا نمودند که بسیار مورد توجه قرارگرفت آقای مهندس شمس ملک آرا استاد دانشکده فنی ضمن معرفی آقای پرفسور آندره دکا گفتند که ایشان متجاوز از سی سال‌است که اجرای طرح‌های ژئودزی را بعهده دارند و اکنون بدعوت سازمان برنامه برای همکاری با سازمان نقشه‌برداری به کشور ما آمده‌اند وچون اجرای طرح ژئودزی عمومی کشورما که اکنون در دست اقدام‌میباشد مصادف با عصر فضاست لذا چنین تصمیم گرفته شده است که از روش‌های جدید فضائی استفاده شود.

البته اجرای این طرح با روش‌های نوین مستلزم آموزش و تهیه کادر فنی در سطح دانش‌های امروزه مانند اندازه‌گیری فاصله‌ها بوسیله رادار ویا لازر وعکس برداری از مسیر ماهواره در مقابل‌صحنه آسمان ویااندازه‌گیری تغییر سرعت ماهواره باروش دوپلر(Doppler) وبیشتر ازهمه استفاده از ماشین‌های حسابگر الکترونیکی‌است وباین‌ترتیب‌نقش‌مهم دانشگاه دراجرای این طرح بزرگ کاملاً مشهود میگردد.

باین دلیل دانشکده فنی از آقای پرفسور آندره دکا دعوت نموده است که در موضوع روش و تکنیک‌های جدیدژئودزی فضائی‌سخنرانی‌هائی‌برای استفاده علاقه‌مندان‌ودانشجویان ایراد نمایند.

آقای مهندس شمس ملک آرا اضافه کردند ـ که آقای پرفسور آندره دکا برای تهیه طرح تأسیس مرکز مطالعات و تحقیقات ژئودزی فضائی بادانشگاه تهران همکاری سودمندی نموده‌اند وطبق این طرح دانشگاه تهران دو مأموریت بعهده خواهد داشت.

۱ـ مأموریت‌آموزشی ـ که شامل تهیه کادر فنی‌ومتخصص برای‌اجرای‌طرح‌ژئودزی کشور است.

۲ـ مأموریت‌پژوهشی ـ که‌شامل اندازه‌گیری ناهمواری‌های‌سدار ماهواره‌هائی‌است که ازفراز آسمان ایران عبورمینمایند واین‌اندازه‌گیری‌ها همراه بااندازه‌گیری‌های گرانساری زمین

(g) که بوسیله مرکز ژئوفیزیک دانشگاه تهران انجام میشود اجازه خواهد داد که شکل ژئوئید (Geoide) ایران که برای محاسبات ژئودزی لازم میباشد بدست آید.

اینک در زیر ترجمه سخنرانی‌های آقای پرفسور آندره دکا که توسط آقای مهندس شمس ملک آرا انجام یافته و برای روشن شدن بعضی ازمطالب آن توضیحاتی اضافه کرده‌اند درج میگردد.

ژئودزی فضائی - یا ژئودزی بوسیله ماهواره

منظور از تهیه نقشه دقیق یک کشور تعیین جزئیات و شکل سطح زمین بوسیله مختصات سه‌بعدی نقاط آن میباشد.

امروزه عکسهای هوائی کمک‌شایان توجهی به‌این منظورمینماید ومیتوان جزئیات قسمتهای‌مختلف زمین راکه در روی عکسها نمایان است بوسیله دستگاههای تبدیل عکس به نقشه ترسیم و محاسبه نمود.

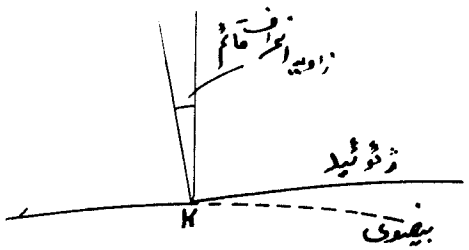
برای تبدیل عکس به نقشه همواره احتیاج به شناسائی مختصات سه بعدی دقیق تعدادی از نقاط زمین است و این نقاط باید قبلاً بوسیله یک شبکه مثلث بندی و ترازیابی دقیق مشخص ومحاسبه شوند.

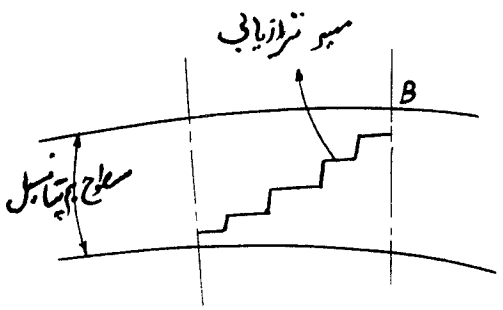
دقت این محاسبات از نظر ریاضی موقعی قابل قبول است که سطح زمین دارای شکل هندسی قابل محاسبه باشد ولی متأسفانه باپستی‌وبلندی که‌دارد حائز این‌شرط نیست بنابراین برای‌امکان‌محاسبات‌مثلث‌بندی بجای سطح ناهموار زمین سطح هندسی ساده‌ای در نظر گرفته‌اند که بتعریف‌ریاضی‌سطح هم پتانسیل نیروهای ثقل یا گرانساری زمین است که ژئوئید (Géoïde) نامیده میشود که همان سطح آب آزاد اقیانوس‌ها است که بداخل قاره‌های خاکی هم ادامه داده شده است. شکل عمومی ژئوئید نزدیک به یک بیضوی دوار است که فشردگی آن درناحیه قطبهای زمین میباشد ومحاسبات ژئودزی مربوط به مختصات X و Y نقاط درروی سطح اخیرالذکر صورت میگیرد ولی ارتفاعات نقاط یعنی Z آنها نسبت به سطح ژئوئید سنجیده میشود.

یک اشکال عمده محاسبات ژئودزی ناشی از این است که پخش و توزیع جرم در تمام پوسته‌زمین یکسان نیست و چگالی جرمها نیز مختلف میباشد. بنابراین سطوح هم پتانسیل نیروهای گرانساری علاوه براینکه موازی بیضوی مقایسه نمیباشند موازی یکدیگر هم نخواهند بود و ازاین‌جا دو اشکال تولیدمیشود یکی اینکه خط عمود به‌سطح بیضوی مقایسه باخط عمود به سطح ژئوئید که همان امتداد قائم محل‌میباشد منطبق نیست و با آن زاویه‌ای تشکیل میدهد که زاویه انحراف قائم نامیده میشود و دیگر اینکه اختلاف ارتفاع بین دو نقطه سطح زمین واقع در روی دو سطح هم پتانسیل با انتخاب مسیرهای مختلف ترازیابی تغییر مینماید.

یک راه حل رفع اشکال دوم اینست که بجای اختلاف ارتفاع متری اختلاف پتانسیل را در نظر بگیریم یعنی اختلاف متری را درمیزان (g) یا گرانساری نقاط ضرب کنیم و باین ترتیب ارتفاع ژئوپتانسیل بدست خواهد آمد (géopotentielle) که بصورت (Σgdh) نوشته میشود و مقدار آن تابع‌مسیر ترازیابی‌نیست زیرا جمله فوق مقدار کار یک جرم واحد در بین دوسطح هم پتانسیل میباشد.

راجع بـه اشکال اول فوق‌الذکر دیده میشود که چون دوربین های نقشه‌برداری (ژئوزی و نجوم) بوسیله تراز حبابدار در محل مستقر میگردد بنابراین محور قائم آنها در امتداد خط عمود بـه ژئوئید است وبنابراین زوایائیکه بوسیله این دوربین ها اندازه گیری میشود برای سطح بیضوی مقایسه صحیح نبوده و باید آنها را با توجه بزاویه انحراف قائم تصحیح نمود.





(شکل ۱)

محاسبه این تصحیح که مستلزم شناسائی دقیق امتداد نیروهای گرانساری نقاط مختلف زمین است بسیار بغرنج‌میباشد وشدتی هم که بوسیله گران سنجی یا گراویمتری (gravimètrie) برای (g) نقاط زمین بدست میآید باید تبدیل به سطح ژئوئید شود که آنهم مستلزم قبول فرضیه‌هائی برای پخش و توزیع جرم وچگالی پوسته زمین است که عملاً از دقت محاسبات خواهد کاست.

بدلائل فوق امروزه نظریه جدیدی برای حل مسائل ژئودزی پیدا شده است وآن تعیین مختصات فضائی نقاط زمین میباشد و بعلاوه برای رفع اشکال و رهائی از سطح بغرنج ژئوئید هم سطح ساده‌تری بنام شبه ژئوئید (Quasigéoïde) در نظر گرفته‌اند که برای بدست آوردن آن از نقاط مختلف سطح زمین ودرامتداد عمود به بیضوی مقایسه طولی برابر $1=\frac{\Sigma gdh}{\gamma}$ موسوم به (ارتفاع نرمال) درجهت منفی‌جدا میکنند ومکان هندسی نقاطی که باین‌ترتیب بدست میآیند سطح شبه ژئوئید را تشکیل خواهد داد که میتوان آنرا سطح ارتفاعات صفر نامید در فرمول بالا Σgdh ارتفاع ژئوپتانسیل و γ هم میانگین نیروی گرانساری در روی‌قائم محل میباشد.

اکنون اگرفاصله بین نقاط شبه ژئوئید وبیضوی مقایسه‌را نیز تعیین کنیم شکل سطح زمین کاملاً مشخص خواهد شد.

برای تعیین این فاصله جمله‌هائی از انتگرال مولودنسکی (Molodensky) را که مربوط به پتانسیل میدان ناهموار ساز گرانساری زمین است و از وجود پستی و بلندیها ناشی میشود به میانگین نظری نیروی گرانساری تقسیم میکنیم $\left(dr=\frac{V_p}{g_m}\right)$

برای توضیح اضافه میشود که پتانسیل کامل میدان گرانساری زمین بصورت حاصل جمع :

$$V=V_0+V_1+V_2+\cdots\cdots+V_n$$

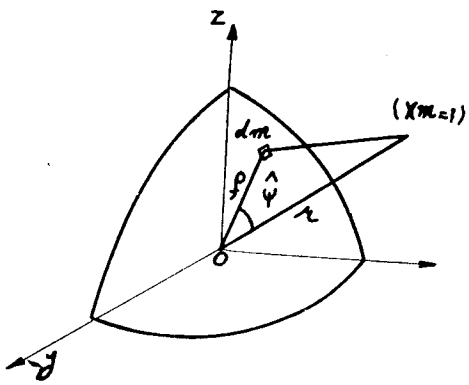
است که درآن :

$$V_0=\frac{K}{r}\int_M dm=\frac{KM}{r}$$

$$V_1=\frac{K}{r^2}\int_M \rho\cos\psi\, dm$$

$$V_2=\frac{K}{r^3}\int_M \frac{\rho^2}{2}(3\cos^2\psi-1)dm$$

$$V_n=\frac{K}{r^{n+1}}\int_M \frac{\rho^n}{2^n n!}\frac{d^n(\cos^2\psi-1)}{d(\cos\psi)^n}dm$$



(شکل ۲)

جمله V_n هارمونیک یا همساز منطقه‌ای نامیده میشود و در آن (K) ثابت نیوتون M جرم زمین و r و ρ و ψ هم به ترتیب فاصله نقطه A (m=۱) ازمرکز O و فاصله عنصر جرم (dm) از این مرکز و زاویه بین دو امتداد OA و (dm و O) میباشد . بعلاوه در حاصل جمع V مذکور فوق جمله اول یعنی $V_0=\frac{KM}{r}$ پتانسیل میدان گرانساری یک توده کروی به‌جرم M است ومجموع جمله‌های V_1 و V_2 و V_3 و V_4 پتانسیل اضافی مربوط به‌میدان گرانساری بیضوی مقایسه میباشد ومجموع جمله‌های V_0 به بالا هم مربوط به‌پتانسیل اضافی نیروهای ناهموار ساز خواهد بود و بنابراین خواهیم داشت :

$$V_p=V_0+V_1+\cdots\cdots+V_n$$

ضمناً باید گفت که فاصله بین نقاط ژئوئید و شبه ژئوئید بسیار کم و از چند متر تجاوز نمیکند و بنابراین در مقابل شعاع متوسط زمین (R=۶۳۷۰ کیلومتر) کاملاً قابل اغماض میباشد.

برای تعیین وضع نسبی نقاط دور دست نسبت بیکدیگر راه کلی که سابقاً بنظر میرسید استفاده از ستارگان بود که میتوان آنها را از تمام نقاط نیمکره مربوط رصد نمود. ولی از یکطرف بطوریکه قبلاً گفته‌شد بدلیل اشکال عدم انطباق محور قائم دوربین های ژئودزی ونجومی با خط عمود به بیضوی مقایسه وازطرف

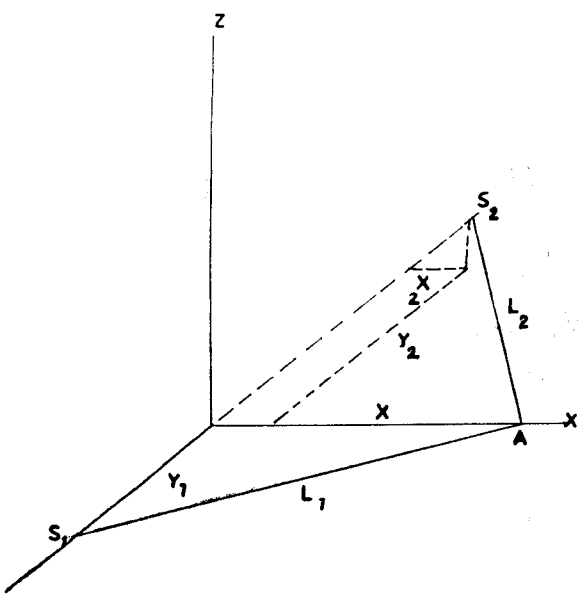
دیگر اشکال محاسبه دقیق ضریب انکسار نور جو خطای موقعیت نسبی نقاط که بکمک ستارگان تعیین میشد از ۳۰۰ متر هم متجاوز بود.

برای رهائی از اشکال قائم محل بجای اندازه‌گیری زوایا به اندازه‌گیری طولها با وسائل نوری یا الکترو مغناطیسی پرداختند و باین ترتیب مثلث‌بندی ضلعی (Trilatèration) جانشین مثلث بندی زاویه‌ای کلاسیک (Triangulation) گردید وهمچنین بجای امتداد ستارگان امتدادهائیکه تابع قائم محل نمیباشند از قبیل امتداد حرکت هواپیما یا امتداد نشانه‌های نورانی که بوسیله هواپیما در بالای زمین رها میگردند بکار رفت. و از سالهای اخیر هم بجای نشانه‌های نورانی که رؤیت آن‌ها از فاصله‌های زیاد بدلیل کرویت زمین مقدور نیست ازماهوارهائی که درارتفاع زیاد ازفرازنقاط مورد اندازه‌گیری عبورمینمایند استفاده کردند.

برای اندازه‌گیری طول بمنظور مثلث‌بندی ضلعی روشها و وسائلی بشرح زیر مورد استفاده قرارگرفت.

نخستین روش که برای اندازه‌گیری فاصله بین دو نقطه زمین بکار رفت روش معروف به شوران (Shoran) است که در مورد فاصله‌های چند صد کیلو متر مناسب میباشد.

برای توضیح اضافه میشود که در این روش هواپیما در امتداد OX که تقریباً عمود بوسط صفحه قائم (S_1S_2) شامل دونقطه زمین است حرکت میکند و بوسیله یک خبر الکترو مغناطیس باطول موج حدود متر که پس ازبرخورد به‌بازتابنده‌های نقاط S_1 و S_2 دومرتبه به‌دستگاه فرستنده هواپیمابر میگردد فاصله‌های L_1 و L_2 را اندازه‌گیری میکند.



(شکل ۳)

مطابق شکل:

$$L_1=\sqrt{X^2+Y_1^2} \quad \text{و} \quad L_2=\sqrt{(X-X_2)^2+Y_2^2+Z_2^2}$$

وبا توجه باینکه (X_2) با مقایسه Y_1 و Y_2 بسیار کوچک است خواهیم داشت:

$$\frac{L_2}{Y_2}=1+\frac{1}{2}\frac{(X-X_2)^2+Z_2^2}{Y_2^2} \quad و \quad \frac{L_1}{Y_1}=1+\frac{1}{2}\frac{X^2}{Y_1^2}$$

وازآنجا :

$$\Sigma=L_1+L_2=pX^2+qX+r$$

(مقادیر p و q و r تابع مختصات نقاط S_1 و S_2 میباشد).

و چون فاصله مجهول X تابع سرعت هواپیما است که مقدار آن ثابت میباشد لذا درصورتیکه (K) شماره ترتیب اندازه‌گیریهای ($L_1+L_2=\Sigma$) باشد که درفاصله‌های زمانی‌مساوی صورت میگیرد بین K و X یک رابطه خطی برقرار خواهد بود و بنابراین (Σ) بصورت زیر نوشته خواهد شد :

$$\Sigma=L_1+L_2=\alpha K^2+\beta K+\gamma$$

حال اگر درمدت پرواز هواپیما که از چند کیلو متر قبل و بعد از صفحه (S_2S_1) ادامه مییابد در هر دو ثانیه یک اندازه‌گیری انجام دهیم وشماره اندازه‌گیری‌ها بترتیب ۱ و۲ و۳ . . . n باشد خواهیم داشت.

$$\begin{cases} \Sigma_1=\alpha\times 1^2+\beta\times 1+\gamma \\ \Sigma_2=\alpha\times 2^2+\beta\times 2+\gamma \\ \cdots\cdots\cdots \\ \Sigma_n=\alpha\times n^2+\beta\times n+\gamma \end{cases}$$

بسهولت دیده میشود که اولاً نقطه برخورد هواپیما با صفحه قائم (S_1S_2) در محلی است که (Σ) مینیمم باشد . بعبارت دیگر $\frac{d\Sigma}{dK}=0$ و ازآنجا $K=-\frac{\beta}{2\alpha}$ درثانی چون تعداد معادلات Σ بیشتر از سه عدد است و مقادیر Σ دارای خطا میباشند لذا برای محاسبه مقادیر α و β و γ بطریقه کمترین مربعات عمل میکنند یعنی جمله :

$$\varphi=(\alpha\times 1^2+\beta\times 1+\gamma-\Sigma_1)^2+(\alpha\times 2^2+\beta\times 2+\gamma-\Sigma_2)^2+\cdots+(\alpha n^2+\beta n+\gamma-\Sigma_n)^2$$

را مینیمم میسازند و برای این منظور باید سه مشتق زیرکه سه معادله خطی هستند برابر صفرگردد.

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\alpha}=0 \quad ، \quad \frac{\partial\varphi}{\partial\beta}=0 \quad و \quad \frac{\partial\varphi}{\partial\gamma}=0$$

با حل‌سه‌معادله خطی مذکور بهترین مقادیر (α و β و γ) بدست خواهند آمد وبوسیله آنها مقادیر p و q و r و بالنتیجه مختصات نقاط (S_1 و S_2) و همچنین فاصله آنها را حساب میکنیم و برای امتحان صحت عملیات مقدار Σ_m را برای ($K_m=-\frac{\beta}{2\alpha}$) که مینیمم حاصل جمع طولهای L_1 و L_2 است حساب میکنیم و چون هر دو ثانیه یک اندازه‌گیری انجام شده است لذا با مقایسه مقدار K_m مذکور فوق با عدد K مربوط

باندازه گیری‌ها که تقریباً برابر آن باشد (Σ) مربوط را که مستقماً اندازه گیری شده است بدست میآوریم که باید باتقریب کافی برابر Σ_m حساب شده باشد .

درین روش خطای مطلق اندازه گیری طول در حدود سه الی ده متراست وبنابراین حداکثر خطای نسبی برای فاصله ۱۰۰ کیلومتر برابر $\frac{۱}{۱۰۰۰۰} = \frac{۱۰}{۱۰۰۰۰۰}$ خواهد شد و بالنتیجه برای ازدیاد دقت باید فواصل نقاط را بیش از ۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفت.

روش دیگری که برای اندازه گیری فاصله های کمتر از ۱۰۰ کیلومتربکار میرود استفاده از ژئودیمتر است (géodimètre) که اصول آن یک موج نوری مودوله بوسیله سلول کر (Cellule de Kerr) با بسامد ۳۰ مگا هرتز میباشد ($۱۰^۶$ هرتز) .

این سلول در حقیقت یک جسم قطبی است که دریک میدان الکتریکی متناوب قرار گرفته و باعث انکسار مضاعف میشود این نور پس از برخورد بایک آینه یامنشور باز تابنده واقع درایستگاه فرعی به‌دستگاه فرستنده ایستگاه اصلی باز میگردد و اختلاف فاز حاصله از موجهای رفت و برگشت فاصله بین دو ایستگاه را بدست خواهد داد . حداکثر برد دستگاه ۲۰ کیلومتر است که باید در شرائط مساعد جوی با امکان دید نقاط ایستگاه صورت گیرد .

دقت اندازه گیری دستگاه فوق‌الذکر فوق‌العاده زیاد و در حدود ($۲^{Cm} \pm ۲ \times ۱۰^{-۶} D$) است که بسهولت به رقم $\frac{۱}{۵۰۰۰۰۰}$ میرسد . (D فاصله بین دو ایستگاه است) این دقت از یک طرف مرهون بسامد زیاد مودولاسیون میباشد که واحد طول موج اندازه گیری آن ۵ متر میشود وچون میتوان دور مربوط به‌طول موج راتا $\frac{۱}{۱۰۰}$ بسهولت اندازه گرفت لذادقت‌اندازه گیری به‌حدود ۵ سانتیمتر خواهد رسیدوازطرف‌دیگرمرهون شناسائی سرعت انتقال نور درهوا بادقت کافی‌است زیرا پارامترهای مربوط به حرارت وفشار هوا را میتوان بسهولت و بادقت اندازه گیری نمود وپارامترمربوط به اثر وجود بخار آب درهوا هم بسیار ناچیز میباشد .

دستگاه دیگر اندازه گیری فاصله ها تلورومتر (Telluromètre) میباشد که اصول آن استفاده از یک موج رادیوئی الکترو مغناطیسی بابسامد ۳ الی ۱۰ مگا هرتز است .

دستگاه فرستنده و بازتابنده مشابه یکدیگر بوده وبرد دستگاه تا حدود ۵۰ کیلو متر میباشد .

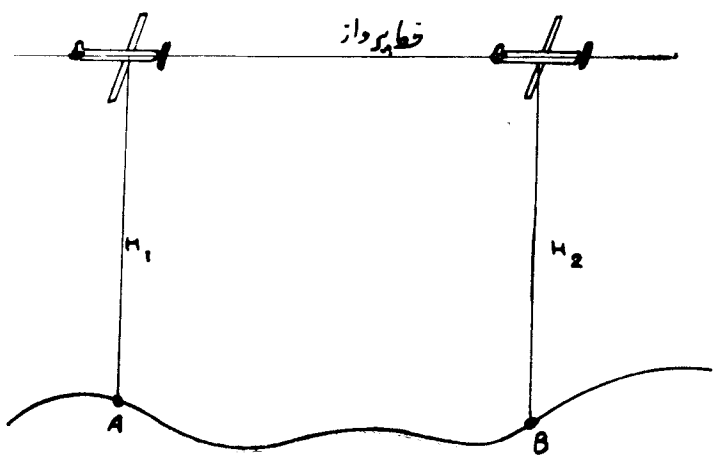
دقت اندازه گیری دستگاه بشرط اینکه در فاصله بین دو ایستگاه هیچ نوع مانعی موجود نباشد در حدود $۵^{Cm} + ۳ \times ۱۰^{-۶} \times D$ است زیرا علاوه براینکه بسامد مودولاسیون کمتراز ژئودیمتراست وجودبخارآب درهوا درسرعت انتشار امواج‌رادیوئی اثر زیادی‌دارد که تعیین‌آن درطول مسیربسیار مشکل وتقریبی‌میباشد .

وسیله دیگر اندازه گیری دقیق فاصله ها مکومتر (Mékomètre) است که نمونه های جدید آن با اشعه لازر (Laser) هلیوم نئون کار میکند این اشعه پس از قطبی شدن با بسامدی برابر ۶ ژیگاهرتز ($۱۰^۹$ هرتز) مودوله میگردد و بنابراین طول موج نوسان مربوطه برابر $۵^{Cm} = \frac{۳۰ \times ۱۰^۹}{۶ \times ۱۰^۹}$ خواهد شد . اشعه قطبی شده پس از برخورد به بازتابنده ایستگاه گیرنده بطرف ایستگاه فرستنده برمیگردد و پس از عبور

از یک قطبی ساز دیگر تشکیل امواج ایستنده میدهد که بسهولت میتوان نقاط خاموش یا گره‌های آنرا تعیین کرد. دقت تعیین نقاط خاموش ممکن است تا $\frac{1}{1000}$ طول موج اشعه مورد بحث یعنی $\frac{1}{20}$ میلیمتر برسد.

بدیهی است در محاسبات مربوطه باید تغییرات پارامترهای حرارت و رطوبت وبخار آب را در نظر گرفت و درنمونه های جدید مکومتر این پارامترها بطور خودکار تصحیح میشود باین ترتیب که حفره‌نوسان ساز محرك امواج مودولاتور به یک حفره نوسان ساز دوم که ابعاد آن با پارامترهای جو تغییر میکند مربوط شده که طول موج مودولاسیون را همواره ثابت نگاه میدارد و بالنتیجه اندازه گیری‌ها دیگر تابع شرائط جوی نخواهد بود و بااین روش فاصله بین نقاط بادقت فوق‌العاده زیاد تعیین میگردد. روش دیگری که درایالات متحده امریکا موسوم است استفاده از دو تیغه اشعه لازر با دوطول موج مختلف میباشد وچون ضریب انکسار نور جو تابع طول موج است لذا تأثیر پارامتری‌های جو در روی دو دسته اشعه مزبور مختلف خواهد بود واز تفاوت دو اندازه گیری اثر پارامترها را محاسبه وجبران مینمایند.

یک مورد استفاده جالب از اشعه لازر در تعیین نیمرخ طولی زمین میباشد. دستگاه مربوط باین اندازه گیری موسوم به ژئودولیت (géodolite) است که درکف هواپیمای مخصوص سوار میشود و در امتداد خط پرواز ارتفاعات H را اندازه گیری مینماید ومیتوان با توجه به سرعت زیاد نور با مقایسه سرعت هواپیما ارتفاعات را بسیار نزدیک بهم اندازه گرفت.



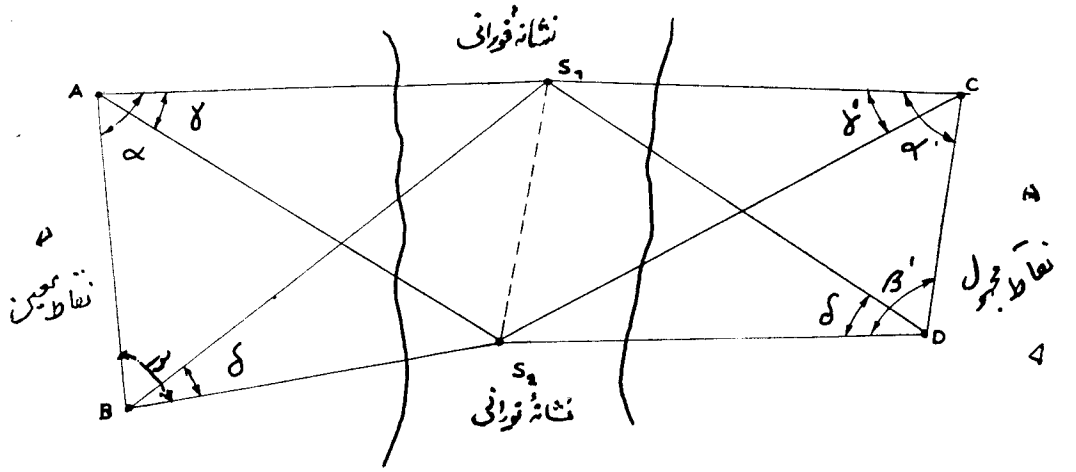
(شکل ٤)

دقت این اندازه گیری بدلیل آنکه برگشت اشعه بدون بازتابنده صورت میگیرد زیاد نیست معذالک با کمک یک فراوان ساز فتونی (Photomultiplicateur) که اشعه بازگشته را تقویت مینماید میتوان ارتفاعات را بادقت تا حدود یک متر تعین نمود.

آخرین روشی که درایالات متحده امریکا برای اندازه گیری فوق‌العاده دقیق فاصله بکار رفته استفاده از انترفرومترلازر (Intérférometre-Laser) میباشد انترفرومترلازر از نوع میکلسون (Michelson) با بازوی دراز است که ازیک لوله خالی ازهوا بطول ٥ کیلومترتشکیل شده - در این دستگاه یک تیغه نور لازر به‌دونیم

تقسیم میشود که نیمی ازآن مستقیماً به یک(نوسان یاب) (Détecteur) برخورد میکند و نیم دیگرپس ازعبور از لوله خالی از هوا پس از برخورد به یک آئینه بازتابنده به نوسان یاب باز میگردد و درنتیجه یک ردیف حاشیه تداخل نور (Frange d'intérférence) که شکل آن تابع طول بازوی دستگاه است تشکیل میگردد که میتوان سینوس و کوسینوس تغییرات شدت نور آنرا بوسیله دو (فراوان سازفتونی) با اختلاف فاز ۹۰ درجه اندازه گرفت و منحنی های لیساژو (Lissajou) مربوط به تغییرات طول بازو را در روی صفحه یک اوسیلوسکوپ (Oscilloscope) مشاهده نمود چون هر دور منحنی لیساژ وبرابر عرض یک حاشیه تداخل است وممکن است موقعیت نقطه معرف را درروی منحنی مزبوربادقت $\frac{۱}{۱۰۰}$ دور کامل آن تعیین نمود لذا میتوان $\frac{۱}{۱۰۰}$ عرض یک حاشیه را تشخیص داد و چون تغییر طول مربوط به عرض یک حاشیه برای نور لازر برابر ۳×۱۰^{-۵} سانتیمتر است لذا میتوان فاصله را بادقت ۳×۱۰^{-۷} سانتیمتر اندازه گرفت که برای طول ۳ کیلو متر باز و دقت نسبی اندازه گیری برابر $(۱۰^{-۱۲})$ خواهدشد وبالنتیجه میتوان بااین روش تغییرات شعاع کره زمین ویاحرکت پوسته آنرا تامیزان چند میکرون تعیین کرد.

قبلاً گفتیم که برای تعیین موقعیت نسبی نقاطی از زمین که دید مشترك ندارند یا بین آنها موانع طبیعی ازقبیل کوه های بلند ویادریاوجوددارد ازنشانه های نورانی مرتفع استفاده میکردند. (Flare Triangulation) این نشانه ها یک نوع چراغ چتردار باروشنی یک ملیون شمع است که بوسیله هواپیما از ارتفاع ۸۰۰۰ متر رها میگردند و ازنقاط (A و B) و (C و D) بوسیله تئودولیت و بطور هم زمان (بادقت $\frac{۱}{۱۰۰}$ ثانیه زمانی) رصد



(ش ۵)

میشوند چون حرکت نشانه های نورانی بدلیل وجود چتر آهسته است و مدت ٤ دقیقه هم میدرخشد لذا میتوان از هر ایستگاه ۵ الی ۲۰ قرائت زاویه انجام داد و زوایای افقی α و β و γ و δ و α' و β' و γ' و δ' را اندازه گرفت بدیهی است در صورتیکه مختصات نقاط A و B معلوم باشند میتوان با کمک این زوایا موقعیت تصویر قائم نشانه ها S_1 و S_2 را حساب کرد وسپس از روی موقعیت این دوتصویر مختصات و موقعیت نقاط جدید را محاسبه نمود.

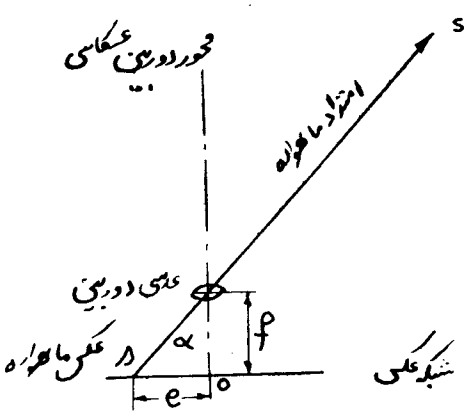
این روش که بنام اتصال (Rattachement) نامیده میشود بدلیل کرویت زمین و کمی ارتفاع نشانه ها

برای فاصله های ۱۰ الی ۲۰۰ کیلومتر قابل اجراست و دارای دقتی در حدود یک متر میباشد .

روشی که امروزه برای اتصال وتعیین موقعیت نسبی نقاط دور دست بکارمیرود استفاده ازماهواره‌های مخصوص ژئودزی فضائی است که از ارتفاع ۵۰۰ الی ۴۵۰۰ کیلومتر عبور میکنند وروز بروز به اهمیت آن افزوده میشود . اصول این اتصال مانند نشانه های نورانی است یعنی به کمک نقاط معلوم زمین ابتدا موقعیت فضائی ماهواره و سپس مختصات نقاط غیر معلوم زمین را حساب میکنند . برای اجرای اتصال دو روش موجود است یکی روشی که طبق آن استداد یا فاصله ماهواره اندازه گیری میشود و معروف به روش استداد میباشد و دیگری روشی که در آن سرعت چرخش ماهواره برگرد زمین انـدازه گیری میگردد و معروف است به روش سرعت .

۱- روش استداد - درین روش ازیک نقطه زمین ازمسیر ماهواره در مقابل صحنه آسمان عکسبرداری میکنند وچون فاصله زاویه‌ای بین ستارگان معروف در هرلحظه معلوم است و عکس موقعیت فضائی ماهواره در مجاورت عکس ستارگان قرار میگیرد لذا وضع نسبی ماهواره نسبت به ستاره گان یک استداد یا یک بردار فضائی تشکیل خواهد داد که بوسیله آن میتوان موقعیت نقطه عکس برداری را تعیین نمود .

برای امکان عکس برداری ازموقعیت یک ماهواره که درحال حرکت است بدنه ماهواره ازیک پوسته



(شکل ۶)

رنگ آلومینیوم که نورآفتاب آنرا درخشان مینماید پوشیده شده وعکس برداری درموقعی انجام میشود که نقطه محل عکسبرداری در تاریکی شب است درصورتیکه ماهواره از نور خورشید درخشان میباشد .

برای آنکه عکس ماهواره بصورت نقاط روشن ودقیق ثبت شود دوربین عکاسی مجهز بیک دریچه چرخان خودکار است که درمدت هرثانیه دهانه دوربین را به مدت $\frac{5}{6}$ ثانیه بسته و $\frac{1}{6}$ ثانیه باز نگاه میدارد و مدت های مذکور بوسیله یک ساعت یا زمان سنج کوارتز بادقت $\frac{1}{1000}$ ثانیه ثابت نگاه داشته میشود بعلاوه مدتی قبل وبعد از عبور ماهواره ازستارگان مجاور مسیر آن به ترتیب فوق الذکر عکس برداری نقطه‌ای میشود و میتوان بوسیله این نقاط محور دوربین عکاسی را در دستگاه مختصات نجومی توجیه نمود .

برای ازدیاد دقت اندازه گیری نقاط عکس ازیک دستگاه مختصات یاب (Comparateur) مجهز به

میکرسکوپ استفاده میکنند که موقعیت نقاط را با دقت ۲ میکرون بدست میدهد و چون ساعت ایستگاه های عکس برداری با دقت $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ ثانیه بوسیله خبرهای رادیوئی تنظیم و تطبیق شده است و فاصله کانونی دوربین هم در حدود ٤ سانتیمتر است لذا استداد وضعیت ماهواره با دقت $\frac{۲}{٤۰۰۰۰}$ برابر $\frac{۱}{۲۰۰۰۰}$ رادیان مشخص میگردد و بالنتیجه موقعیت نسبی نقاط زمین نیز با دقت $\frac{۱}{۲۰۰۰۰}$ تعیین خواهد شد . من باب مثال دقت اتصال دو نقطه از کشور فرانسه که با دونقطه از ناحیه صحرا در افریقای مرکزی بوسیله ماهواره در سال ۱۹٦٤ انجام شده است در حدود ۱۰ متر بوده که باتوجه به فاصله این نقاط که درحدود ۲۰۰۰ کیلومتر میباشد دقت نسبی تعیین موقعیت برابر $\frac{۱}{۲۰۰۰۰}$ خواهد شد .

یک نمونه جدید دوربین های عکاسی ماهواره دارای محور قطبی و حرکت استوائی چرخان است که میتوان چرخش آنرا با دوران ستارگان تطبیق داد و با استفاده از یک آئینه چرخان هم میتوان عکس ماهواره را در یک نقطه شیشه عکس ثابت نگاهداشت و باین ترتیب چون عکس ستارگان و عکس ماهواره هر دو ثابت میماند لذا زاویه مورد نیاز برای محاسبه موقعیت نقطه همان زاویه چرخش آئینه خواهد بود .

یک نوع ازماهواره های مخصوص ژئودزی مجهز بیک دستگاه چشمک زننده نورانی هستند وبدیهی است برای این ماهواره ها دیگر احتیاج به هم زمان ساختن عکسها نیست و فقط کافی است که تصویر مربوط بیک وضعیت نورانی ماهواره را در روی عکسهای ایستگاه های مختلف بدرستی تشخیص داد .

مدت چشمک نورانی این ماهواره ها در حدود $\frac{۱}{۱۰۰۰}$ ثانیه و تعداد آن ٦۰۰ چشمک در ۲٤ ساعت میباشد دقت اندازه گیری که با این نوع ماهواره ها و بکمک دوربین های عکاسی (Baker Nunn) در ایالات متحده امریکا بدست آمده است تا میزان $\frac{۱}{٥۰۰۰۰}$ میرسد که درنتیجه اندازه گیری امتداد ماهواره ها بادقت بیش از نیم ثانیه انجام میشود .

۲- روش فاصله - درین روش از نقطه زمین یک موج رادار یا یک دسته اشعه تیغه ای لازر بطرف ماهواره فرستاده میشود وزمان رفت وبرگشت آنرا ازروی اختلاف فاز بوسیله یک اسیلوسکوپ تعیین مینمایند. درمورد امواج رادار ماهواره باید بیک گیرنده و باز فرستنده رادیوئی مجهز باشد و میتوان زمان رفت و برگشت خبر را بادقت یکصد هزارم ثانیه و درنتیجه فاصله را بادقت کیلومتر ۳ = $\frac{۳۰۰۰۰۰}{۱۰۰۰۰۰}$ تعیین نمود .

این روش در ایالات متحده امریکا معروف بسیستم سکور (Secore) است که با موفقیت بکار رفته است باین ترتیب که مختصات فضائی ماهواره را برای حداقل سه وضعیت مداری و دو مدار مختلف ماهواره بااستفاده از نقاط معلوم زمین حساب میکنند وازروی این مختصات موقعیت نسبی نقاط مجهول زمین را که فاصله آنها نیز بطور هم زمان از ماهواره ها اندازه گیری شده است تعیین مینمایند .

درین روش کلیه محاسبات که اصول آن تعیین فصل مشترک سه کره است و معروف به روش (Trisphération) میباشد (مراجعه شود به مقاله ژئودزی ماهواره شماره ۵ نشریه دانشکده فنی) بوسیله ماشین های حسابگر انجام میشود واندازه گیری های فاصله وزمان آن نیز بطور خود کار درروی یک نوار مغناطیسی ثبت میگردد ودرصورتیکه تعداد اندازه گیری ها زیاد باشد بااستفاده از روش کمترین مربعات دقت نسبی تعیین موقعیت نقاط

تا حدود $\frac{1}{10000}$ میرسد که تقریباً نصف دقت روش امتداد است.

ماهواره مخصوص روش سکوربوزن. ۲ کیلوگرم وبه‌ارتفاع مداری ۱۲۰۰ کیلومتراست دستگاه گیرنده و باز فرستنده آن دارای باطریهای آفتابی است ومجهز بیک فرمان گیر مغناطیسی میباشد که میتوان بکمک‌آن ماهواره را توجیه‌نمود ودرصورت‌لزوم‌مدار آنرا تغییرداد تعداد اندازه گیری‌ها که‌تماماً روی نوار ثبت میشود برای هرعبوربیش‌ازسی‌هزارعدداست که برای۳عبور ماهواره بیش‌ازیکصد هزارعدد خواهد شدوبالنتیجه‌دقت اندازه گیری‌برابر ۱متر=$\frac{3000}{\sqrt{10000}}$میشود که‌برای‌فاصله ۱۰۰۰ کیلومتریک‌دقت‌نسبی $\frac{1}{100000}$بدست‌خواهدداد.

برای ازدیاد دقت اندازه گیری اشعه تیغه‌ای لازر را بکار میبرند که فاصله را بادقت حدود یک‌متر بدست‌میدهد ولی بدلیل‌عدم اطلاع دقیق از شرائط جوی درارتفاعات زیاد عملاً دقت اندازه گیری در حدود ۵ متر خواهد بود که درنتیجه همان دقت نسبی $\frac{1}{200000}$ روش امتداد را دربرخواهد داشت.

اشکال عمده استفاده از لازر این است که تمام اندازه گیری‌ها باید درآسمان صاف وبدون ابر انجام گیرد درصورتیکه استفاده از رادار درهروضع جوی امکان‌پذیر میباشد بعلاوه اشعه لازر باید بطرف ماهواره بحالت هدف گیری هدایت گردد درصورتیکه امواج رادار احتیاج به هدف گیری ندارد.

۳- روش اندازه گیری سرعت ماهواره - دراین‌روش سرعت شعاعی نسبی ماهواره به وسیله اثردوبلر (Effet Doppler) که اصول آن تغییرات شدت یا بسامد موج رادیوئی یا نوری در حال حرکت است اندازه گیری میشود بدیهی‌است درصورتیکه منبع فرستنده بطرف گیرنده درحرکت‌باشند شدت یا بسامد افزایش و در صورت عکس کاهش خواهد یافت.

و بدیهی است این مرتبه موج رادیوئی یا نوری بوسیله ماهواره به زمین فرستاده میشود و ایستگاه زمینی تغییرات بسامد موج فرستاده را ثبت مینماید و میتوان به کمک آن تغییرات سرعت شعاعی ماهواره را حساب کرد وچون فرمول سرعت شعاعی با توجه به فاصله r ماهواره و نیروی گرانساری زمین به‌صورت:

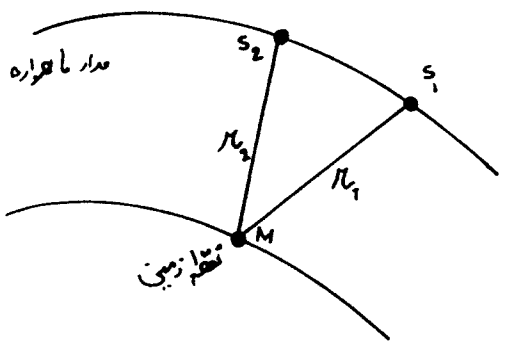
$$v_r = \frac{rd\theta}{dt} = \sqrt{K.M\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}$$

میباشد.

(برای اثبات مراجعه شود به مقاله ژئودزی ماهواره شمارهٔ ۵ نشریه دانشکده فنی) لذا میتوان با اندازه گیری های کافی (هر۲یا۳ثانیه یک‌اندازه گیری) تغییرات‌فاصله ماهواره ازایستگاه‌رابرای هردقیقه‌زمانی با استفاده ازتغییرسرعت حساب نمود. وباین‌ترتیب خواهیم‌داشت $r_1 - r_2 = \Delta V_1$ و $r_2 - r_3 = \Delta V_2$ ۰۰۰۰ بنابراین‌موقعیت‌نقاط زمین درمحل تلاقی‌سطوح هذلولی دوار که کانونهای آن‌وضعیتهای معین‌ماهواره است واقع خواهد بود و برای حل مساله باید حداقل سه جفت نقطه از وضعیت ماهواره در روی دو مدار مختلف در دست داشت بطوریکه دیده میشود محاسبات برخلاف حالات قبل که فقط جنبه هندسی داشت. دراین حالت جنبه دینامیکی یانیروئی دارد وبنابراین دقت اندازه گیری کمتر خواهدشد. یگانه مزیت روش سرعت‌شعاعی سادگی و سبکی دستگاههای اندازه گیری است.

ولی در مقابل ممکن است خطاهای بزرگی در اثر عدم شناسائی قوانین انکسار امواج در قشرهای فوقانی (یونوسفر و تروپوسفر Troposphère و Ionosphère) در محاسبات وارد گردد .

خوشبختانه انکسار پذیری امواج الکترو مغناطیسی در یونوسفر به نسبت عکس مربع بسامد موج میباشد بنابراین با بکار بردن چند موج با بسامدهای مختلف میتوان اثر انکسار قشر یونوسفر را تعیین و از محاسبات حذف نمود . معذالک چون قانون مذکور فوق تقریبی است لذا همواره مقداری خطای اضافی انکسار موج باقی میماند که برابر تقریباً ۵ متر خطای تعیین موقعیت ماهواره میباشد .



(ش ۷)

امروز با مطالعه در روی مدل یونوسفر و تروپوسفر راه برای محاسبه ضریب انکسار و تأمین دقت زیادتری باز شده و میتوان درنتیجه این مطالعات خطاهای اضافی را تا ٪ ۹۰ کاهش داد .

توضیحاً اضافه میشود که تروپوسفر اولین قشر جو درمجاورت زمین است ویونوسفر قشر سوم جو است که مدار اکثر ماهواره‌ها برفراز آن قرار دارد و دارای خاصیت باز تابش برای امواج الکترومغناطیس میباشد وهرچه بسامد امواج زیادتر باشد قدرت نفوذ آن در یونوسفر زیادتر وضریب انکسار کمتر خواهد بود .

یک راه حل برای کم کردن خطای انکسار امواج در یونوسفر بکار بردن امواج با بسامد بسیار زیاد است که درمورد ماهواره (ژئو A) به تقریباً (۱۰۰۰ مگاهرتز) میرسد .

بطور کلی با اندازه گیری‌های زیاد و بکار بردن امواج با بسامدهای مختلف میتوان دقت تعیین نقاط زمین را به ۱۰ متر رسانید که برای فاصله‌های حدود ۱۰۰۰ کیلومتر دقت نسبی اندازه گیری برابر $\frac{۱}{۱۰۰۰۰۰}$ خواهد شد .

بطور خلاصه اینطور به بنظر میرسد که بین روشهای مذکور فوق روش امتداد بادقت نسبی $\frac{۱}{۵۰۰۰۰۰}$ ازسایر روشها دقیق‌تر است زیرا دقت روش فاصله‌یابی هیچگاه از $\frac{۱}{۲۰۰۰۰۰}$ و دقت روش سرعت شعاعی هیچگاه از $\frac{۱}{۱۰۰۰۰۰}$ تجاوز نمیکند .

معذلک دو روش اخیر به‌دلیل آنکه بیشتر بامحاسبات خود کار الکترونیکی جور می‌آیند واشکالات تشخیص نقاط عکس به وسیله میکروسکوپ را نیز در بر ندارند مورد توجه زیادتری میباشند مخصوصاً که روش امتداد از نظر عکس‌برداری مستلزم آسمان صاف و بی ابر در تمام ایستگاههای اندازه گیری است که کمتر اتفاق میافتد .

یکی از مزایای روش امتداد این است که خطاهای انکسار نور عملاً ازبین میروند زیرا اثر انکسار نور جو در شعاع نورانی ستاره و ماهواره تقریباً یکسان است وبنابراین باوجود انکسار نور زاویه ثبت شده در روی شیشه عکس تقریباً زاویه صحیح امتداد میباشد و اثر انکسار اضافی جو ماوراء ماهواره هم‌مخصوصاً در مورد ماهواره‌های بلند گذر بسیار ناچیز و قابل اغماض است - در صورتیکه اثر انکسار موج الکترومغناطیس در قشرهای تروپوسفرو یونوسفر بسیارقابل ملاحظه و خطای مربوط به آنها از ۰.۵ متر متجاوز میباشد.

روشی که امروزه بیش از سایر روشها از لحاظ دقت مورد توجه است ، بکار بردن تیغه‌های بسیار نازك لازر قوی با نوسان کوتاه میباشد که میتوان بوسیله آن فاصله نقطه زمین تا ماهواره را بادقت ۲ متر تعیین نمود، ولی هدف گیری‌وفرستادن چنین تیغه‌ای به‌طرف ماهواره چرخنده هنوزکار دشواری بنظر میرسد.

از طرف دیگر چون خطای مطلق dr اندازه گیری فاصله بوسیله امواج رادیوئی یا نوری ثابت وتابع دستگاههای اندازه‌گیری میباشد لـذا برای افزایش دقت نسبی $\frac{dr}{r}$ بهتر است که از ماهواره‌های بلند گذر استفاده کرد.

بعلاوه چون بهترین نوع مثلث از لحاظ دقت محاسبه شکل متساوی‌الاضلاع است لذا باین نتیجه میرسیم که باماهواره‌های بلند گذرمثلث بندیهای عظیم دقیق‌ترند ولی درمقابل تعداد نقاطی که بدین ترتیب بدست میآید بسیار محدود خواهد بود.

انستیتیوی جغرافیائی فرانسه (I.G.N) ازسال ۱۹۶۰ دست بکار اندازه گیریهای ژئودزی فضائی شده ویک شبکه مثلث‌بندی که طول اضلاع آن ۱۰۰۰ الی ۲۰۰۰ کیلومتراست برقرار نموده که دقت‌تعیین نقاط آن درحدود ۰.۵ متر ودقت نسبی آن حداکثر $\frac{1}{500000}$ میباشد.

وسائل کار دوربینهای عکاسی بالیستیک بـا فاصله کانونی ۰.۳ سانتیمتر با دریچه خودکار چرخان و زمان سنج بادقت $\frac{1}{1000}$ ثانیه‌برای هم‌زمان سازی عکس‌برداریها ودستگاههای اندازه گیری‌فاصله وماشینهای حسابگرالکترونیک لازم برای محاسبات است.

بعداً بتدریج وسائل و روش اندازه گیری تکمیل گردیده و درسال ۱۹۶۶ بین فرانسه و افریقای شمالی یک شبکه اتصال فضائی برقرارگردید که دقت اندازه‌گیریها تاحدود چند متر میرسد.

ضمناً ازسال ۱۹۶۶ یک‌همکاری فنی برای اجرای شبکه مثلث بندی فضائی‌اروپائی بین کشورهای اروپای غربی شروع شده است که طرحهای خودرا زیر نظرکمیسیون بین‌المللی ماهواره‌های ژئودزی به‌موقع عمل‌میگذارد ومرکز کلیه‌محاسبات مربوطبه‌این‌شبکه اروپائی در رصدخانه (Smithsonian) درانگلستان‌است.

بعلاوه به منظور اجرای اتصالهای دور دست بین فرانسه و صحرای مراکش درسال ۱۹۶۶ یک ماهواره بلند گذر بارتفاع ۴۵۰۰-۴۰۰۰ متر در مدارگذاشته شده است کـه نتیجه انـدازه‌گیری بوسیله آن بسیار رضایتبخش بوده است.

ازسال ۱۹۶۷ یک‌برنامه وسیع‌شبکه عظیم‌اتصال‌بین‌اروپا - افریقا وآمریکاطرح وشروع به‌اجرای‌آن شده است وفعلاً استقرار پایه این‌اتصال عظیم برای عبور از اقیانوس اطلس در داکار (Dakar) وکادیکس

(Cadix) در دست اقدام میباشد.

دراین طرح با توجه به فاصله‌های زیاد (۳۰۰۰ الی ۵۰۰۰ کیلو متر) فقط ماهواره پاژو (Pageos) قابل استفاده است که ارتفاع مدار آن در حدود ۴۰۰۰ کیلو متر میباشد.

یک طرح جالب دیگر اتصال عمومی شبکه‌های ژئودزی کشورهای مختلف جهان است که زیر نظر سازمان ژئودزی ایالات متحده آمریکا Coast and geodetic surveys در دست اجرا میباشد.

دراین طرح روش اندازه گیری تعیین امتداد ماهواره است که به کمک دوربین عکاسی بالیستیک (باکرنون Baker-Nvnn) صورت میگیرد و هر شیشه عکس شامل ۱۵۰ موقعیت ستارگان و ۸۰۰ تصویر ماهواره است. وبالنتیجه دقت اندازه گیریها بدلیل کثرت تعداد ممکن است به $\frac{1}{3}$ ثانیه یعنی حداقل $\frac{1}{500000}$ برسد نقطه‌ای که درکشور ایران برای اتصال به شبکه‌های جهانی درنظر گرفته شده نزدیک شهر مشهد قرار دارد.

یکی دیگر ازمزایای اتصال دقیق بوسیله ژئودزی ماهواره مطالعه جزر و مد زمین سواحل اقیانوسها است که در حدود چند سانتیمتر در سال میباشد زیرا با روشهای قدیمی که دقت تعیین وضعیت نقاط زمین از ۳۰ متر تجاوز نمیکرد چنین مطالعه‌ای غیر ممکن بود. ولی اکنون که این دقت به دومتررسیده است پس از چند سال اندازه گیری میتوان از وجود حرکات نسبی سواحل اطمینان حاصل نمود.

۴ـ رابطه بین ناهمواری‌های مدار وشکل زمین ـ بموازات اندازه گیریهای ژئودزی مطالعاتی در روی میدان گرانساری زمین ازروی ناهمواریهای مدار ماهواره‌ها شروع شده است که آتیه بسیار درخشانی را از لحاظ امکان تعیین شکل حقیقی زمین همراه دارد.

راجع به استفاده از ماهواره بمنظور تعیین شکل زمین باید ناهمواریهای مدار آنرا مورد مطالعه قرار داد و این ناهمواریها را با اندازه گیری (g) نیروی گرانساری نقاط زمین مقایسه کرد. زیرا بطوریکه قبلاً گفته شد شکل ژئوئید بسیار نزدیک بیک بیضوی دوار میباشد و این سطح هم بنوبه خود بسیار نزدیک بیک سطح کروی بشعاع (r) است بنابراین پتانسیل میدان گرانساری دریک نقطه بفاصله r ازمرکز زمین بصورت یک تابع گسترده از توانهای افزاینده $(\frac{a}{r})$ خواهد بود و درهرجمله آن $(\frac{a}{r})^n$ دریک چند جمله‌ای لوژاندر (Legendre) از درجه (n) ضرب میشود ودارای یک ضریب J_n است که نسبت به n بشدت کم شونده میباشد.

بدیهی است نصف‌النهار سطح ژئوئید به تدریج که n افزایش میابد بشکل بغرنجتری در میآید و در هرحال چون شکل ژئوئید نزدیک به بیضوی دوار است لذا ضریب J_2 بامقایسه ضریب‌های درجه بالاتر مقدار بسیار زیادی دارد که تقریباً ۵۰۰ برابر J_3 و ۱۰۰۰ برابر J_4 است.

مقدار J_2 مذکورفوق رابدلیل اهمیت بنام (ضریب بیضی شکلی ژئوپتانسیل) (Ellipticité Géopotentielle) نامیده‌اند که تابع لنگرهای ماند بیضوی است.

مقدار J_2 طبق آخرین محاسبات برابر $(1082/7 \times 10^{-6})$ است بدیهی است اگرضرائب J برابرصفر بود شکل زمین کروی و مدار ماهواره بصورت یک بیضی کامل ثابت در میآید که مرکز زمین همواره یکی از کانونهای آن میبود و وجود ضرائب J یعنی اختلاف شکل زمین با کره موجب ناهمواریهای مدار ماهواره میشود.

توضیحاً اضافه‌میشود که‌لنگرهای‌ماندبیضوی‌مقایسه به‌ترتیب A و B و C و ضریب J_2 هم‌به‌شکل:

$$\frac{K}{r^3}\left[\frac{C-A}{2}(1-3\cos^2\beta)\right]$$

میباشد که درآن :

$$A=\int_M (V^2+W^2)dm \quad B=\int_M (U^2+W^2)dm \quad C=\int_M (U^2+V^2)dm$$

$$U=r\sin\beta\cos\lambda$$

$$V=r\sin\beta\sin\lambda \qquad \text{و همچنین}$$

$$W=r\cos\beta$$

$$\beta=\frac{\pi}{2}-\varphi$$

λ زاویه طول جغرافیایی φ زاویه عرض جغرافیایی مربوط به یک شعاع r میباشد.

باتوجه به‌عدم تقارن میدان گرانساری شکل مدار دائماً درتغییر بوده وصفحه مداری نیزتغییرمکان میدهد باین‌ترتیب که خط‌گره‌ها یعنی فصل مشترك صفحه مداری و صفحه استوای زمین درجهت مخالف چرخش زمین جابجا میگردد این تغییر مکان درحدود ۳ الی ٤ درجه در روز است وباکمک قوانین مکانیک جهانی میتوان مقدار این تغییرات را که تابع ضرائب (J) است حساب کرد و بالنتیجه شکل ژئوئید را از روی تغییرات وناهمواری مدار تعیین نمود . بعلاوه میتوان از این محاسبات شتاب استوائی گرانساری زمین و همچنین خروج از مرکز شبه بیضوی زمین را بدست آورد که طبق آخرین محاسبات برابر :

$$e=\frac{1}{298{,}25} \quad \text{و} \quad g_E=978{,}031 \text{ گال}$$

میباشد .

مقدارضریب J_3 هم برابر $(-2{,}45\times10^{-6})$ است که درحدود $\frac{1}{500}J_2$ است و شکل گلابی مانند زمین که سرآن به سمت قطب شمال است مربوط باین ضریب میباشد.

بعلاوه درنتیجه مطالعه درروی ضرائب J معلوم‌شده است که ژئوئید یک‌سطح دوارنبوده واستوای آن نیز بشکل بیضی است که خروج ازمرکز آن درحدود $\frac{1}{50000}$ است و قطرکوچک آن بااختلاف ۱۲ متر درطرف اقیانوس هند قرار دارد و بعلاوه محور نصف‌النهارها نیزکاملاً ازقطبها نمیگذرد و درحدود ۲ متر ازقطب حقیقی فاصله دارد همچنین ازمطالعه دگرشکلی وناهمواریهای مدار ماهواره‌هامیتوان فشردگی $\frac{a-b}{a}$ و تغییرات نیروی گرانساری زمین را نسبت بعرض جغرافیائی نیز تعیین نمود . زیرا بطوریکه میدانیم شدت نیروی گرانساری در روی بیضوی مقایسه بوسیله فرمول :

$$\gamma=\gamma_0(1+\beta_1\sin^2\varphi-\beta_2\sin^2 2\varphi)$$

بدست‌میآید که درآن ۲۰ شدت‌نیروی مزبور دراستوا است که بادقت‌تعیین‌شده و $\hat{\varphi}$ هم زاویه عرض‌جغرافیائی محل میباشد وضرائب β_1 و β_2 را هم که تابع فشردگی زمین است میتوان حساب نمود.

امروزدقت گرانسنج‌ها تا $\frac{1}{100}$ میلیگال‌میرسد واندازه گیری‌های‌نیروی گرانساری‌علاوه برجنبه‌پژوهش علمی مبنای شناسائی کانسارها و ذخیره‌های نفتی میباشد و برای اطمینان باندازه‌گیری‌ها لازم است که بین ایستگاه‌های مختلف به‌کمک مقدار (g) که بوسیله قانون سقوط آزاد $h=\frac{gt^2}{2}$ بدست میآید مقیاس گرانسنج را تنظیم نمود.

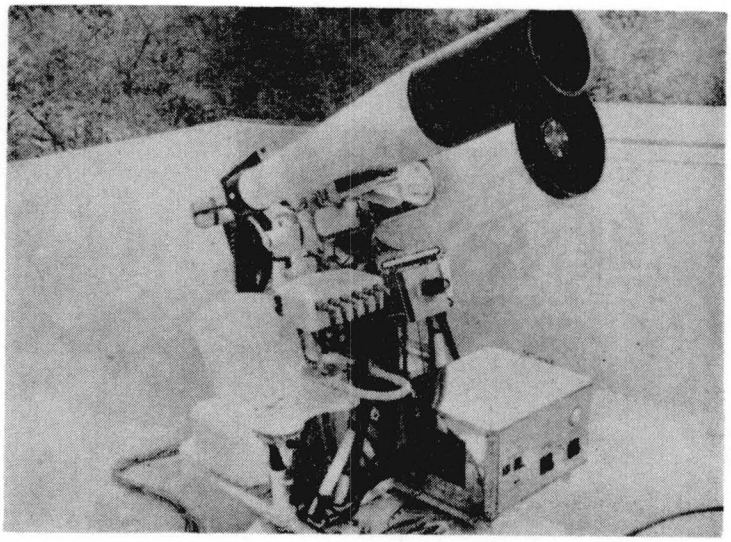
باوجود تمام این احتیاطات دقت تعیین نیروی گرانساری از $\frac{1}{10}$ میلیگال تجاوز نمیکند.

بعلاوه بطوریکه‌قبلاً گفته‌شد بکمک اندازه‌گیری‌های نیروی گرانساری میتوان با روش‌مولودنسکی (Molodensky) چگالی پوسته‌های زمین را بدست آورد و از روی آن پتانسیل ناهموار ساز میدان گرانساری کامل زمین را حساب کرد. شناسائی این‌میدان برای‌محاسبه ژیرسکوپ‌ها وشتاب‌سنج‌های سفینه‌های فضائی لازم میباشد ومیتوان برای اصلاح‌حرکت این سفینه‌ها با استفاده ازمیزان دقیق نیروی گرانساری جهت‌گیری آنها را خودکار ساخت.

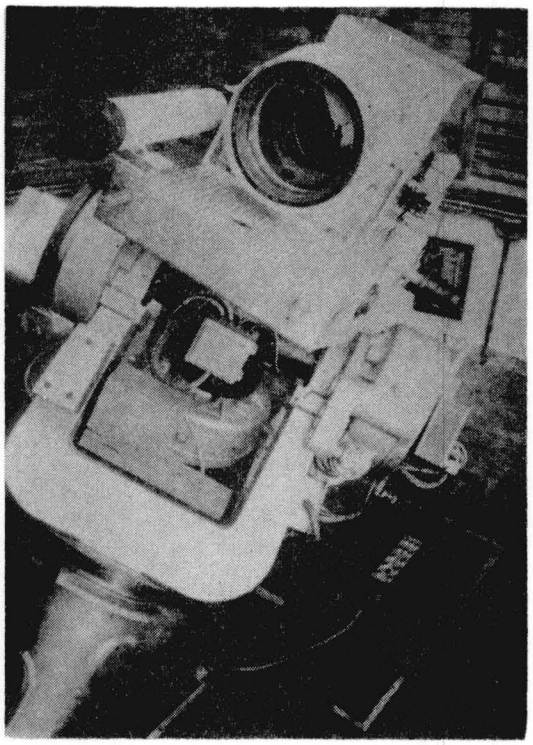
توضیحاً اضافه میشود که شتاب سنج یا (Accélerométre) دستگاهی‌است که از یک وزنه و دو فنر تشکیل‌شده ودراثرنیروی شتاب دهنده وزنه در جهت عکس حرکت تغییر مکان میدهد و این تغییر مکان را میتوان با تغییر طول‌یک رئوستات (Reostate) اندازه‌گرفت وباوارد کردن جریان ناشی از تغییر طول رئوستات به یک بوئین چرخان انتگرال تغییرات شتاب یعنی سرعت و سپس بوسیله بوبین چرخان دیگری انتگرال تغییرات سرعت یعنی‌فاصله طی‌شده را تعیین کرد برای‌تعیین مقدار دوران زاویه‌ای هم از خاصیت ژیروسکوپ که همواره سعی میکند به‌امتداد اول‌خود بازگردد استفاده میشود وچنانچه این‌دوران تغییر شدت یک‌جریان القائی را تولید نماید میتوان زاویه دوران را اندازه‌گرفت.

این شتاب سنجها مسئول‌اندازه‌گیری شتاب سفینه در جهت حرکت و همچنین بردارهای چرخش و پیچش میباشدکه پس از تبدیل‌آن‌ها بسرعت طولی وزاویه‌ای وفاصله و دوران مقدارآنهارا بطور خودکار با برنامه حرکت مقایسه نموده وناجوریها را اصلاح‌میکند. وبطورکلی بااطلاع دقیق ازمیدان گرانساری کامل زمین و بکمک انتگرال مولودنسکی میتوان برنامه دقیق حرکت سفینه را با تمام تغییراتی که در مسیر باآن روبرو میشود قبلاً تنظیم نمود و بوسیله یک مغز الکترونی که در هرلحظه سرعت و جهت حرکت را بمقدار لازم تصحیح مینماید سفینه را بنقطه مقصد راهنمائی کرد.

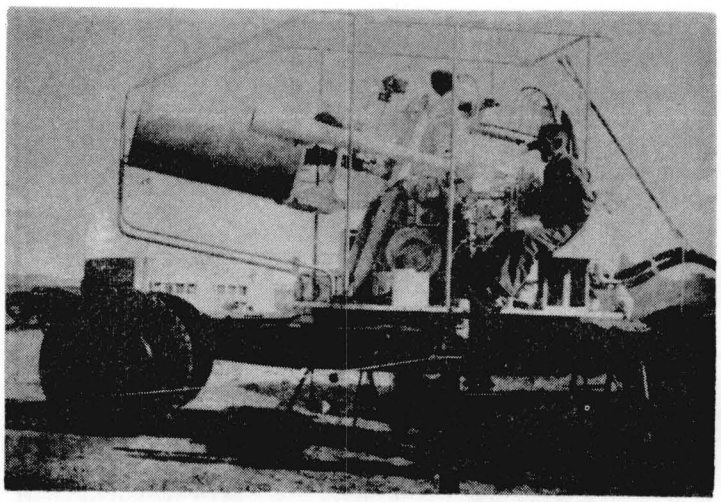
باین ترتیب اهمیت فوق‌العاده تعیین میدان دقیق گرانساری زمین و تشخیص شکل دقیق ژئوئید بخوبی مشهود میگردد که هر دوی آنها نتیجه مطالعه مدار ماهواره‌ها و اندازه‌گیری‌های گران سنجی زمین میباشد.



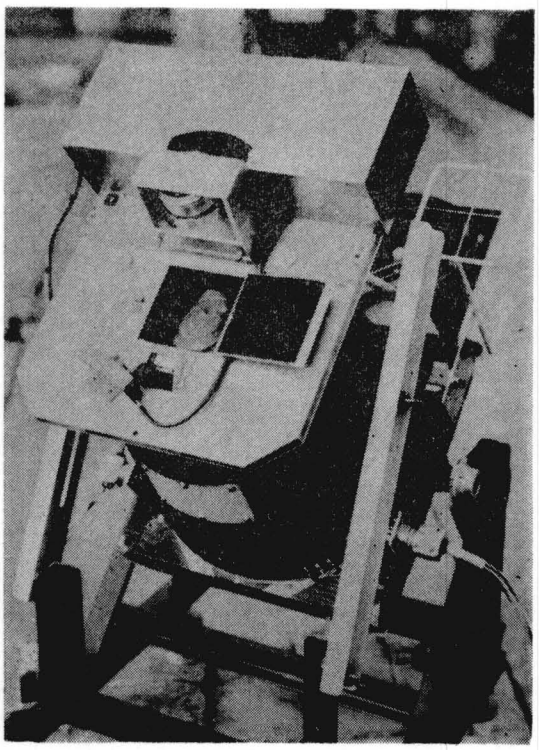
نمای جانبی دستگاه فاصله‌یاب بااشعه لازر



نمای جلودستگاه فاصله‌یاب بااشعه لازر



دستگاه رد گیری و اندازه گیری متحرك با اشعه لازر



دوربین عکس برداری از ماهواره

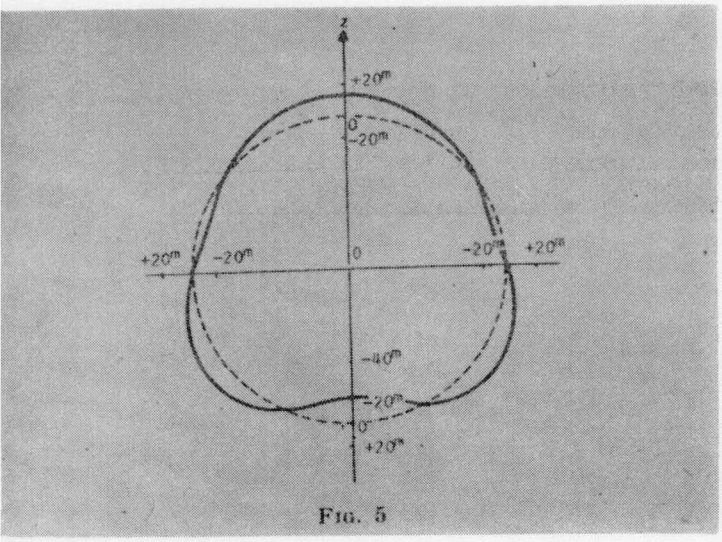
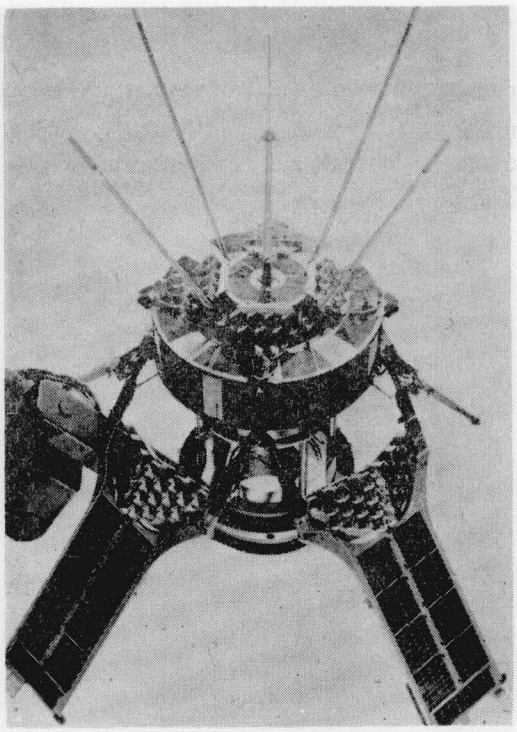
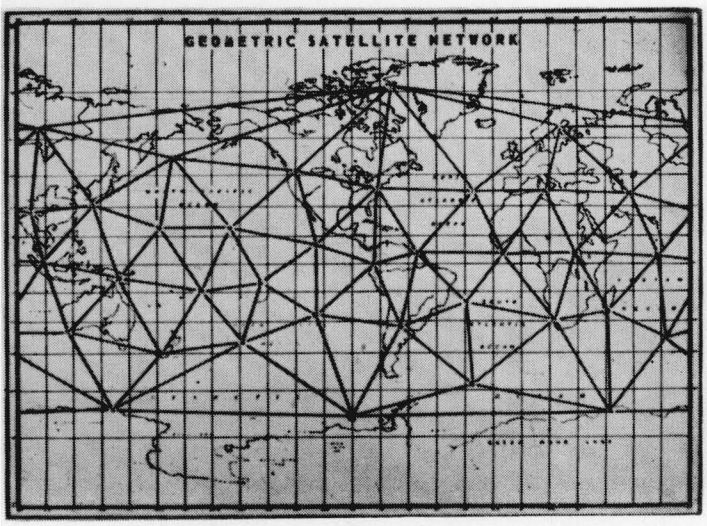


Fig. 5

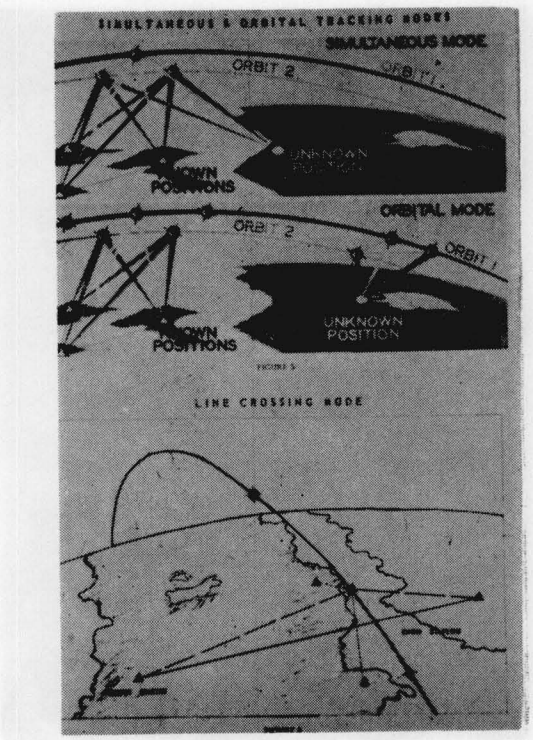
شکل حقیقی زمین که بوسیله اندازه گیری باماهواره بدست آمده است



ماهواره فرانسوی برای اندازه گیری ژئودزی



شبکه ژئودزی جهانی



مدار ماهواره و نقاط اندازه گیری

توضیح :

در موضوع استفاده از روش های ژئودزی فضائی برای اجرای شبکه مثلث‌بندی ایران لازم است باطلاع برسد که هم اکنون اداره جغرافیائی ارتش شاهنشاهی ایران که یکی از سازمان‌های مجهز نقشه برداری کشور میباشد باهمکاری مرکز ژئوفیزیک دانشگاه تهران و سازمان نقشه برداری ایالات متحده امریکا دست بکار رد گیری واندازه گیری‌های لازم در سه ایستگاه واقع درمشهد ـ تبریز ـ زاهدان میباشد تا مختصات دقیق این نقاط نسبت به شبکه ژئودزی جهانی تعیین گردد اندازه گیری‌ها با روش معروف به (سکور) (Secore) که شرح آن درمقاله فوق آمده است انجام میگیرد . و امید است که با تجهیز مرکز تحقیقات فضائی دانشگاه تهران جنبه پژوهشی این همکاری نیز توسعه یابد . بعلاوه سازمان نقشه برداری ایران از محل اعتبارات سازمان برنامه دست بکار تهیه چهار دستگاه دوربین عکس‌برداری از ماهواره شده است که بوسیله آن شبکه ژئودزی ایران را با روش اندازه گیری‌های فضائی تکمیل نماید.