سیستم اندازه‌گیری فواصل خیلی بلندایستگاه‌های زمینی و تعیین موقعیت با استفاده از روش VLBI [1]

مهندس عباسعلی صالح‌آبادی
عضو هیأت علمی دانشکده نقشه‌برداری

مهندس حمید صادقی
کارشناس ارشد دانشگاه علم و صنعت

مهندس حامد صادقی
کارشناسی ارشد سنجش از دور

چکیده

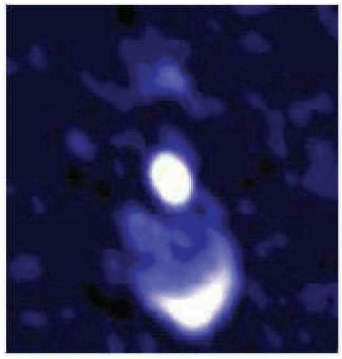
یکی از مسائل مهم در علم مهندسی نقشه‌برداری و یا امور نظامی همواره تعیین نمودن مختصات نقاط در روی زمین است که از روی آن فواصل و زوایا و دیگر پارامترهای مورد نظر هر نقطه تا هدف و یا دیگر نقاط قابل استحصال می‌باشد که برای آن خصوصاً فواصل نزدیک راه‌حل های زیادی از قبیل فتوگرامتری و یا نقشه‌برداری زمینی وغیره وجود دارد. ولی برای فواصل بسیار بلند مثلاً چند هزار کیلومتری بین قاره‌ای بدلیل برقرار نبودن دید مستقیم، این روشها جوابگو نیست. در این مواقع باید از اجرام فضایی ونجومی بدلیل ناچیز بودن فاصله بین قاره‌ای نسبت به آن و نیز برقراری دید همزمان بین دو ایستگاه و جرم فضایی در یک زمان ثابت بهره برد. تحقیق پیش رو روش تعیین موقعیت با استفاده از امواج دریافتی از اجرام فضایی ناشناس را بیان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کوازار، داپلر شیفت، رادیو تلسکوپ، سیستم VLBI.

۱- مقدمه

در سال ۱۹۶۰ با پیشرفت علم نجوم و به تبع آن توسعه دستگاه‌های رادیویی که فرکانس هر ستاره را رصد می‌کرد به فرکانسهایی برخورد شد که از ستاره نبودند و منبع آنها دیده نمی‌شد.

اجرامی که امواج آنها از فاصله بسیار دور فرستاده می‌شدند را کوازار [2] نامیدند. (نگاره ۱)



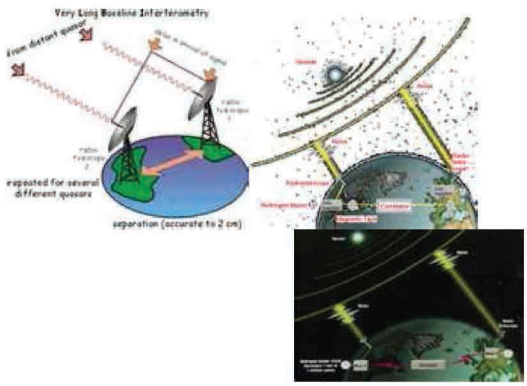
نگاره ۱: تصویری از یک کوازار

این دستگاه‌های گیرنده که دیشهای بزرگ ماهواره‌ای هستند رادیو تلسکوپ نام دارند. (نگاره ۲)

این کشف بلافاصله در امور مربوط به ژئودزی و ژئوفیزیک و تعیین موقعیت به کار گرفته شد.

نگاره ۲: تصویری از رادیو تلسکوپ

این سیستم براساس دریافت امواج رادیویی ضعیف ارسالی از کوازارها توسط دو آنتن سهمی شکل (رادیو تلسکوپ) کار می‌کند. با این مکانیسم که سیگنالهایی که به طرف دو ایستگاه گیرنده که اختلاف فاصله زیادی (بیشتر از ۱۰۰۰ کیلومتر) دارند، فواصل متفاوتی را طی می‌کنند. (نگاره ۳)



نگاره ۳: نشانه روی همزمان دو ایستگاه زمینی با فاصله زیاد به یک کوازار در زمان واحد

به وسیله تداخل امواج رادیویی دریافت شده و یا اندازه گیری اختلاف زمانی دقیق در دو آنتن می‌توان مؤلفه‌های فاصله دو آنتن را در امتداد هر کوازار یافت. در ضمن به جای اندازه گیری اختلاف زمانی می‌توان اختلاف فاز آنها یا داپلر شیفت [3] را بررسی کرد. [۱] مشاهده به هر کوازار یک مؤلفه از سه مؤلفه بازبین دو آنتن را معین می‌کند. بنابراین با چرخش تلسکوپ و مشاهده به کوازارهای مختلف اندازه گیری فاصله دو آنتن به طریقی که گفته خواهد شد به دست خواهد آمد.

به علت دوری بیش از حد کوادزها به ما اولاً از جرم آنها صرف نظر شده و ثانیاً راستای دو آنتن نسبت به کوادز موازی در نظر گرفته می‌شود.

سیگنالهای روی نوار ضبط می‌شود و سپس در محل مرکزی پردازش می‌شوند. پردازشها شامل حذف خطاها و محاسبات عمدتاً مثلثاتی است که به آن در اینجا پرداخته می‌شود.[۲]

۲- انواع خطاهای تأثیرگذار

خطاهای مهمی وجود دارند که باید به طور مساوی در هر دو ایستگاه اعمال حذف شوند مانند خطای اتمسفر و خطای همزمانی ساعتهای محلی و خطاهایی که مربوط به پارامترهای دورانی زمین می‌باشند مانند پرسشن[۴] و نوتیشن[۵].

نوع ساعت استفاده شده سزیمی است که دقت آن ۱ به ۱۰ ثانیه است. همچنین خطای اتمسفر تأخیری در حدود ۱ به 10^{-8} ثانیه ایجاد می‌کند که معادل خطایی حدود ۲/۵ متر است.

دقت اندازه گیری فاصله بین دو ایستگاه مستقل از فاصله چند هزار کیلومتری آنهاست و حدود چند سانتی‌متر است. دقت توجیه آزیموتی و توجیه آنتنها به سمت کوادزها حدود کسری از ثانیه درجه‌ای است.

روش VLBI از دامنه وسیعی از امواج رادیویی که چندگیگا هرتز تا چند مگاهرتز را در برمی‌گیرد استفاده می‌کند.

چون امواج دریافت شده از کوادزها بسیار ضعیف‌تر از امواج ماهواره‌هاست بنابراین جهت دریافت این امواج نیاز به گیرنده‌های بشقابی شکل بسیار حجیم با قطر آنتن چندین متر است.

۳- دیگر کاربردها

مهمترین کاربرد VLBI تعیین موقعیت سه بعدی بسیار دقیق ایستگاه‌های اصلی زمینی (مستر)[۶] است.

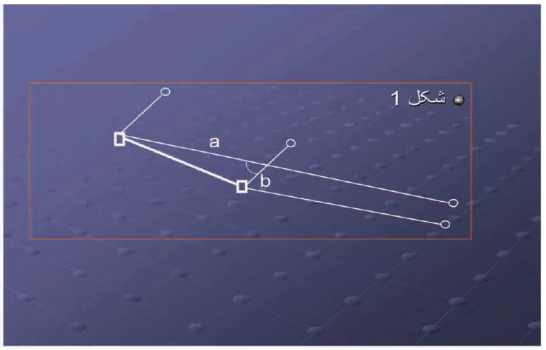
در سیستم GPS پنج ایستگاه مستر که هر ایستگاه در یک قاره می‌باشد وجود دارد که وظیفه Upload و Update کردن اطلاعات صحیح مداری به ماهواره‌های GPS را دارا می‌باشند که موقعیت دقیق آن ایستگاهها با این روش VLBI معین می‌شوند.

از دیگر کاربردهای مهم این روش تعیین پارامترهای دورانی زمین و حرکات پلیتها و پوسته زمین و نیز اتصال شبکه‌های ژئودزی مملکتی و قاره‌ای به یکدیگر و به یک سیستم مختصاتی جهانی مرجع می‌باشد.

۴- روش محاسباتی تعیین موقعیت به روش VLBI

الف)حالت اول (حالت ایده‌آل)

در این حالت فرضی برای تعیین مختصات یک آنتن از روی آنتن دیگر لازم است که سه پارامتر $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ تعیین شوند و با داشتن مختصات سه بعدی ایستگاه تلسکوپ اولیه و یافتن $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ مختصات آنتن تلسکوپ‌های دیگر یافته می‌شود. در روش VLBI برای تعیین موقعیت سه بعدی لازم است که هر دو آنتن به هر سه کوادز متفاوت نشانه روی کنند که در عمل برای بهبود دقت محاسبات به چهار کوادز نشانه روی می‌شود و از روش کمترین مربعات محاسبات انجام می‌شود. در این حالت فرضی در نظر گرفته می‌شودکه سه کوادز مختلف نسبت به دو آنتن گیرنده زاویه ۹۰ درجه داشته باشند. سپس اختلاف زمانی دریافت سیگنال در دو آنتن که اختلاف فاصله را معین می‌کند مشاهده می‌شود که مقادیر مشاهداتی در واقع همان مقادیر $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ خواهند بود. (نگاره ۴)



نگاره۴: نشانه روی از دو ایستگاه به دو کوادز در راستای قائمه

در اینجا اگر اختلاف زمانی که یک سیگنال مشابه از یک کوادز در گیرنده[۷] دو ایستگاه مختلف احساس می‌شود را در سرعت نور ضرب کنیم به مقادیر a و برای کوادزهای دیگر به مقادیر c,b خواهیم رسید.[۳]

ب)حالت دوم (حالت واقعی)

در حالت واقعی کوادزها نسبت به ایستگاه گیرنده زمینی زاویه دقیق ۹۰ درجه را ندارند پس ماجرا به صورت دیگری است و باید به طریق زیر برای یافت مؤلفه‌های باز یعنی اختلافات سه بعدی مختصات $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ اقدام کرد. (نگاره ۵)

ابتدا لازم است که مقدار طول فاصله فضایی بین دو آنتن را حساب کرد:

دو مثلث قائم‌الزاویه $\overset{\Delta}{S_1}mO$ با مثلث S_2no متشابه است زیرا:

$$\left.\begin{array}{l} \hat{O}_1 = \hat{O}_2 \\ \hat{M} = \hat{N} = 90^\circ \end{array}\right\} \Rightarrow \overset{\Delta}{S_1}mo \cong S_2no$$

از حالت تشابه نتیجه می‌شود که زاویه $\hat{S}_1 = \hat{S}_2$ و نیز در مثلث $\overset{\Delta}{S_2}Mj$ مقدار زاویه S_2 طبق قضیه خطوط موازی و مورب برابر $(S_2=90-\theta)$ خواهد بود. $\hat{S}_1=\hat{S}_2=90-\theta$

در مثلث $\overset{\Delta}{O_1}NS_2$ داریم:

$$\overline{OS_2}=\frac{b}{Cos(90-\theta)}=\frac{b}{Sin\theta}$$

و در مثلث $\overset{\Delta}{O_2}mS_1$ داریم:

$$\overline{OM}=a.tg(90-\theta)=a.cot\theta$$

پس طول $\overline{MS_2}$ برابر می‌شود با:

$$\overline{MS_2}=\overline{MO}+\overline{OS_2}$$

$$\overline{MS_2}=a.\cot\theta+\frac{b}{\sin\theta}=\frac{a\cos\theta+b}{\sin\theta}$$

و در نهایت در مثلث $\overset{\Delta}{S_1MS_2}$ طبق قضیه فیثاغورث خواهیم داشت:

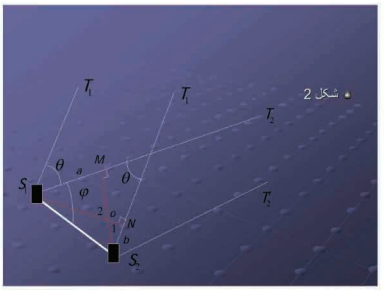
$$\overline{S_1S_2}^2=\overline{S_1M}^2+\overline{S_2M}^2$$

$$\overline{S_1S_2}=\sqrt{a^2+(\frac{a\cos\theta+b}{Sin\theta})}=\frac{\sqrt{a^2+b^2+2abCos\theta}}{Sin\theta}$$

برای درستی این رابطه فرض می‌کنیم دو کواذر نسبت هم زاویه ۹۰ درجه داشته باشند که در این صورت

$$\overline{S_1S_2}=\sqrt{a^2+b^2}$$

که به همان حالت الف خواهیم رسید.



نگاره۵: نشانه روی همزمان از دو ایستگاه به کواذرهایی در راستای دلخواه

بعد از محاسبه فاصله دو آنتن لازم است که برداری یکه در راستای تلسکوپ اول به کواذر اول (e_s) در نظر گرفته شود که این کار به دو صورت امکان‌پذیر است:

۱- روش اول با استفاده از تکنیکهای نقشه‌برداری و دوربین‌های لیزری به دو نقطه در این راستا که یکی مرکز تلسکوپ و دیگری در فاصله‌ای از نقطه اول و در راستای کواذر باشد مختصات داده شود و سپس با داشتن مختصات سه بعدی آنها بردار و اصول را تشکیل داد و بعد آن را یکه نمود:

$$\overrightarrow{S_1T_1}=\Delta x\vec{i}+\Delta y\vec{i} \qquad \frac{\Delta x\vec{i}+\Delta y\vec{i}}{\sqrt{\Delta x^o+\Delta y^o}}:$$

$$(CS)$$

۲- روش دوم این که زاویه تلسکوپ نسبت به صفحه افق و محور شمال قرائت شود که از فرمول زیر بردار واصل به دست آید (بردارهای هادی)

$$\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\ a\ \cos\ \beta\\ \cos\ a\sin\ \beta\\ \sin\ a\end{bmatrix}$$

در مرحله آخر لازم است که حاصلضرب داخلی بردار فوق را در بردار بین دو آنتن $\overrightarrow{S_1S_2}$ بیابیم

$$\overrightarrow{e_s}.\overrightarrow{S_1S_2}=|\overrightarrow{e_s}.|\times|\overrightarrow{S_1S_2}|\times cOS(\theta+\varphi)=\Delta x(\Delta X)+\Delta y(\Delta Y)+\Delta z(\Delta Z)$$

همان طور که از فرمول مشخص است تمامی المانهای فوق معلوم‌اند و فقط سه پارامتر اختلاف مختصاتی دو آنتن $(\Delta X,\Delta Y,\Delta Z)$ که دنبال آنها هستیم مجهول‌اند. پس چون سه مجهول مستقل وجود دارد لازم است که سه معادله مجزا تشکیل دهیم. به عبارت دیگر لازم است که کلیه مراتب فوق برای مشاهده به سه کواذر انجام گیرد که سه معادله تشکیل گردد تا سه پارامتر مجهول به دست آید. در عمل برای افزایش دقت به چهار کواذر قراولروی می‌شود و سپس از روش کمترین مربعات سه مختصات فوق به دست می‌آید و از روی آن می‌توان مختصات نهایی (X,Y,Z) تلسکوپ دوم را به دست آورد. تنها المان باقی مانده زاویه بین دو ایستگاه است (زاویه φ) که با توجه به شکل قبل قابل محاسبه می‌باشد. در مثلث $\overset{\Delta}{S_1MS_2}$ داریم:

$$tg\varphi=\frac{MS_2}{a}$$

$$tg\varphi=\frac{\frac{a\cos\theta+b}{\sin\theta}}{a}=\frac{a\cos\theta+b}{a\sin\theta}$$

$$\overset{\wedge}{\rightarrow}\varphi=T_2S_1S_2=Arctg\frac{a\cos\theta+b}{Sin\theta}$$

۵- نتیجه گیری

برای اندازه گیری طولها و انتقال مختصات در فواصل بسیار دور که امکان برقراری دید مستقیم میسر نیست از روشهای نجومی می‌توان بهره برد که در اینجا به روش VLBI که دقیق‌ترین روش انجام است اشاره شد و محاسبات لازم ذکر گردید. در عمل به دلیل حجم زیاد آنتنهای گیرنده و مشکلات دیگر هزینه‌های این روش بسیار بالاست که این خود یکی از عوامل محدود کننده این روش محسوب می‌شود. روشهای ارزانتری مانند عکسبرداری از آسمان در شب و مقایسه موقعیت ستارگان با جایگاه اصلی آنها در جدول اصلی ستارگان و تعیین موقعیت از روی آن وجود دارد[۴] ولی هیچ کدام از آنها به دقت روش VLBI نیستند که باعث ارزش بیشتر این روش شده است.

منابع

۱- صالح آبادی- عباسعلی- ۱۳۸۱- کتاب ژئودزی به زبان ساده، سازمان جغرافیایی ن.م.

۲- سلیمانی- محمدرضا- ۱۳۸۱- کتاب مخابرات سیار پیشرفته- دانشگاه علم و صنعت.

۳- جی آر- اسمیت- ۱۹۹۰- ژئودزی بدون ریاضیات.

۴- ژرار- مارال- سجاد ازگلی- ۱۳۸۵- کتاب سیستم مخابرات ماهواره‌ها- جلد ۲- دانشکده مخابرات.

پی‌نوشت

1- Very Long Baseline Interferometer

2- Quaser

3- Dopler shift

4- Percition

5- Notation

6- Master Station

7- Reciver