

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2019-03-0256-10

# 卫星共视与基线长度及卫星高度关系的研究

徐磊<sup>1,2,3</sup>, 杨旭海<sup>1,2,4</sup>, 弓剑军<sup>1,2,3</sup>, 刘佳<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 中国科学院 精密导航定位与定时技术重点实验室, 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101048)

**摘要:** 甚长基线干涉测量 (VLBI) 观测技术具有很高的角分辨率、位置分辨率和时延分辨率, 广泛用于航天、天体测量、大地测量、行星科学、卫星导航乃至基础物理等诸多领域。中国科学院国家授时中心建立了我国第一套测地型宽带 VLBI 网, 观测基线长度 4 000 km, 并具备对射电源和卫星的宽、窄带观测能力, 能够自主开展地球自转参数 (EOP) 测定和 VLBI 卫星跟踪观测研究。研究了卫星共视角和卫星高度及基线长度的关系, 在 VLBI 系统在卫星共视方面针对 MEO (medium earth orbit), IGSO (inclined geosynchronous orbit) 可观测时段进行了研究, 对导航卫星, 特别是北斗卫星系统的 VLBI 观测作了可行性进行分析, 为宽带 VLBI 观测系统观测北斗导航卫星提供了技术支持。

**关键词:** 宽带 VLBI 网; 共视角; 基线长度; 卫星高度

## A study on the relationship between satellite's common view, baseline length and satellite altitude

XU Lei<sup>1,2,3</sup>, YANG Xu-hai<sup>1,2,4</sup>, GONG Jian-jun<sup>1,2,3</sup>, LIU Jia<sup>1,2,3</sup>

- (1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Precise Positioning and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101048, China)

**Abstract:** Very long baseline interferometry technology has high resolution for the angle, position and time delay, that has been widely used in aerospace, astrometry, geodesy, planetary science, satellite navigation, and even basic physics. The National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences established the first set of geodetic wide-band VLBI networks in China with base line of 4 000 kilometers. It is capable of measuring both wide-band radio sources and narrow-band man-made signals, i.e., satellites and space craft that can be used to measure the Earth orientation parameters (EOP) and satellite tracking. A scheduling program is developed for scheduling satellites observations. Based on such tool, in this paper, we investigated the relationship between

收稿日期: 2019-01-19; 接受日期: 2019-03-23

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (11173026)

作者简介: 徐磊, 女, 硕士, 主要从事天体测量研究。

satellite common view, satellite altitude and baseline length, especially for the common view of MEOs and IGSOs. The feasibility of tracking navigation satellites with the NTSC VLBI system was studied that that provides technical support for VLBI observation of the Beidou navigation satellites.

**Key words:** broadband VLBI network; common view; baseline length; satellite altitude

## 0 引言

甚长基线干涉测量 (VLBI, very long baseline interferometry) 观测技术有很高的角分辨率, 已渐成常规性技术, 广泛用于航天、天体测量、大地测量、行星科学、卫星导航乃至基础物理等诸多领域。目前, 国际上关于 VLBI 观测导航卫星的研究如 GPS (Global Positioning System, 全球定位系统) 观测已成为热门, 是国际上的技术前沿和研究热点, 实现 GEO (geostationary earth orbit, 地球静止轨道) 卫星机动后快速定轨、改进导航卫星测定轨系统差, 实现多种技术的地面连接具有重要意义<sup>[1]</sup>。VLBI 观测技术的方法和特点, 使观测的分辨率不再局限于单个望远镜的口径, 而是诸多望远镜的距离, 我们称之为由基线的长度所决定的分辨率。中国科学院国家授时中心提出的、具有知识产权的转发式测轨技术有很高的测距精度, VLBI 技术 (测角) 与转发式测轨 (测距) 联合定轨, 提高 GEO 导航卫星精度及机动后轨道快速恢复能力。随着航天技术的发展及我国国力的提升, 我国自主研发的北斗卫星导航系统进展, 本文针对 VLBI 系统在卫星共视方面及 MEO (medium earth orbit, 中圆地球轨道) 卫星, IGSO (inclined geosynchronous orbit, 倾斜地球同步轨道) 卫星, IGSO 卫星可观测时段等进行研究, 拓展 VLBI 跟踪卫星、特别是对北斗卫星系统观测的研究, 对中国科学院国家授时中心宽带 VLBI 观测系统观测同步轨道卫星的可行性进行分析, 为宽带 VLBI 观测系统观测北斗导航卫星提供技术支撑<sup>[2]</sup>。

## 1 背景

高精度的 VLBI 技术在天体测量、大地测量和天体物理领域显示其特有的优势, 特别是对国际天球参考架建立、国际地球参考架建立以及地球定向参数测量起着不可替代的作用。随着导航和测地的需要, 对国际天球参考架、国际地球参考架以及地球定向参数提出了更高精度的要求, 在需求的推动下, 近年国际上提出 VLBI2010 计划, 用小天线、宽频带实现连续测量, 目标大地测量的精度达 1 mm, 天线快速旋转、宽带馈源、高速海量数据传送及存储技术, 由此带来新的技术挑战<sup>[3]</sup>。

借鉴 VLBI2010 技术, 结合我国 GEO 卫星定轨的任务需求, 根据需求我国 VLBI2010 工作频率范围涵盖导航卫星的整个信号 L 频段, 选择工作频率范围为 1~10 GHz, 实现对北斗导航卫星的精密测定轨。中国科学院国家授时中心的 VLBI 系统是我国第一套测地型宽带 VLBI 网, 由吉林、喀什、三亚 3 个测站和西安数据处理中心组成, 图 1 是中国科学院国家授时中心宽带 VLBI 观测网台站分布。3 个观测站一共组成 3 条观测基线, 其中吉林—三亚基线的长度为 4 026 km, 三亚—喀什基线 3 899 km, 喀什—吉林基线 4 082 km, 各测站与数据处理中心之间通过光纤传输观测数据。各测站配备 13 m 天线和宽带接收及记录终端, 并外接高稳定的氢原子钟。采用制冷馈源、宽带相关等技术, 具有对射电源和卫星的宽、窄带观测能力<sup>[4]</sup>。系统主要用于航天器测定轨、测轨系统误差标校、地球自转参数独立自主测定 (特别是世界时 UT1 的测定), 以及支持时空基准的建立和相关科学研究, 以满足国家对地球自转参数 (EOP) 的需求<sup>[5]</sup>。

在测地 VLBI 学术圈, 利用 VLBI 观测导航卫星的研究日趋火热<sup>[6]</sup>。目前已经讨论了卫星轨道与天线网络优化问题以及观测 GPS 卫星的观测纲要问题。L. Plank 的研究表明, 在单次观测时延精度为 30 ps

的前提下，通过每周观测一次导航卫星的方法，可实现毫米级的台站坐标的确定。实测方面，使用了 Onsala（瑞典），Medician（意大利），Wettzell（德国）的天线，已经进行的一组实验<sup>[7]</sup>。这些实验利用 VLBI 观测导航卫星，促进了观测纲要和观测策略的开发；目前，已经可以使用标准的控制程序，实现时长为数小时的此类实验。同样的，此类实验的主要问题是：标准的测地流程不能直接用于此类实验。观测导航卫星与以往观测射电源的观测模型区别较大，卫星观测纲要无法实现自动化等技术的瓶颈使得 VLBI 观测卫星领域的研究也更加的紧迫<sup>[8]</sup>。

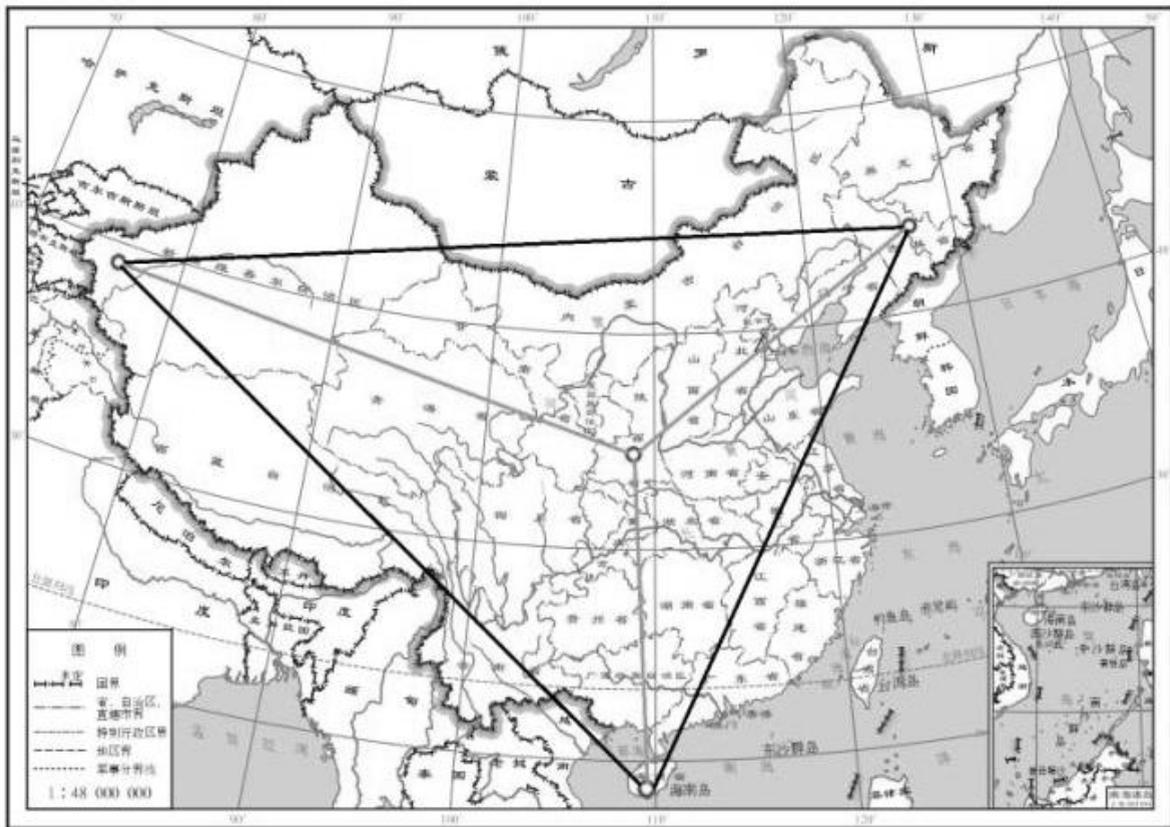


图 1 中国科学院国家授时中心宽带 VLBI 观测网

本文研究卫星共视和卫星高度及基线长度的关系，研究国家授时中心的 VLBI 系统可以观测自然天体和人造天体的条件，对卫星可观测时段和空间位置分布作出分析研究，为中国科学院国家授时中心的 VLBI 系统观测提供技术支撑。

## 2 VLBI 共视观测原理及分析研究

VLBI 系统分辨率取决于基线的长度，基线越长其分辨率越高，但对共视的条件要求越高，研究对卫星、射电源可观测时段和空间位置分布越显重要。

VLBI 测量是测定从观测源发出的信号同一个波前到达 2 个测站间的传递时间之差，因此 VLBI 地面站能测量条件是 2 个测站能同时观测到同一个天体。

图 2 是在地心地固坐标系下测站和卫星位置关系图，其中测站  $i$  坐标经度为  $\lambda_i$ ，纬度  $\varphi_i$ ，地球可以近似为半径为  $R$  ( $R=6\ 400\ \text{km}$ ) 的正圆球体（由于地球为椭球而非正球型，在由地心坐标转换到测站方位俯仰坐标时，采用球型假设会导致高度角零点几度的偏差，球型近似导致的俯仰角偏差大于望远镜的波束，若采用球型近似的俯仰角，会导致望远镜无法正确跟踪目标。但是本文的研究目的，因不要求高

精度，采用正圆球体近似满足分析需求)<sup>[9]</sup>。

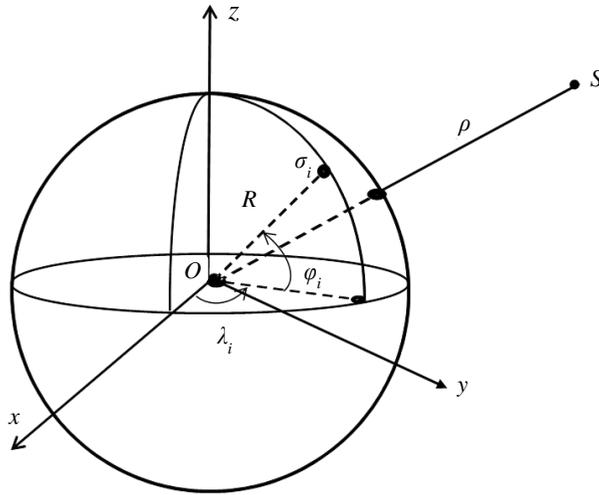


图 2 地心地固坐标系下测站和卫星位置关系图

则测站的地心地固系下的直角坐标可以表示为

$$\vec{r}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} \cos \varphi_i \cos \lambda_i \\ \cos \varphi_i \sin \lambda_i \\ \sin \varphi_i \end{pmatrix}, \tag{1}$$

被观测卫星在地心地固坐标系下的坐标为  $(\lambda_s, \varphi_s, \rho)$ ，其直角坐标为

$$\vec{R}_s = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} \cos \varphi_s \cos \lambda_s \\ \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ \sin \varphi_s \end{pmatrix}, \tag{2}$$

式 (1) 和 (2) 中， $x_i, y_i, z_i$  为测站  $i$  地心地固坐标系下直角坐标； $\vec{R}_s$  为卫星在地心地固坐标系下的坐标向量； $x_s, y_s, z_s$  为卫星在地心地固坐标系下直角坐标； $\rho$  为卫星到地心的距离； $\lambda_s$  为卫星经度； $\varphi_s$  为卫星纬度； $\lambda_i$  为测站  $i$  经度； $\varphi_i$  为测站  $i$  纬度； $\sigma_i$  为测站  $i$  在地球位置。

如果测站天顶方向为  $z$  轴， $x$  轴在测站的子午面内， $\vec{R}_s$  为卫星测站地心坐标 ( $x$  轴指南点， $y$  轴指东点)， $R_y(90^\circ - \varphi_i)$  是沿  $y$  轴的旋转矩阵，图 3 是测站为基准的地平坐标系。

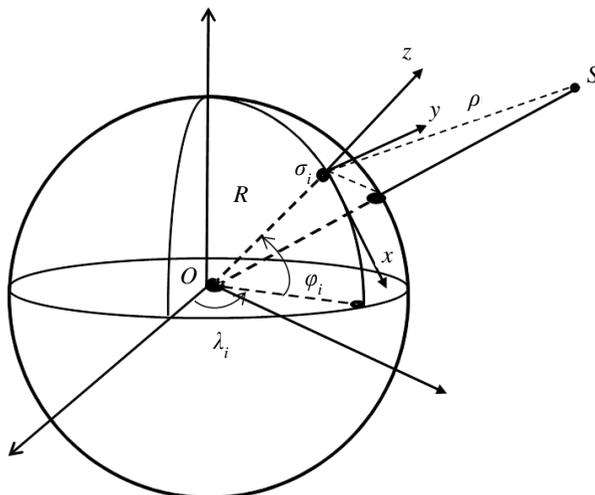


图 3 地平坐标系

$$\begin{aligned} \overline{R}_{s'} &= R_y(90^\circ - \varphi_i) R_z(\lambda_i) \overline{R}_s = \\ \rho &\begin{pmatrix} \sin \varphi_i & 0 & -\cos \varphi_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi_i & 0 & \sin \varphi_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda_i & \sin \lambda_i & 0 \\ -\sin \lambda_i & \cos \lambda_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_s \cos \lambda_s \\ \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ \sin \varphi_s \end{pmatrix} = \\ \rho &\begin{pmatrix} \sin \varphi_i (\cos \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \sin \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s) - \cos \varphi_i \sin \varphi_s \\ -\sin \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \cos \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ \cos \varphi_i (\cos \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \sin \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s) + \sin \varphi_i \sin \varphi_s \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

在  $z$  轴上扣除地心和测站参考点之间的距离, 这就是测站的地平坐标系。一般定义方位角从正北方向起算, 沿顺时针方向计量方位角, 因此卫星的测站地平坐标系的坐标  $\overline{R}_{s'}$  可以表示为:

$$\overline{R}_{s'} = \rho \begin{pmatrix} \sin \varphi_i (\cos \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \sin \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s) - \cos \varphi_i \sin \varphi_s \\ -\sin \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \cos \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ \cos \varphi_i (\cos \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \sin \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s) + \sin \varphi_i \sin \varphi_s - \frac{r}{\rho} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos H_{s,i} \cos A_{s,i} \\ \cos H_{s,i} \sin A_{s,i} \\ \sin H_{s,i} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式(4)中,  $H_{s,i}$  为观测卫星对于  $i$  站的地平高度角;  $A_{s,i}$  为观测卫星对于  $i$  站的方位角;  $\overline{R}_{s'}$  为卫星的测站地平坐标系的坐标;  $r$  为地平坐标系下地球半径。

在  $i$  站能真正观测到天体, 应满足  $H_{s,i} > 0$ , 即必须  $\sin H_{s,i} > 0$ , 由于望远镜存在最低俯仰角, 所以, 此处的判断条件应为  $H_{s,i}$  大于望远镜最低俯仰角。一般最低俯仰角为  $5^\circ$  或者  $10^\circ$ , 实测中, 由于山脉遮挡等因素, 此值可能还跟方位有关, 因此本文的最低俯仰角统一为  $10^{\text{d}101}$ 。

因此, 得到  $i$  站能够观测到天体的条件方程:

$$\cos \varphi_i (\cos \lambda_i \cos \varphi_s \cos \lambda_s + \sin \lambda_i \cos \varphi_s \sin \lambda_s) + \sin \varphi_i \sin \varphi_s - \frac{r}{\rho} > \frac{\pi}{9}, \quad (5)$$

即

$$\cos \varphi_i \cos \varphi_s \cos(\lambda_s - \lambda_i) + \sin \varphi_i \sin \varphi_s > \frac{r}{\rho} - \frac{\pi}{9}, \quad (6)$$

整理后得到

$$\cos(\varphi_s - \varphi_i) - 2 \cos \varphi_i \cos \varphi_s \sin^2\left(\frac{\lambda_s - \lambda_i}{2}\right) > \frac{r}{\rho} - \frac{\pi}{9}. \quad (7)$$

对于多站 VLBI 观测能同时观测到天体条件时式(7)对于多个观测站均成立。

## 2.1 中国科学院国家授时中心 VLBI 观测网对北斗 GEO 卫星的可见性分析

对于 GEO 卫星, 它的特点是卫星的运动周期和地球同步, 它的周期等于一个恒星日, 并且卫星倾角为  $0$ , 即  $\varphi_s = 0$ ,  $\rho = 42\,000\text{ km}$ ,  $r = 6\,400\text{ km}$ , 式(8)对于 GEO 卫星简化成

$$\cos \varphi_i - 2 \cos \varphi_i \sin^2\left(\frac{\lambda_s - \lambda_i}{2}\right) - \frac{r}{\rho} - \frac{\pi}{9}, \quad (8)$$

令

$$\varepsilon = \cos \varphi_i - 2 \cos \varphi_i \sin^2\left(\frac{\lambda_s - \lambda_i}{2}\right) - \frac{r}{\rho} - \frac{\pi}{9}, \quad (9)$$

式(9)中,显然 $\varepsilon$ 是地平坐标系下 $i$ 站卫星仰角可视角, $\varepsilon=0$ 是临界角,只有当 $\varepsilon>0$ 时,卫星被观测站可见,不考虑最低俯仰角,对于GEO卫星被观测站 $i$ 可见卫星经度条件临界为

$$\frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\lambda_s - \lambda_i}{2}\right) = 1 - \frac{r}{\rho \cos \varphi_i} \quad (10)$$

北斗有5颗GEO卫星,轨道高度35786 km,分别定点于东经58.75°、东经80°、东经110.5°、东经140°、东经160°,根据式(10),中国科学院国家授时中心VLBI观测网:吉林,三亚和喀什可以观测到北斗同步轨道卫星俯仰角及可视情况示于表1。

表1 中国科学院国家授时中心VLBI观测网可观测北斗GEO卫星统计

	俯仰角				
	东经 58.75°	东经 80°	东经 110.5°	东经 140°	东经 160°
吉林 (126.33°, 43.63°)	0.121 572	0.347 413	0.541 598	0.550 926	0.602 387
三亚 (109.26°, 18.19°)	0.451 782	0.676 432	0.797 423	0.664 162	0.448 834
喀什 (76.03°, 39.27°)	0.586 848	0.619 933	0.485 863	-0.118 40	-0.071 054
三站同时可见情况 (>0)	√	√	√	×	×

## 2.2 国家授时中心VLBI观测网对IGSO卫星可见性分析

IGSO卫星是北斗导航系统的一个重要组成部分,由于它同步的特性,特别适用于区域导航卫星系统,它与GEO卫星不同,与赤道之间存在倾角(北斗转发式系统的倾角 $i=55^\circ$ ),使得IGSO在对称于赤道南北方向移动,与GEO联合可以得到很好的三维定位能力和很好的几何精度衰减因子,用很少的同步轨道卫星达到相当好的区域覆盖。这类卫星应用很广,如日本天顶星区域卫星导航系统、北斗卫星导航系统(区域)、印度区域卫星导航系统、中国转发式区域卫星导航系统等区域卫星导航系统均为这种卫星星座构成。因此用VLBI观测网观测IGSO卫星、获得精确的区域卫星导航系统轨道是一个重要的研究方向<sup>[1]</sup>。

公式(7)仍然是讨论IGSO可视性的基础。由于IGSO卫星的 $\lambda_s$ 和 $\varphi_s$ 随时间变化(虽然随时间变化,但在一定的范围之内),讨论IGSO卫星要比GEO卫星略复杂。北斗IGSO的偏心率为 $e=0$ ,卫星轨道基本是一个圆形轨道,显然当 $i=0$ 的时候,即IGSO卫星特例,即为GEO情况,它在 $z$ 方向为0,仅在赤道上空做圆周运动。

地固坐标系和地球一起自转的坐标系,因此IGSO卫星在地固下的位置很容易从地心惯性坐标转化,因此它在地心地固坐标系下近似可表示为

$$\overrightarrow{\rho}_{\text{IGSO}} = R_z(-\Omega) R_x(i) R_z(\Omega) \begin{pmatrix} \rho \cos(2\pi \frac{t}{T}) \\ \rho \sin(2\pi \frac{t}{T}) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\rho_{\text{IGSO}} = \rho \begin{pmatrix} \frac{1 + \cos i}{2} \cos \Omega + \frac{1 - \cos i}{2} \cos(4\pi \frac{t}{T} - \Omega) \\ \frac{1 + \cos i}{2} \sin \Omega + \frac{1 - \cos i}{2} \sin(4\pi \frac{t}{T} - \Omega) \\ \sin i \sin(2\pi \frac{t}{T}) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式 (11) 和 (12) 中,  $\Omega$  为 IGSO 卫星升交点赤经;  $t$  为观测时间, 从卫星通过升交点起算;  $T$  为 IGSO 卫星运动周期;  $i$  为 IGSO 卫星与赤道倾角; 研究北斗导航系统 IGSO 卫星其星下点为  $95^\circ$ , 卫星与赤道倾角  $i = 55^\circ$ , 根据式 (8) 可研究北斗导航系统 IGSO 卫星可视情况。

### 2.3 国家授时中心 VLBI 观测网对低轨卫星的观测

卫星 VLBI 只能在目标卫星被观测站同时可见的条件下进行, 较长基线很难观测低轨卫星, 因此, 研究卫星高度与观测站网基线之间的关系极为重要<sup>[12]</sup>。

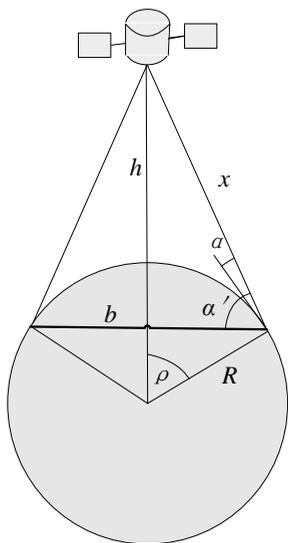


图 4 最大基线长度  $b$  与卫星高度  $h$  之间的几何关系

下面讨论简化条件下的情况: 基线为正东西方向, 并在赤道上, 卫星也在赤道上, 卫星处于两站最大间距 (基线  $b$ ) 的中点, 卫星高度  $h$  与基线关系。图 4 是最大基线长度  $b$  与卫星高度  $h$  之间的几何关系。

$$\frac{\sin \rho}{x} = \frac{\sin \alpha'}{h + R}, \quad (13)$$

即

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\sin \rho \cdot (h + R)}{x}\right) = \arcsin\left(\frac{b \cdot (h + R)}{2Rx}\right), \quad (14)$$

式 (13) 和 (14) 中, 能被观测到的条件是  $\alpha' > \frac{\pi}{2}$ 。

为了说明基线长度与卫星轨道关系, 进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。卫星在 2 000 km 能被两站看到的最大基线是 8 000 km, 如果截止仰角为  $15^\circ$ , 最大的基线长度为 6 000 km。卫星在 10 000 km 能被两站看到的最大基线是 12 000 km; 如果截止仰角为  $20^\circ$ , 最大的基线长度为 10 000 km。GEO 卫星轨道高度 35 786 km, 如果截止仰角为  $15^\circ$ , 最大基线长度为 12 000 km; IGSO 卫星轨道高度 35 786 km, 轨道倾角  $55^\circ$ , 如果截止仰角为  $20^\circ$ , 最大基线长度为 11 000 km; MEO 卫星轨道高度 21 528 km, 如果

截止仰角为  $15^\circ$ ，最大基线长度为 11 000 km。

上面讨论简化条件，实际可观测的卫星要比仿真结果的轨道高度更高。

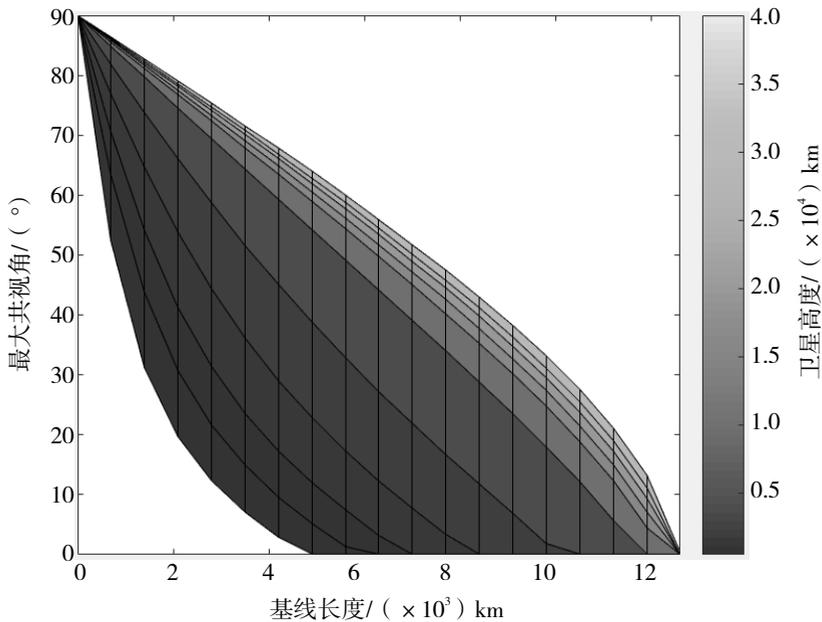


图 5 最大基线长度  $b$  与卫星高度  $h$  之间的关系

### 3 国家授时中心 VLBI 观测网可观测卫星分析

国家授时中心 VLBI 网基线长度均为 4 000 km 左右，因此从图 3 分析得出，部分低轨卫星无法观测，国家授时中心 VLBI 网所观测的卫星高度必须在 2 000 km 以上。

北斗空间星座由 GEO 卫星、IGSO 卫星和 MEO 卫星组成，GEO 卫星轨道高度 35 786 km，分别定点于东经  $80^\circ$ 、 $110.5^\circ$  和  $140^\circ$ ；IGSO 卫星轨道高度 35 786 km，轨道倾角  $55^\circ$ ；MEO 卫星轨道高度 21 528 km，轨道倾角  $55^\circ$ <sup>[3]</sup>。以北斗 IGSO 的 3 颗卫星和 MEO 的 3 颗卫星为例，仿真授时中心 VLBI 三亚、喀什、吉林 3 站进行 5 d 的可视时间（见表 1 至表 4）。

表 2 仿真国家授时中心 VLBI 三亚、喀什、吉林 3 站对 IGSO\_1 可视观测时间

	吉林	喀什	三亚
开始时间	2018-01-01 04:00	2018-01-01 04:00	2018-01-01 04:00
结束时间	2018-01-01 13:32	2018-01-01 15:45	2018-01-01 15:26
开始时间	2018-01-02 02:31	2018-01-01 23:27	2018-01-01 22:01
结束时间	2018-01-02 13:28	2018-01-02 15:41	2018-01-02 15:22
开始时间	2018-01-03 02:30	2018-01-02 23:24	2018-01-02 21:58
结束时间	2018-01-03 13:24	2018-01-03 15:38	2018-01-03 15:18
开始时间	2018-01-04 02:30	2018-01-03 23:21	2018-01-03 21:56
结束时间	2018-01-04 13:20	2018-01-04 15:34	2018-01-04 15:14
开始时间	2018-01-05 02:29	2018-01-04 23:18	2018-01-04 21:54
结束时间	2018-01-05 04:00	2018-01-05 04:00	2018-01-05 04:00

表 3 IGSO\_1 在 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 1 月 5 日的 3 站分别可视时间段

	吉林、喀什、三亚	观测时长
开始时间	2018-01-01 04:00	9 h 32 min
结束时间	2018-01-01 13:32	
开始时间	2018-01-02 02:31	10 h 57 min
结束时间	2018-01-02 13:28	
开始时间	2018-01-03 02:30	10 h 54 min
结束时间	2018-01-03 13:24	
开始时间	2018-01-04 02:30	10 h 50 min
结束时间	2018-01-04 13:20	
开始时间	2018-01-05 02:29	1 h 31 min
结束时间	2018-01-05 04:00	

表 4 仿真国家授时中心 VLBI 三亚、喀什、吉林 3 站对 MEO\_3 可视观测时间

	吉林	喀什	三亚
开始时间	2018-01-01 14:36	2018-01-01 06:00	2018-01-01 13:12
结束时间	2018-01-01 21:34	2018-01-01 06:57	2018-01-01 21:39
开始时间	2018-01-02 17:26	2018-01-01 13:52	2018-01-02 16:01
结束时间	2018-01-02 23:49	2018-01-01 19:32	2018-01-03 00:38
开始时间	2018-01-03 20:19	2018-01-02 15:46	2018-01-03 20:38
结束时间	2018-01-04 01:36	2018-01-02 22:38	2018-01-04 02:49
开始时间	2018-01-04 08:07	2018-01-03 18:12	2018-01-04 23:25
结束时间	2018-01-04 10:24	2018-01-04 01:26	2018-01-05 04:00
开始时间	2018-01-04 22:51	2018-01-04 21:17	
结束时间	2018-01-05 02:52	2018-01-05 03:35	

表 5 MEO\_3 在 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 1 月 5 日的 3 站分别可视时间段

	吉林、喀什、三亚	观测时长
开始时间	2018-01-01 14:36	4 h 56 min
结束时间	2018-01-01 19:32	
开始时间	2018-01-02 17:26	5 h 12 min
结束时间	2018-01-02 22:38	
开始时间	2018-01-03 20:38	4 h 48 min
结束时间	2018-01-04 01:26	
开始时间	2018-01-04 23:25	3 h 27 min
结束时间	2018-01-05 02:52	

由上述图表可知, IGSO 和 MEO 卫星在国家授时中心 VLBI 观测网下的可观测时长还是存在差异的,

IGSO 的 3 站可视时间相对较长, 一般可达到 10 h 左右, 而 MEO 的 3 站可视时间只有 4 h 左右。因此, 不同轨道高度的卫星, 对于国家授时中心 VLBI 观测网来说, 可观测时间不同。轨道高度越高的卫星, 国家授时中心 VLBI 观测网观测时间越长, 反之, 则越短。

## 4 结语

通过研究卫星共视原理, 论文分析了不同高度的卫星与基线长度的关系, 并给出各类卫星, 特别是北斗导航卫星的共视结果, 为 VLBI 观测卫星, 特别是中国科学院国家授时中心 VLBI 观测网对卫星的观测提供支撑。通过上述分析可以得出以下结论:

① 由于我国地域广阔, 国家授时中心 VLBI 网可视的 GEO 卫星与其所处经度有关。往往由于卫星所处经度太向东偏移, 而使喀什站无法实现 3 站共视。

② 可视基线长度与卫星轨道及截止仰角关系可以概括为: 卫星高度越高, 能被两站看到的最大基线越长; 卫星高度一定的情况下, 截止仰角越大, 能被两站看到的最大基线越短。

③ 不同轨道高度的卫星, 对于国家授时中心 VLBI 观测网来说, 可观测时间不同。轨道高度越高的卫星, 国家授时中心 VLBI 观测网观测时间越长, 反之, 则越短<sup>[14]</sup>。

显然, 设计观测卫星的 VLBI 观测系统应以自身的任务需求选择基线长度, 对于要求高分辨率的, 应该基线长度越长越有利。本文研究对卫星纲要选择和 VLBI 观测系统构建具有参考意义。

## 参考文献:

- [1] 杨颖, 李志刚, 杨旭海, 等. 转发式站间差分卫星定轨[J]. 科学通报, 2012, 57(34): 3258–3264.
- [2] 弓剑军. 宽带 VLBI 及其 GEO 卫星测定轨方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [3] 夏金超, 李金岭, 韩延本. 关于新一代甚长基线干涉系统 VLBI2010 计划[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1623–1627.
- [4] 杨颖. 宽带 VLBI 系统设计及其应用研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2015.
- [5] 李金岭, 魏二虎, 孙中苗, 等. 关于我国天测与测地 VLBI 网络未来建设的讨论[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(6): 670–673.
- [6] PLANK L. VLBI satellite tracking for the realization of frame ties[D]. Wien: Technische Universität Wien, 2016.
- [7] TORNATORE V, HAAS R, CASEY S, et al. Direct VLBI observations of the global navigation satellite system signals[J]. IAG Symposium, 2014(139): 247–252.
- [8] HELLERSCHMIED A, PLANK L, NEIDHARDT A. Observing satellites with VLBI radio telescopes-practical realization at Wettzell[C] // International VLBI service for Geodesy and Astrometry 2014 general meeting proceedings, [s.l.]: Science Press, 2014: 441–445.
- [9] CAO F, YANG X H, SU M D, et al. Evaluation of C-Band precise orbit determination of geostationary earth orbit satellites based on Chinese Area Positioning System[J]. Journal of Navigation, 2014, 67(2): 343–351.
- [10] TAKAHASHI F, KONDO T, TAKAHASHI Y, et al. Very long baseline interferometer[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002, 17(8): 43–44.
- [11] KAPLAN G H. The IAU resolutions on astronomical reference systems, time scales, and Earth rotation models[R]. Washington: USNO Circular, 2005: 179.
- [12] 钱志瀚, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
- [13] 舒逢春. 人造卫星实时射电干涉测量方法研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2008.
- [14] 王楠, 张郁. 卫星高度角对 GPS 测量精度的影响研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2012, 10(5): 562–564.