



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200610086141.5

[45] 授权公告日 2010年3月10日

[11] 授权公告号 CN 100593731C

[22] 申请日 2006.9.4

[21] 申请号 200610086141.5

[73] 专利权人 南京航空航天大学

地址 210016 江苏省南京市御道街29号

[72] 发明人 康国华 刘建业 曾庆化 赖际舟
孙永荣 赵伟 熊智 李荣冰

[56] 参考文献

GPS 双星航姿测量研究. 朱涛, 许江宁, 田华明, 卞鸿巍. 海军工程大学学报, 第14卷第3期. 2002

利用双星系统确定载体姿态研究. 郑庆晖, 张育林. 航天控制, 第3期. 2002

双星定姿的建模与仿真. 吴杰, 任萱, 胡小平, 郑伟, 郑冲. 空间科学学报, 第19卷第2期. 1999

双星姿态测量的算法及双值问题. 何海波, 郭海荣, 李保利, 焦志勇, 孟凡玉. 测绘学院学报, 第22卷第1期. 2005

审查员 李有才

[74] 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所(普通合伙)

代理人 阙如生

权利要求书3页 说明书7页 附图3页

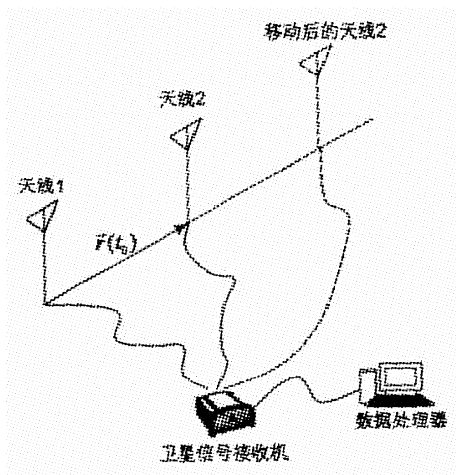
[54] 发明名称

基于北斗双星系统的快速测量载体姿态的方法

[57] 摘要

本发明公开了一种基于北斗双星系统的快速测量载体姿态的方法, 在初始时刻 t_0 , 沿着需要测量的方向放置天线(1)和天线(2), 测得基线矢量 $\vec{Y}(t_0)$ 的长度 L 、 t_0 时刻的第一组载波相位观测值; 再沿着原基线方向移动天线(2)延长基线长度为原来的 k_1 倍, 得到新的基线矢量 $k_1 \vec{Y}(t_0)$, 测得第二组载波相位观测值 $\Delta \phi_{12}^1(t_1)$ 、 $\Delta \phi_{12}^2(t_1)$; 这样依次获得多组观测值, 得到基线的方位角 ψ 和俯仰角 θ 完成载体姿态的测量。(1)该方法操作便捷, 仅需移动天线即可, 姿态求取速度快;(2)所需测量装置简单, 仅需要天线、长度测量器件、卫星载波信号接收机和数据处理器等最基本、常见的设备, 不需要旋转机构等特殊的辅助设备, 天线的安装也

没有特殊要求;(3)经实验证明, 该方法能够提供精确的方位角和俯仰角。



1、一种基于北斗双星系统的快速测量载体姿态的方法，其特征在于，该方法包括下列步骤：

(1) 在初始时刻 t_0 ，沿着需要测量的方向放置第一天线(1)和第二天线(2)，使得天线基线方向与测量方向平行或在同一方向上，然后测得基线矢量 $\vec{r}(t_0)$ 的长度 L 、 t_0 时刻的第一组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_0)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_0)$ ， $\Delta\varphi_{12}^1(t_0)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_0)$ 分别是第一天线(1)、第二天线(2)相对于第一、第二北斗卫星(3、4)的载波相位单差观测值，以及第一天线(1)与第一、第二北斗卫星(3、4)视线方向的单位矢量 $\vec{e}^1(t_0)$ ， $\vec{e}^2(t_0)$ ；

(2) 在 t_1 时刻，沿着原基线方向移动第二天线(2) 延长步骤(1)所述的基线长度为原来的 k_1 倍，得到新的基线矢量 $k_1\vec{r}(t_0)$ ，测得在新基线矢量 $k_1\vec{r}(t_0)$ 下的第二组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_1)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_1)$ ；

(3) 保持基线方向不变，再移动第二天线(2) 延长步骤(1)所述的基线长度为原来的 k_2 倍，得到新的基线矢量 $k_2\vec{r}(t_0)$ ，测得在 t_2 时刻的第三组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_2)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_2)$ ；

(4) 这样依次通过移动第二天线(2) 延长基线长度并保持基线方向不变，在 t_n 时刻可得 $n+1$ 组观测值，其中 $n \in N$ ，相应的基线序列为 $\vec{r}(t_0)$ ， $k_1\vec{r}(t_0)$ ， $k_2\vec{r}(t_0)$ ， \dots ， $k_n\vec{r}(t_0)$ ，其中 $k_j > 1, j=1, 2, \dots, n$ ， k_j 为实数；上述的测量过程表示如下：

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta\varphi_{12}^1(t_0) &= \frac{1}{\lambda} e^{v_1}(t_0) \mathbf{g}_1^T(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_0) \\
 \Delta\varphi_{12}^2(t_0) &= \frac{1}{\lambda} e^{v_2}(t_0) \mathbf{g}_2^T(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_0) \\
 \Delta\varphi_{12}^1(t_1) &= \frac{1}{\lambda} e^{v_1}(t_1) \mathbf{g}_1^T(t_1) + N_1(t_1) + \varepsilon^1(t_1) \\
 \Delta\varphi_{12}^2(t_1) &= \frac{1}{\lambda} e^{v_2}(t_1) \mathbf{g}_2^T(t_1) + N_2(t_1) + \varepsilon^2(t_1) \\
 &\vdots \\
 \Delta\varphi_{12}^1(t_n) &= \frac{1}{\lambda} e^{v_1}(t_n) \mathbf{g}_1^T(t_n) + N_1(t_n) + \varepsilon^1(t_n) \\
 \Delta\varphi_{12}^2(t_n) &= \frac{1}{\lambda} e^{v_2}(t_n) \mathbf{g}_2^T(t_n) + N_2(t_n) + \varepsilon^2(t_n)
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中 λ 是载波波长, $\varepsilon^i(t)$ 是观测噪声;

(5) 式(1)所含的第一天线(1)与第一、第二北斗卫星(3、4)视线方向的单位

矢量关系为:

$$\left. \begin{aligned}
 e^{v_1}(t_0) = e^{v_1}(t_1) = L = e^{v_1}(t_n) \\
 e^{v_2}(t_0) = e^{v_2}(t_1) = L = e^{v_2}(t_n)
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式, 并忽略测量噪声 ε , 可得到 n 组初始整周模糊度, 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned}
 N_1(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_1 \Delta\varphi_{12}^1(t_0) - \Delta\varphi_{12}^1(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\
 N_2(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_1 \Delta\varphi_{12}^2(t_0) - \Delta\varphi_{12}^2(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\
 &\vdots \\
 N_1(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_n \Delta\varphi_{12}^1(t_0) - \Delta\varphi_{12}^1(t_n)}{k_n - 1} \right] \\
 N_2(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_n \Delta\varphi_{12}^2(t_0) - \Delta\varphi_{12}^2(t_n)}{k_n - 1} \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(6) 在获得 $N_1(t_0)$ 、 $N_2(t_0)$ 后, 带入下式(4)并忽略测量噪声 ε , 就可以求得基线矢量初始值 $\hat{\mathbf{r}}(t_0)$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{12}^1(t) &= \frac{1}{\lambda} e^1(t) \mathbf{g}^T(t) + N_1(t) + \varepsilon^1(t) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t) &= \frac{1}{\lambda} e^2(t) \mathbf{g}^T(t) + N_2(t) + \varepsilon^2(t) \\ L &= |\mathbf{r}(t)| + \varepsilon_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 ε_L 是基线长度测量误差；

(7) 姿态的获取：求得的基线矢量用直接坐标系表示，设在东北天坐标系下， $\mathbf{r}(t_0) = [x \ y \ z]^T$ ，则基线的方位角 ψ 和俯仰角 θ 分别为：

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \arctan(x/y) \\ \theta &= \arctan(z/\sqrt{x^2 + y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

至此完成了载体姿态的测量。

基于北斗双星系统的快速测量载体姿态的方法

一、技术领域

本发明涉及一种测量载体姿态的方法，尤其涉及一种利用北斗双星系统进行载体测量的方法。

二、背景技术

北斗双星系统下的姿态测量是北斗导航系统的重要应用领域，是通过卫星载波相位信息求解出导航坐标系下的接收机天线基线矢量来求得姿态的，核心问题是整周模糊度的求解。由于目前北斗导航系统的卫星数量少，最小二乘搜索等在GPS导航系统中常用的求解整周模糊度的方法在北斗双星系统下实现有困难。目前国内已研制的姿态测量的方法及相关系统采用了旋转基线（逯亮清、胡小平、吴美平，《利用旋转基线方法进行双星快速定向》，《宇航学报》，2004, 25(2):158-162）、并行通道多天线配置（吴杰，任萱，胡小平等，《双星定姿的建模研究》，《空间科学学报》，1999, 19(2):154-159）等方法进行载体姿态的求取。但是在实际应用中存在一定的不足，例如旋转基线法要求基线与旋转轴正交，基线旋转角度需精确测量；多天线配置长短基线不易同向等，这些因素都容易对载体姿态测量的快速性和准确性造成影响。因此需要一种操作简便、姿态测量准确的北斗测姿系统。

三、发明内容

1、发明目的：本发明的目的是提供一种在北斗双星系统中快速、精确地进行载体姿态测量的方法。

2、技术方案：为了达到上述的发明目的，本发明的方法包括下列步骤：

(1) 在初始时刻 t_0 ，沿着需要测量的方向放置第一天线和第二天线，使得天线基线方向与测量方向平行或同一方向上，然后测得基线矢量 $\vec{r}(t_0)$ 的长度 L 、 t_0 时刻的第一组载波相位观测值 $\Delta\phi_{12}^1(t_0)$ 、 $\Delta\phi_{12}^2(t_0)$ （ $\Delta\phi_{12}^1(t_0)$ 、 $\Delta\phi_{12}^2(t_0)$ 分别是第一、第二天线相对于第一、第二北斗卫星的载波相位单差观测值、第一天线与第一、第二北斗卫星视线方向的单位矢量 $\vec{e}^1(t_0)$ 和 $\vec{e}^2(t_0)$ ）；

(2) 在 t_1 时刻，沿着原基线方向移动第二天线延长步骤（1）所述的基线长度为原来的 k_1 倍，得到新的基线矢量 $k_1\vec{r}(t_0)$ ，测得在新基线矢量 $k_1\vec{r}(t_0)$ 下第二组载波相位观测

值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_1)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_1)$;

(3) 保持基线方向不变, 再移动第二天线延长步骤 (1) 所述的基线长度为原来的 k_2 倍, 得到新的基线矢量 $k_2 \vec{r}(t_0)$, 测得在 t_2 时刻的第三组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_2)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_2)$;

(4) 这样依次通过移动第二天线延长基线长度并保持基线方向不变, 在 t_n 时刻可得 $n+1$ 组观测值 ($n \in N$), 相应的基线序列为 $\vec{r}(t_0)$, $k_1 \vec{r}(t_0)$, $k_2 \vec{r}(t_0) \cdots \cdots k_n \vec{r}(t_0)$, 其中 $k_j > 1, j=1, 2, \dots, n$; 上述的测量过程表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{12}^1(t_0) &= \frac{1}{\lambda} \vec{e}^1(t_0) \vec{g}^T(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_0) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t_0) &= \frac{1}{\lambda} \vec{e}^2(t_0) \vec{g}^T(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_0) \\ \Delta\varphi_{12}^1(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \vec{e}^1(t_1) \vec{g}_1^T \vec{r}(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_1) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \vec{e}^2(t_1) \vec{g}_1^T \vec{r}(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_1) \\ &\quad \vdots \\ \Delta\varphi_{12}^1(t_n) &= \frac{1}{\lambda} \vec{e}^1(t_n) \vec{g}_n^T \vec{r}(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_n) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t_n) &= \frac{1}{\lambda} \vec{e}^2(t_n) \vec{g}_n^T \vec{r}(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式 (1) 中: λ 是载波波长, $\varepsilon^i(t)$ 是观测噪声, 测量装置连接图如图 1 所示, 原理图如图 2 所示;

(5) 由于第一天线保持不动, 且北斗卫星是地球同步卫星相对地球静止, 因此步骤 (4) 中 (1) 式所含的第一天线与第一、第二北斗卫星视线方向的单位矢量, 具有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \vec{e}^1(t_0) = \vec{e}^1(t_1) = \vec{e}^1(t_n) \\ \vec{e}^2(t_0) = \vec{e}^2(t_1) = \vec{e}^2(t_n) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式, 并忽略测量噪声 ε , 可得到 n 组初始整周模糊度, 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} N_1(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_1 \Delta \varphi_{12}^1(t_0) - \Delta \varphi_{12}^1(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\ N_2(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_1 \Delta \varphi_{12}^2(t_0) - \Delta \varphi_{12}^2(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\ &\quad \vdots \\ N_1(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_n \Delta \varphi_{12}^1(t_0) - \Delta \varphi_{12}^1(t_n)}{k_n - 1} \right] \\ N_2(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_n \Delta \varphi_{12}^2(t_0) - \Delta \varphi_{12}^2(t_n)}{k_n - 1} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

从(3)式可以看出,最理想情况下只要延长一次基线就可以求得初始整周模糊度参数 $N_1(t_0)$ 、 $N_2(t_0)$ 。但为了避免延长过程中出现的周跳,可以适当增加延长次数,获得多个候选值。如果所求得的多组 $N_1(t_0)$ 、 $N_2(t_0)$ 值相同,则表明没有周跳;如果不同,则证明发生了周跳,需要重新测量,重复步骤(1)~(5);

(6) 在获得 $N_1(t_0)$ 、 $N_2(t_0)$ 后,带入下式(4)并忽略测量噪声 ε ,就可以求得基线矢量初始值 $\vec{r}(t_0)$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varphi_{12}^1(t) &= \frac{1}{\lambda} e^1(t) \mathbf{g}^T(t) + N_1(t) + \varepsilon^1(t) \\ \Delta \varphi_{12}^2(t) &= \frac{1}{\lambda} e^2(t) \mathbf{g}^T(t) + N_2(t) + \varepsilon^2(t) \\ L &= |\vec{r}(t)| + \varepsilon_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 ε_L 是基线长度测量误差;

(7) 姿态的获取:步骤(6)中求得的基线矢量一般用直接坐标系表示,设 $\vec{r}(t_0) = [x \ y \ z]^T$ (东北天坐标系),则基线的方位角 ψ 和俯仰角 θ 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \arctan(x/y) \\ \theta &= \arctan(z/\sqrt{x^2 + y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

需要注意的是,当 $\vec{r}(t_0)$ 存在双解时,可得出两组姿态角,如何正确选取姿态角可用基线的先验条件判定,如基线是否概略水平等,从而剔除错误的值,得到基线正确的姿态。

3、有益效果

本发明的方法具有如下优点:(1)该方法操作便捷,仅需移动天线即可,姿态求取速度快;(2)所需测量装置简单,仅需要天线、长度测量器件、卫星载波信号接收机和

数据处理器等最基本、常见的设备，不需要旋转机构等特殊的辅助设备，天线的安装也没有特殊要求；(3) 经实验证明，该方法能够提供精确的方位角和俯仰角。

对以上发明的有益效果说明如下：

(1) 测量装置简单，没有特殊的精度要求：

如图 2 中所示，假设 α' 为基线与单位矢量 $\mathbf{e}^i(t_0)$ ($i=1,2$) 的夹角，基线延长精度为 σ_L ，载波相位测量精度为 σ_ψ ，基线延长倍数为 k_m ，由式 (3)、(4) 通过推导可得 σ_L ， σ_ψ ， k_m 之间的约束关系：

$$\sigma_L < \frac{\lambda(k_m - 1)\sigma_\psi}{\cos \alpha'} \quad (6)$$

从上式看出在载波相位测量精度 (σ_ψ) 和基线矢量方向 (α') 确定情况下， k_m 越大，所要求的基线延长精度越低。

假设 $\alpha' = 45^\circ$ ，如果载波相位精度分别取 1%，2%，3% 周，可以画出不同载波相位精度下的基线延长倍数与基线延长精度关系曲线，如图 3 所示。从图 3 可以看出，基线延长倍数取 4，在载波相位精度分别为 1%，2%，3% 时，对应要求的基线延长精度只要优于 0.005m，0.01m，0.015m 即可成功确定初始整周模糊度，从而求解出姿态角。从工程实用角度考虑，对于 5 毫米 (0.005m) 这样的基线延长精度是很容易实现的。由此说明延长基线法对基线延长的精度要求不高，易于实现。

(2) 基线延长法单点定向精度

假设北斗接收机位置为 (118.8139°E, 32.0405°N, 50m)，初时基线长度为 1.5m，基线延长倍数取 4，进行如下两种定向仿真测试：

- (a) 固定基线仰角为 10° ，旋转基线，每次旋转 1° ，测得每次旋转后测得的方位角和俯仰角精度 (1σ)，精度变化曲线如图 4 所示；
- (b) 固定方位角为 70° ，通过俯仰角在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 区间的变化，求得在每个俯仰角下的姿态精度 (1σ)，精度变化曲线如图 5 所示。

为了便于表示，图 4、图 5 的 y 轴都采用了对数坐标。从图 4 看出，姿态精度随着方位角的变化而成周期性变化，当基线偏离南北方向在 $\pm 50^\circ$ 以内，方位角和俯仰角都可以实现 0.01° 的精度。

从图 5 看出，在方位角固定情况下，姿态精度也会随着俯仰角变化而不同，俯仰角越大，姿态精度越高。由此说明，在基线快速定向时，如增加俯仰角还可进一步改善定向精度。

(3) 基线延长法区域定向精度：

以上给出的仅是在某地单点获得的姿态精度，为了说明延长基线法的普遍适应性，

在北斗卫星的服务区间东经 $70^{\circ}\sim 145^{\circ}$ ，北纬 $5^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 这样一个覆盖全国的范围内做 (2) 中的两种仿真，统计在每一位置处方位角和俯仰角精度 (1σ) 的最大最小值，从而得到延长基线法下的姿态测量精度随位置变化的分布情况。

仿真方案 (a)、(b) 对应的角精度的变化情况。分别如图 6、图 7 所示，图中三维空间坐标内上下两个曲面之间的空间就是角度测量精度的变化范围。

图 6(a) 表明，在基线有一定仰角情况下延长基线定向，全区域范围内方位角精度大约在 $0.001^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 之间，另外从图 6(a) 还可以看出误差方差最大值曲面由北向南倾斜，说明低纬度地区的定向精度还可以更高。图 6(b) 显示的定仰角下俯仰角的精度情况与方位角相同。

图 7(a)、(b) 表明，在基线方位固定情况下，通过调整俯仰角，方位角和俯仰角精度范围均在 $0.001^{\circ}\sim 0.1^{\circ}$ 之间；且精度在全范围内基本分布均匀，没有出现随经纬度变化的情况。

上述分析表明，延长基线法测量方位角和俯仰角不受地域的限制，在北斗卫星服务范围内均可使用。此外还需要指出的是，以上结论是在基线长度为 1.5m、延长倍数为 4 的条件下获得的，进一步的仿真试验表明，在基线长度或者延长倍数增加的情况下，以上仿真得到的姿态精度还可以进一步提高，可满足对更高精度的需求。

四、附图说明

图 1 本方法的装置示意图；

图 2 为延长基线求取单差整周模糊度示意图；

图 3 为基线延长倍数与基线延长精度关系曲线；

图 4 为延长基线法单点定向不同方位角下的姿态精度曲线；

图 5 为延长基线法单点定向不同俯仰角下的姿态精度曲线；

图 6(a) 为全区域内仰角固定情况下的方位角测量精度区间图；

图 6(b) 为全区域内仰角固定情况下的俯仰角测量精度区间图；

图 7(a) 为全区域内方位角固定情况下的方位角测量精度区间图；

图 7(b) 为全区域内方位角固定情况下的俯仰角测量精度区间图。

五、具体实施方式

实施例 1：如图 1、图 2 所示，本实施例的基于北斗双星系统的快速测量载体姿态的方法包括下列步骤：

(1) 在初始时刻 t_0 ，沿着需要测量的方向放置天线 1 和天线 2，使得天线基线方向与测量方向平行或同一方向上，然后测得基线矢量 $\vec{r}(t_0)$ 的长度 $L = 4m$ 、 t_0 时刻的第一

组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_0)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_0)$ ($\Delta\varphi_{12}^1(t_0)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_0)$) 分别是天线 1、2 相对北斗卫星 1、2 的载波相位单差观测值、天线 1 与北斗卫星 1、2 视线方向的单位矢量 $e^1(t_0)$ 、 $e^2(t_0)$;

(2) 在 t_1 时刻, 沿着原基线方向移动天线 2 延长步骤 (1) 所述的基线长度为原来的 $k_1 = 1.5$ 倍, 得到新的基线矢量 $k_1^f r(t_0)$, 测得在新基线矢量 $k_1^f r(t_0)$ 下的第二组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_1)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_1)$;

(3) 保持基线方向不变, 再移动天线 2 延长步骤 (1) 所述的基线长度为原来的 $k_2 = 2$ 倍, 得到新的基线矢量 $k_2^f r(t_0)$, 测得在 t_2 时刻的第三组载波相位观测值 $\Delta\varphi_{12}^1(t_2)$ 、 $\Delta\varphi_{12}^2(t_2)$;

(4) 这样在 t_2 时刻可得 2+1 组观测值, 相应的基线序列为 $r(t_0)$ 、 $k_1^f r(t_0)$ 、 $k_2^f r(t_0)$, 上述的测量过程表示如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{12}^1(t_0) &= \frac{1}{\lambda} e^1(t_0) g^f(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_0) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t_0) &= \frac{1}{\lambda} e^2(t_0) g^f(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_0) \\ \Delta\varphi_{12}^1(t_1) &= \frac{1}{\lambda} e^1(t_1) g_{k_1^f}^f(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_1) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t_1) &= \frac{1}{\lambda} e^2(t_1) g_{k_1^f}^f(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_1) \\ \Delta\varphi_{12}^1(t_2) &= \frac{1}{\lambda} e^1(t_2) g_{k_2^f}^f(t_0) + N_1(t_0) + \varepsilon^1(t_2) \\ \Delta\varphi_{12}^2(t_2) &= \frac{1}{\lambda} e^2(t_2) g_{k_2^f}^f(t_0) + N_2(t_0) + \varepsilon^2(t_2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式 (1) 中: λ 是载波波长, $\varepsilon^i(t)$ 是观测噪声, 测量装置连接图如图 1 所示, 原理图如图 2 所示;

(5) 由于天线 1 保持不动, 且北斗卫星是地球同步卫星相对地球静止, 因此步骤 (4) 中 (1) 式所含的天线 1 与北斗卫星 1、2 视线方向的单位矢量, 具有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} e^1(t_0) = e^1(t_1) = e^1(t_2) \\ e^2(t_0) = e^2(t_1) = e^2(t_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,并忽略测量噪声 ε ,可得到2组初始整周模糊度,如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} N_1(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_1 \Delta \varphi_{12}^1(t_0) - \Delta \varphi_{12}^1(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\ N_2(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_1 \Delta \varphi_{12}^2(t_0) - \Delta \varphi_{12}^2(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\ N_1(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_2 \Delta \varphi_{12}^1(t_0) - \Delta \varphi_{12}^1(t_2)}{k_2 - 1} \right] \\ N_2(t_0) &= \text{int} \left[\frac{k_2 \Delta \varphi_{12}^2(t_0) - \Delta \varphi_{12}^2(t_2)}{k_2 - 1} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

如果所求得的两组 $N_1(t_0)$ 、 $N_2(t_0)$ 值相同,表明没有周跳;如果不同,则证明发生了周跳,需要重新测量,重复步骤(1)~(5)。

(6) 在获得 $N_1(t_0)$ 、 $N_2(t_0)$ 后,带入下式(4)并忽略测量噪声 ε ,就可以求得基线矢量初始值 $\vec{r}(t_0)$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varphi_{12}^1(t) &= \frac{1}{\lambda} e^1(t) \mathbf{g}^T(t) + N_1(t) + \varepsilon^1(t) \\ \Delta \varphi_{12}^2(t) &= \frac{1}{\lambda} e^2(t) \mathbf{g}^T(t) + N_2(t) + \varepsilon^2(t) \\ L &= |\vec{r}(t)| + \varepsilon_L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 ε_L 是基线长度测量误差;

(7) 姿态的获取:求得的基线矢量一般用直接坐标系表示,设 $\vec{r}(t_0) = [x \ y \ z]^T$ (东北天坐标系),则基线的方位角 ψ 和俯仰角 θ 分别为:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \arctan(x/y) \\ \theta &= \arctan(z/\sqrt{x^2 + y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

需要注意的是,当 $\vec{r}(t_0)$ 存在双解时,可求出两组姿态角,如何正确选取姿态角可用基线的先验条件判定。如基线是否概略水平等,从而剔出错误的值,得到基线正确的姿态。

本实施例中,延长了基线两次,还可以根据实际测量精度的要求确定延长基线的次数如3次、4次等,通过上述的步骤同样可以测得载体姿态。

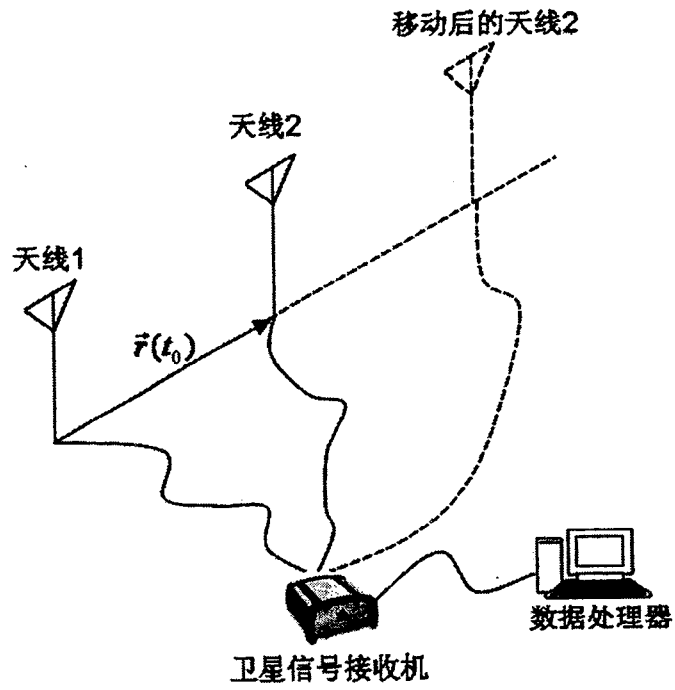


图 1

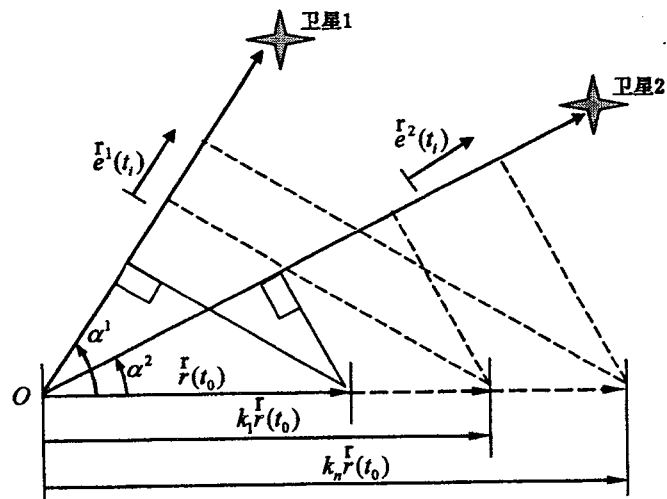


图 2

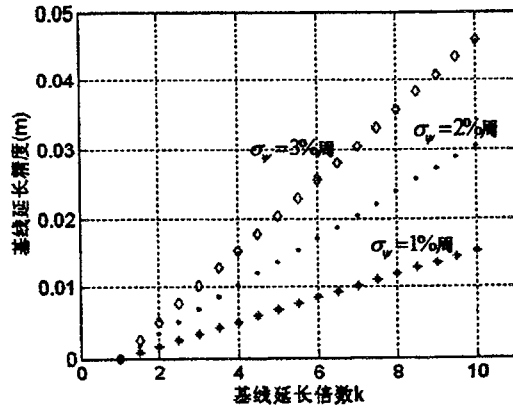


图 3

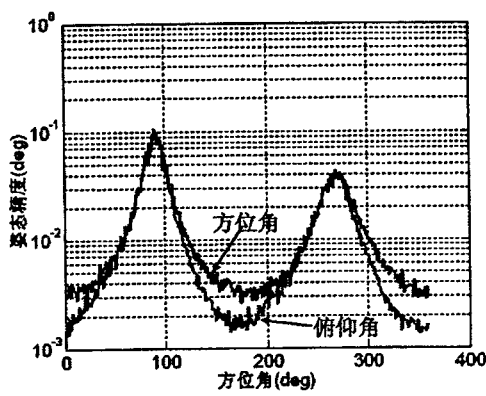


图 4

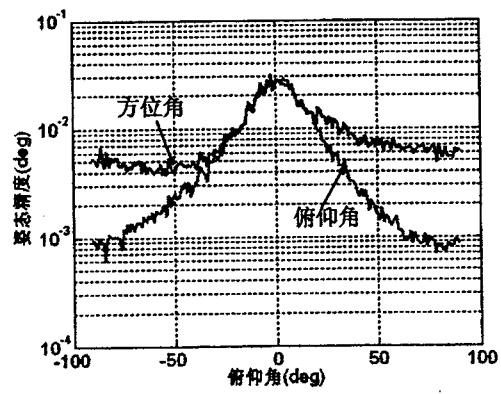


图 5

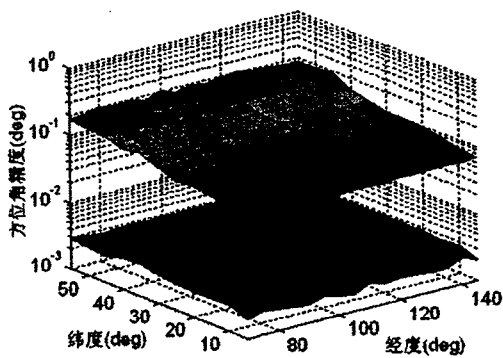


图 6(a)

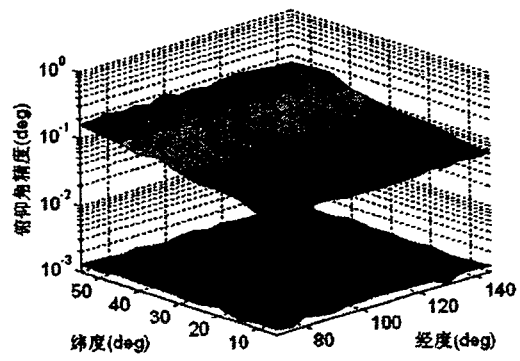


图 6(b)

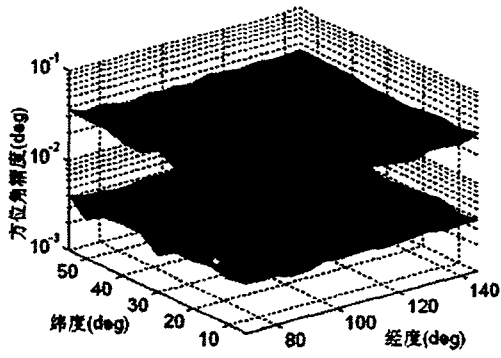


图 7(a)

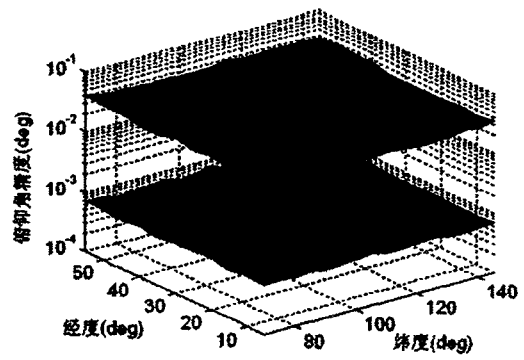


图 7(b)