

文章编号: 1001- 2486(2005) 01- 0020- 06

单星定向原理及 GPS 仿真试验^X郑冲¹, 李延兴², 吴杰¹

(11 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 21 中国地震局 第一地变形监测中心, 天津 300180)

摘要:介绍了一种新的卫星定向方法, 该方法仅利用一颗地球静止轨道卫星完成定向; 介绍了利用 GPS 卫星进行单星定向原理验证试验的方法、条件和结果。试验结果表明, 对于 3m 长基线, 单星定向精度可达 0. 05b。从而说明利用一颗地球静止轨道卫星进行定向, 在原理上是正确可行的。

关键词:单星定向; 地球静止卫星; GPS

中图分类号: V249 文献标识码: A

The Principle of Direction Detemination with a Single Geostationary Safellite and the Experiment in GPS

ZHENG Chong¹, LI Yan2xing², WU Jie¹

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Deferse Technology, Changsha 410073, China;

2. First Crustal Deformation Monitoring Center, S. S. B, Tianjin 300180, China)

Abstract: A new method of direction detemination with a single geostationary satellite is presented. Also an experiment is done in order to validate the method with GPS satellites. The result shows that the precision of direction detemination can be higher than 0. 05b when the baseline length is about 3 meters long; so it proves that the principle of direction detemination with a single geostationary satellite is right and feasible.

Key words: direction determining with single satellite; geostationary satellite; GPS

本文提出了一种利用单颗地球静止轨道卫星定向的方法, 并利用 GPS 卫星进行了仿真试验。单星定向技术不但可以应用于导弹、火炮等武器系统快速定向, 而且可以应用于航天器地面测控设备的高精度快速定向。

1 载波相位测量的基本原理及单星定向方法

1.1 载波相位测量的基本原理

卫星载波相位干涉测量的原理如图 1 所示。图中 r 为天线 1 到卫星的方向的单位矢量, 1、2 为天线, X 为 1、2 天线所确定的基线矢量。由于卫星高度约 3.6×10^7 m, 而天线之间距离很短 (< 10 m), 因此卫星发射的电磁波可视为平面波。由于 1、2 天线距卫星距离不同, 因而在同一时刻接收到对应于不同相位的平面波, 在两天线之间产生了相位差。天线 1、2 接收到的单差载波相位可表示为^[1, 2]

$$\phi_{12}^j = \frac{1}{K} r^j \cdot X_{12} + f \cdot \Delta t_{12} + N_{12}^j + E_{12}^j \quad (1)$$

其中, ϕ_{12}^j 为载波相位单差测量值; K 为载波相位波长; r^j 为天线 1 到 j 号卫星方向的单位矢量; X_{12} 为基线矢量; f 为载波频率; Δt_{12} 为天线 2、1 接收机钟差之差; N_{12}^j 为整周模糊度; E_{12}^j 为偶然测量误差。图 1 中 d 即为两天线到卫星的距离差, $d = r^j \cdot X_{12}$ 。若接收机共用一个本振信号时, 可认为 $\Delta t_{12} = 0$, 因此 (1) 式可写为

$$\phi_{12}^j = \frac{1}{K} r^j \cdot X_{12} + N_{12}^j + E_{12}^j \quad (2)$$

^X 收稿日期: 2004- 10- 09

基金项目: 国家卫星应用技术资助项目

作者简介: 郑冲(1975), 男, 博士生。

当观测值不发生周跳时, (2) 式右端的 N_{12}^j 为一常整数。

112 单星定向方法

假设卫星为地球静止轨道卫星, 则天线到卫星方向的单位矢量 r^j 保持不变。因此, 当基线矢量静止时, 不考虑观测误差, 则单差观测值恒定不变。转动基线矢量 X_{12} , 在保持信号不失锁的情况下, 单差载波相位观测值的变化仅由 r_{12} 的变化产生。当处于水平状态的基线矢量 X_{12} 与天线至卫星方向单位矢量 r^j (或卫星信号的入射方向) 在当地水平方向上的投影平行时, 绝对值 $|\langle i_{12} - N_{12}^j |$ 应达到极大值, 该值的小数部分为 d/K 的小数部分, 当 X_{12} 与 r^j 的水平方向分量垂直时, $|\langle i_{12} - N_{12}^j |$ 达到极小值, 即 $\langle i_{12} - N_{12}^j = 0$ 。卫星位置可由广播星历计算得出。假设天线 1 位置已知, 可以计算出 r^j 。所以可以通过载波相位单差的变化情况, 以及卫星信号的入射方向 (r^j 的反方向) 来确定基线矢量的方向。这就是利用单颗北斗卫星进行载波相位干涉测量定向的基本原理。

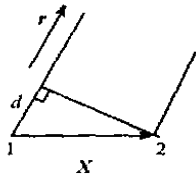


图 1 载波相位单差示意图

Fig. 1 Single difference of carrier phase

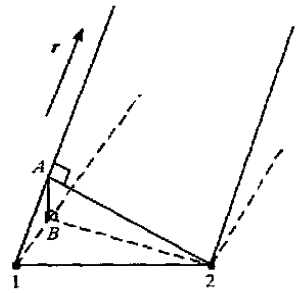


图 2 单星定向方法

Fig. 2 Method of direction determining with single geostationary satellite

如图 2 所示, 基线矢量为 12, 可安装在一旋转支架上, 支架依靠管状水准器严格保持水平。r 为天线 1 到卫星方向的单位矢量; 基线 12 在 r 方向上的投影为 1A, 其长度的小数部分可通过天线 1、2 之间的相位差精确测得, 整数部分可通过旋转基线 180° 的方法获得 (类似于交换天线法^[3,4])。在定向过程中, 首先把基线矢量调至水平; 过 A 点作水平面的垂线交水平面于 B 点, 从而 $AB \perp 1B$ 、 $AB \perp 2B$ 。在直角 $\triangle A12$ 中, $A1$ 、 12 长度已知, 故可求得直角边 $A2$ 的长度; 因为 r 方向已知, 故可求得 r 与水平面的夹角 $\angle NA1B$, 由此可得 AB, 在直角 $\triangle AB2$ 中, 已知两边 AB、 $A2$, 故可求得边长 $B2$; $\angle 1B2$ 在水平面内, 其三边已求得, 由平面三角形的余弦定理, 可求得 $\angle NB12$ 。而矢量 1B 与北方向的夹角 A_B 即 r 的方位角, 可由 r 求得, 令 $\angle NB12 = B$, 由此可得基线 12 的方位角 A_2 , 即

$$A_2 = A_B + B \tag{3}$$

令 $\angle NA1B = D$, $\angle NA12 = H$ 则由图 2 所示几何关系可得

$$\cos B = \frac{\cos H}{\cos D} \tag{4}$$

$R_{A_2}^2 = R_{A_B}^2 + R_B^2$, 其中 A_B 的精度 $R_{A_B} [D / Q_1 \# (180^\circ / P) [0.100016$, D 为卫星星历误差和天线 1 定位误差之和, $D [100m$; Q_1 为天线 1 到卫星 j 的距离, $Q_1 \setminus 3.6 \times 10^7m$ 。因为 D 的精度亦由卫星星历误差和天线 1 定位误差决定, 所以 $R_B = R_{A_B}$ 。因为 $\cos H = \langle i_{12} / d$ (d 为基线长度), 故 R_H 由单差测量精度 R_c 决定, 若设 $R_c = 0.01$ 周, $d = 3m$, 则由此引起的 H 角误差 $R_H [0.1038$ 。因此单星定向精度 R_{A_2} 主要由单差测量精度 R_c 决定, 由星历误差和定位误差引起的定向误差可忽略不计, 即 $R_{A_2} \approx R_B$ 。由 (4) 式以及 $\cos H = \frac{\langle i_{12}}{d}$

得 $B = \arccos \left(\frac{\langle i_{12}}{d \# \cos D} \right)$, 进一步可得

$$R_{A_2}^2 \approx R_B^2 = \left(\frac{5B}{5 \langle i_{12}} \right)^2 \# R_c^2 = \frac{R_c^2}{d^2 (\cos^2 D - \cos^2 H)}$$

由上式可以看出, 定向精度还与基线长度和卫星入射方向有关, 基线越长, 定向精度越高, $|\cos B|$ 越大,

定向精度越差。由图 2 的几何关系可看出, 卫星入射方向与基线方向在当地同一铅垂面时有 $|\cos H| = |\cos D|$, 此时定向精度最低。

2 地球静止轨道卫星与 GPS 卫星的一致化

讨论采用美国 GPS 卫星进行单星定向仿真试验的方法。由于 GPS 卫星轨道高度约为 2×10^7 m, 所以可以把卫星载波信号视为平面波, 式(1)、(2)对 GPS 卫星依然成立, 只不过此时采用的坐标系为 WGS-84 坐标系, 系统时间为 GPS 标准时。

GPS 卫星与地球静止轨道卫星最大的不同是, GPS 卫星与地面测站的相对位置是变化的。所以式(1)中的 r^j 是变化的, 在基线矢量静止时 $\langle j_{12}$ 是变化的。如图 3 所示, t_1 、 t_2 两时刻之间, 由卫星运动造成的载波相位单差变化值为 $\Delta U_{12}^j = 1/K \# [r^j(t_2) \# X_{12} - r^j(t_1) \# X_{12}] = 1/K \# (d_2 - d_1)$, 同时, 由于试验用的 GPS 接收机各通道不共用同一个本振信号, 所以在式(1)中 $D_{t_{12}}$ 项不为零。由于 $D_{t_{12}}$ 在不同时刻是变化的, 所以 $D_{t_{12}}$ 的存在也会造成 $\langle j_{12}$ 的变化。事实上, 在相邻历元为 1s 的时间间隔内, $D_{t_{12}}$ 造成的单差观测值的变化可达到 1000~2000 周。所以 $\langle j_{12}$ 的变化主要是由钟差项造成。因此要想利用 GPS 进行地球静止轨道卫星载波相位干涉测量定向的试验, 首先应消除掉接收机钟差项所造成的单差载波相位的变化量, 其次要消除卫星运动造成的单差载波相位的变化。也即在基线矢量静止的情况下, 载波相位单差观测值减去钟差项和卫星运动造成的变化后应为一常量(不考虑观测误差)。在单星定向过程中, 载波相位单差不含卫星运动产生的相位变化。又因为地球静止轨道卫星载波相位接收机中各通道将共用同一本振信号, 因此载波相位单差中也不含接收机钟差项。其变化规律与消除掉接收机钟差和卫星运动产生的相位变化后的 GPS 卫星单差相位是一样的。

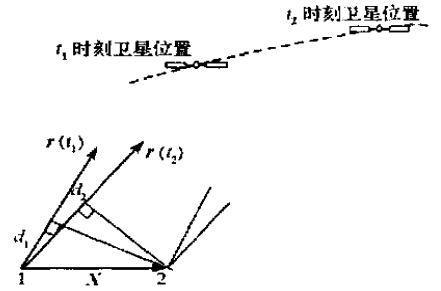


图 3 不同历元 GPS 相位单差的变化
Fig. 3 Change of single difference carrier phase at different epoch

3 GPS 相位测量接收机钟差及卫星运动对单差相位影响的确定

由于试验采用的 GPS 接收机不共用同一本振信号, 从而在载波相位单差中产生了接收机钟差项, 此时的单差观测方程为(1)式。GPS 接收机可在同一时刻观测到多颗卫星, 对每一颗卫星都有形如(1)式的观测方程, 设在 t_i 历元同时观测 m 颗卫星, 则可得如下的观测方程组:

$$\begin{cases} \langle j_{12}(t_i) = \frac{1}{K} r^1(t_i) \# X_{12}(t_i) + f \# D_{t_{12}}(t_i) - N_{12}^1 + E_{12}^1 \\ \langle j_{12}(t_i) = \frac{1}{K} r^2(t_i) \# X_{12}(t_i) + f \# D_{t_{12}}(t_i) - N_{12}^2 + E_{12}^2 \\ \dots \\ \langle j_{12}^m(t_i) = \frac{1}{K} r^m(t_i) \# X_{12}(t_i) + f \# D_{t_{12}}(t_i) - N_{12}^m + E_{12}^m \end{cases} \quad (5)$$

上式中若固定基线不变, 则 $X_{12}(t_i) = X_{12}$, 为常量, 把(5)式写成矩阵形式为:

$$S_i = A_i \# X_{12} + N_{12} + f \# D_{t_{12}}(t_i) + E_i$$

其中

$$S_i = \begin{bmatrix} \langle^1_{12}(t_i) \\ \langle^2_{12}(t_i) \\ s \\ \langle^m_{12}(t_i) \end{bmatrix}_{m@1}, \quad A_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} \Gamma^1(t_i)_{1@3} \\ \frac{1}{K} \Gamma^1(t_i)_{1@3} \\ s \\ \frac{1}{K} \Gamma^1(t_i)_{1@3} \end{bmatrix}_{m@3}, \quad X_{12} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad N_{12} = \begin{bmatrix} N_{12}^1 \\ N_{12}^2 \\ s \\ N_{12}^m \end{bmatrix}_{m@1}, \quad E = \begin{bmatrix} E_2 \\ E_2 \\ s \\ E_2^m \end{bmatrix}_{m@1}$$

连续观测 n 个历元, 可得如下观测方程:

$$S = AX + E \tag{6}$$

其中

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ s \\ S_n \end{bmatrix}_{(n@m)@1}, \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & I & 1 & 0 & , & 0 & 0 \\ A_2 & I & 0 & 1 & 0 & , & 0 \\ s & s & s & s & s & s & \\ A_n & I & 0 & 0 & , & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(n@m)@(3+m+n)}, \quad I \text{ 为 } m \text{ 阶单位阵,}$$

$1 = (1 \ 1 \ , \ 1)^T$, 是 $m@1$ 阶矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} X_{12} \\ N_{12} \\ f\#D_t \end{bmatrix}_{(3+m+n)@1}, \quad \text{其中 } f\#D_t = \begin{bmatrix} f\#D_{12}(t_1) \\ f\#D_{12}(t_2) \\ s \\ f\#D_{12}(t_n) \end{bmatrix}$$

由最小二乘原理可得

$$X = (A^T A)^{-1} A^T S \tag{7}$$

$$D(X) = R^2 (A^T A)^{-1} \tag{8}$$

R^2 为载波相位单差观测值的方差。

由(6)式可得 n 个历元的接收机钟差。在不考虑观测误差的情况下, 载波相位单差减去接收机钟差项后的变化仅由卫星运动产生, 与初始历元相比, 卫星运动产生的相位差为

$$\$ \langle^j_{12} = \langle^j_{12}(t_i) - \langle^j_{12}(t_0) = d_i - d_0 \tag{9}$$

对于卫星 j, 记

$$\$ S^j_{12} = \langle^j_{12}(t_i) - f\#D_{12}(t_i) - (d_i - d_0) \tag{10}$$

若 $\$ S^j_{12}$ 在长时间观测中为一常量(不考虑观测误差), 则可以验证北斗卫星载波相位干涉测量定向的原理。

4 试验及结论

4.1 载波相位单差

现用 CMC 的 Allstar GPS 接收机连续测量 GPS 数据 1151 个历元, 基线长度为 2.9862m, 历元间隔 5s, 卫星个数为 7 颗。将测得数据组成如式(6)的方程组, 再由式(7)解得各个历元的接收机钟差, 由式(9)得各历元每颗卫星位置变化所产生的单差载波相位变化值, 将二者代入(10)式, 可得各卫星载波相位单差测量值的变化情况, 现以其中两颗卫星为例做出二者单差载波相位的变化曲线如图 4、图 5 所示。

从图中可以看出, 载波相位单差在一常值附近变化, 变化幅度约为 0.02 周, 这是由观测误差造成的。

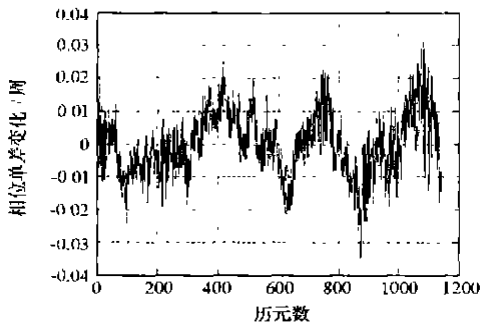


图 4 GPS 6 号星单差载波相位变化曲线
(R= 010098 周)

Fig. 4 Change of single difference carrier phase received from the 6th GPS satellite

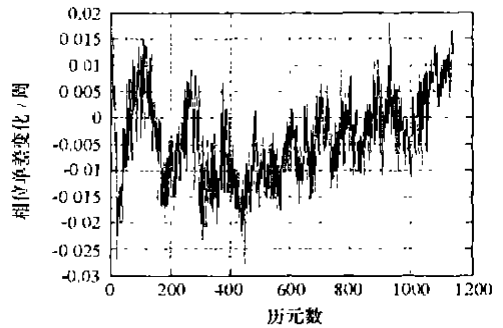


图 5 GPS 23 号星单差载波相位变化曲线
(R= 0.0079 周)

Fig. 5 Change of single difference carrier phase received from the 23rd GPS satellite

4.1.2 基线方位角的确定

在精确测量得到两天线之间的载波相位单差后, 根据单星定向原理, 就可以由卫星的入射方向确定基线的方位角。

图 6 中, 天线 1、2 构成基线矢量, 方向为由 1 到 2。基线 12 事先由 GPS 精密相对定位软件精确测得, 用以确定基线与水平面的夹角。12 矢量在当地北天东坐标系中的值为 (2. 9310m, 0. 1223m, 015585m), 基线长度为 2. 9862m, 基线方位角为 10. 79°(R= 01015b)。由此可知基线 12 并不水平, 而是有一仰角。在实际单星定向过程中, 基线矢量为严格水平, 所以在仿真试验中需要消除这一仰角对定向结果的影响, 把基线矢量投影到水平面内, 该投影的方位角就是基线矢量的方位角。

图 6 中, r 是天线 1 到卫星方向的单位矢量, 即卫星信号入射方向的反方向; 基线 12 在 r 方向上的投影为 1A, 长度为 d , 是两天线之间的相位差与载波波长的乘积; 在直角 $\triangle A12$ 中, $A2 \perp A1$, 边长 $A1$ 、12 已知, 所以 $A2$ 长度可求。过 A 点作水平面的垂线, 交水平面于 B 点, 在直角 $\triangle A1B$ 中, 边长 $A1 = d$, $\angle A1B$ 为卫星入射方向的仰角, 可由 r 求得, $\angle NAB = 90^\circ$, 因此, 边长 $B1$ 、AB 可求。过 2 点作水平面的垂线交水平面于 $2c$ 点, $2c$ 即为基线矢量 12 在当地北天东坐标系中的 y 分量, 是事先已知的, 过 2 点作平行于 $B2c$ 的直线交 AB 于 Bc , 则 $BBc = 2c$, $B2c = 2Bc$, $ABc = AB - BBc$, 在直角 $\triangle ABc2$ 中, ABc 、 $A2$ 已知, $\angle ABc2 = 90^\circ$, 所以 $2Bc$ 可求。在 $\triangle 1B2c$ 中, $1B$ 、 $12c$ 已知, $B2c = 2Bc$ 也已知, 由余弦定理可求 $\angle NB12c$ 。1B 是 r 在水平面上的投影, 由 r 可求矢量 1B 的方位角 A_B , 由此可得矢量 $12c$ 的方位角为 $A_{12c} = A_B + \angle NB12c$, A_{12c} 也就是基线矢量 12 的方位角。令 $\angle NB12c = B$, 则上式可写为 $A_{12c} = A_B + B$, 令 $\angle NA1B = D$, $\angle NA12 = H$, $\angle N212c = C$, 则由图 6 几何关系可得

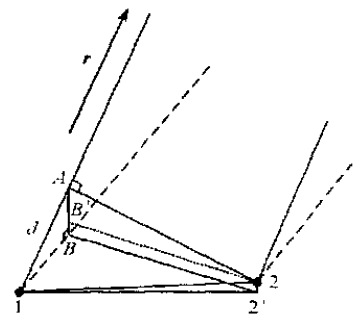


图 6 利用 GPS 单星定向示意图
Fig. 6 Direction determining with one GPS satellite

$$\cos B = \frac{\cos H \sin A \sin C}{\cos A \cos C} \tag{11}$$

当基线水平放置时, $C = 0$, 此时(11)式和(4)式相同。

在以上 GPS 测量数据中截取 200 个历元数据进行单星定向。试验数据含有 7 颗可见卫星的星历和载波相位单差, 利用卫星星历确定每颗卫星在各个历元时刻的位置, 并结合 GPS 测得的天线 1 的坐标, 求得天线 1 到各卫星方向的单位矢量。利用每颗卫星分别进行单星定向试验, 并计算各卫星定向结果的均方差。

表 1 中给出了 7 颗卫星的仰角、卫星入射方向 r 与基线 12 夹角的平均值, 和相应的定向方位角均值、定向精度(均方差)。

表1 利用各可见GPS卫星单星定向结果

Tab.1 Result of direction detemining with each GPS satellite visible

卫星号	平均入射角/(b)	卫星仰角/(b)	$ \cos B $	方位角/(b)	定向精度/(b)
GPS 16号星	88.3	25.2	0.014	10.75	0.040
GPS 4号星	79.4	27.9	0.187	10.77	0.046
GPS 12号星	70.1	29.6	0.369	10.78	0.045
GPS 6号星	102.6	49.9	0.388	10.83	0.039
GPS 23号星	65.2	49.0	0.593	10.71	0.036
GPS 9号星	127.6	40.7	0.841	10.81	0.048
GPS 3号星	50.4	51.1	0.965	10.64	0.259

由表1可以看出,利用GPS应用单星定向原理确定的基线方位角精度可达0.05b。比较各卫星的定向结果可以看出,当 $|\cos B|$ 接近于1,即卫星入射方向与基线接近于在同一铅垂面时,会产生比较大的定向误差(如3号星)。因此,在利用地球静止轨道卫星进行单星定向时,应使基线矢量尽量垂直于卫星入射方向。图7、图8是利用两颗GPS卫星分别进行单星定向的误差曲线。

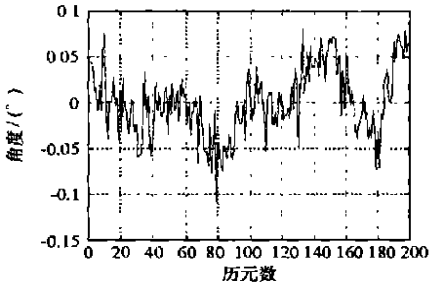


图7 GPS 6号星定向误差曲线

Fig.7 Error of direction determining with the 6th GPS satellite

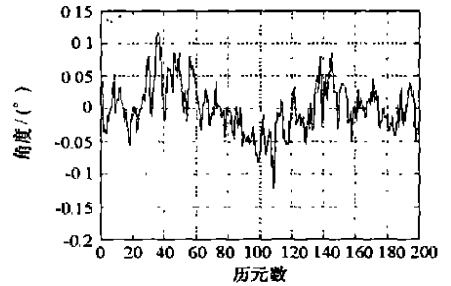


图8 GPS 23号星定向误差曲线

Fig.8 Error of direction determining with the 23rd GPS satellite

5 结束语

当基线长度为2.9862m时,单星定向精度可达0.05b,表明利用地球静止轨道卫星,进行单星定向的原理是正确的,方法可行。只要提高载波相位的测量精度,并调整好基线矢量与卫星信号入射方向的夹角,就可以获得高精度的定向结果。

参考文献:

- [1] 吴杰,等.双星定姿的建模与仿真[J].空间科学学报,1999,19(2):154-159.
- [2] 郑伟,等.双星定姿技术试验研究[J].空间科学学报,2000,20(3):257-261.
- [3] 张守信.卫星测量定位理论与应用[M].长沙:国防科技大学出版社,1996:155-157.
- [4] 周忠谟,等.GPS卫星测量原理与应用(修订版)[M].北京:测绘出版社,2002:152-154.