

文章编号: 1000-8349(2012)04-501-17

GNSS 天线相位中心偏差与变化精确标定方法研究

李晓波^{1,2}, 王小亚², 任金卫¹

(1. 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 综述了地面上天线相位中心偏差的标定方法和天线相位中心变化的归算方法及其优缺点, 并研究了 GNSS 在轨卫星天线相位中心改正的估算策略, 探讨了 LEO GPS 卫星天线相位中心变化的在轨标定, 有利于我国导航系统天线相位中心偏差和变化的标定研究。

关键词: GNSS; 标定; 天线相位中心偏差; 天线相位中心变化; LEO

中图分类号: P128 **文献标识码:** A

1 引 言

在 GNSS 测量应用中, 所观测到的伪距或载波相位值都是基于接收机天线相位中心到卫星天线相位中心之间的距离测量得到, 而在 GNSS 数据处理中, 卫星的位置或轨道是以卫星质心为基准, 接收机天线则是以测站基墩参考点 ARP 为基准。由于天线本身的特性, 天线相位中心与卫星质量中心或接收机基墩参考点不一致, 在东西、南北及高程方面都存在偏差, 而且会随着高度角和方位角的变化而变化, 分别被称为天线相位中心偏差 (PCO) 和天线相位中心变化 (PCV)。在高精度 GNSS 应用中, 如果不考虑天线相位中心改正, 必然会对测量结果带来影响, 其误差有时甚至达到米级。因此, 需要对 GNSS 天线相位中心的偏差和变化做完整的标定研究, 把天线相位中心改正精度提高到毫米级才能满足高精度用户的需求。

通常, 不同类型天线的相位中心偏差和变化模型不一样。随着不同类型的 GNSS 天线混合使用越来越广, 尤其是在参考基准网及实时动态差分应用中, 需要对不同类型天线的相位中心分别进行标定。本文针对目前较常用的 GNSS 天线相位中心偏差标定方法进行探讨, 主要描述了 4 种对天线相位中心偏差标定的方法; 对于 GNSS 天线相位中心变化, 主要有实验室测量和现场标定, 本文主要描述了 3 种对天线相位中心变化标定的方法。天线相位中心变

收稿日期: 2012-03-12; 修回日期: 2012-06-07

资助项目: 国家自然科学基金 (11173048, 10873029); 上海市空间导航与定位技术重点实验室项目 (06DZ22101)

化的标定要比天线相位中心偏差的标定复杂得多,它不仅随高度角和方位角的变化而变化,而且还受到其他多种因素的影响,如周围的环境、多路径效应、天线材料、天线罩、天线类型等,因此,需要不断标定。

对于卫星天线的相位中心,除了要在地面上对其进行初步标定外,发射后,在轨卫星天线的相位中心还需要进一步校准,才能得到更精确的结果。

2 天线相位中心偏差精确标定方法

GPS 大地测量解算提供了地面上两天线之间基线两端的相位中心之间的矢量(即基线长矢量)。但是,一个天线并没有物理意义上明确的相位中心位置,而是一个天线接收信号方向的函数。如果不考虑它的变化,那么所测基线就是两天线的平均相位中心矢量。不同的天线类型,相位中心位置不同;即使相同天线,对于双频接收机来说,每个频率的相位中心位置也是不同的。所以在基线解算时要分别对 L1、L2,以及无电离层的 LC 组合测量。甚短基线(一般只有几米)中,天线的相位中心偏差的影响尤其严重,占主导地位,此时我们可以只考虑天线的相位中心偏差,而忽略 PCV 影响。天线相位中心偏差的标定相对来说比较简单,下面分别介绍旋转观测法、天线交换法、完全流动观测法和相对参考天线的双差相位观测法。

2.1 旋转观测法

2.1.1 旋转标定的基础

在一个高精度 GNSS 测量中,利用 GNSS 数据处理软件进行单基线相对定位处理,通过多次旋转天线提供基线冗余数,如果选择合适的观测策略,就可以进行最小二乘法估算,给出相位中心偏差 PCO。观测方程可以写成:

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{b} \quad (1)$$

其中 \boldsymbol{A} 是系数矩阵,见下面旋转观测法中的方程(3), \boldsymbol{x} 是未知相位中心偏差 PCO 的三维坐标矢量, \boldsymbol{b} 是观测得到的地面上两天线之间的基线矢量, \boldsymbol{v} 是计算得到的基线与观测得到的基线的残差矢量,它的解为:

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{A})^{-1} (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{P} \boldsymbol{b}) \quad (2)$$

其中, \boldsymbol{P} 是权矩阵。在简单校准测量情况下,这种线性模型还可以通过分块矩阵来解算相位中心偏差。但是,这种方法的缺点是忽略了不同接收机基线之间的相关性。

2.1.2 旋转观测法

在上述简单标定测量的基础上,提出旋转观测法。如图 1 所示^[1],在甚短基线情况下,只考虑天线相位中心偏差。测试时,将两个天线分别安置在基线两端,通过水平调整和对准后,两天线均指向地理北方向,观测一段时间后得到第一时段基线矢量;以其中一个为参考天线固定指向地理北方向,另一个天线在第二时段向南顺时针旋转 90° 进行观测,得到第二时段

所观测的基线矢量, 以此类推, 再顺时针旋转两个 90° 分别观测第三时段、第四时段; 然后, 固定这个天线不动, 类似于前四个时段, 使所谓的参考天线顺时针旋转 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, 分别观测第五、六、七个时段。设第 i 时段所观测的这两个天线之间的基线矢量为 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, 两个天线参考点 ARP 之间的矢量为 (x_0, y_0) , 参考天线相对于其天线参考点的相位中心偏差为 (x_1, y_1) , 另一个天线相对于其参考点的相位中心偏差为 (x_2, y_2) 。假设水平方向的平均相位中心偏差的影响是相同的, 则有:

$$\begin{aligned}
 \text{第一时段: } & \begin{cases} \Delta x_1 = x_0 - x_1 + x_2 \\ \Delta y_1 = y_0 - y_1 + y_2 \end{cases} & \text{第五时段: } & \begin{cases} \Delta x_5 = x_0 + x_2 + y_1 \\ \Delta y_5 = y_0 + y_2 - x_1 \end{cases} \\
 \text{第二时段: } & \begin{cases} \Delta x_2 = x_0 - x_1 - y_2 \\ \Delta y_2 = y_0 - y_1 + x_2 \end{cases} & \text{第六时段: } & \begin{cases} \Delta x_6 = x_0 + x_2 + x_1 \\ \Delta y_6 = y_0 + y_2 + y_1 \end{cases} \\
 \text{第三时段: } & \begin{cases} \Delta x_3 = x_0 - x_1 - x_2 \\ \Delta y_3 = y_0 - y_1 - y_2 \end{cases} & \text{第七时段: } & \begin{cases} \Delta x_7 = x_0 - x_2 - y_1 \\ \Delta y_7 = y_0 + y_2 + x_1 \end{cases} \\
 \text{第四时段: } & \begin{cases} \Delta x_4 = x_0 - x_1 + y_2 \\ \Delta y_4 = y_0 - y_1 - x_2 \end{cases} & &
 \end{aligned} \tag{3}$$

其中观测量为基线矢量 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, $(i=1, 2, \dots, 7)$, 未知量 $(x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2)$, 根据最小二乘法, 利用式 (1)、(2), 可得到两个天线各自的相位中心偏差 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 。

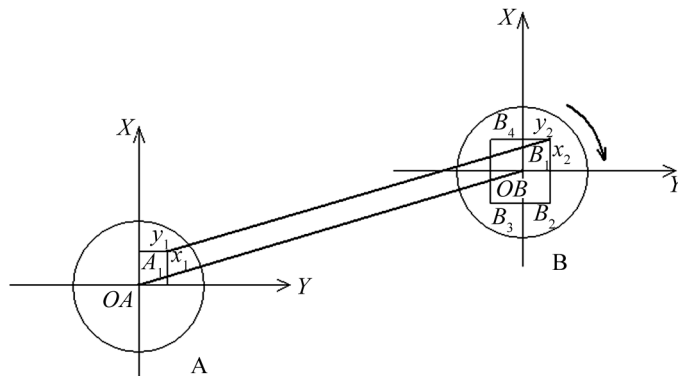


图 1 旋转法^[1]

因为天线在水平面上的旋转并不会引起被测基线在垂直分量上的变化, 所以解算的结果在垂直方向为 0。旋转观测法只用于估算水平分量。为了完善在垂直分量上的缺陷, 又提出了交换天线法。

2.2 交换天线法

交换天线法测定的是一对天线的相位中心在垂直方向上的偏差之差。在相距几米的两测站上各安置一台接收机, 进行第一时段约 30 min 的相对定位后, 将两台接收机的天线互换位置, 此时仅将天线取下, 保持两测站上的三脚架和三角基座不动, 再观测第二时段, 由此

构成第一测回。然后,保持天线不动观测第三时段,再互换两台接收机,观测第四时段,第三和第四时段构成第二测回。按此顺序,共四个测回。

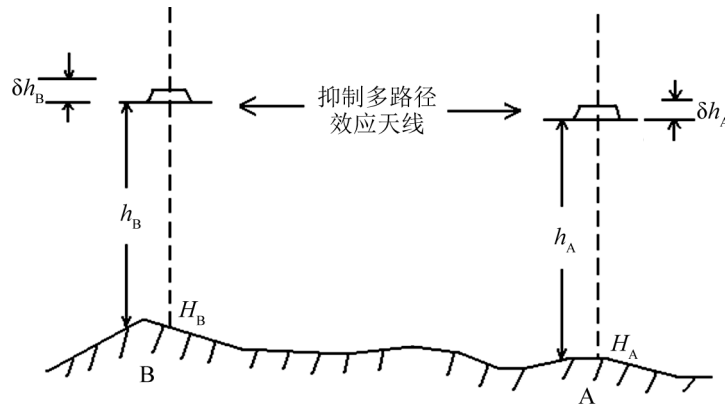


图 2 交换天线法示意图^[2]

如图 2 所示^[2],测站 A、B 点的大地高分别为 H_A 、 H_B , 其对应的接收机 A 和接收机 B 的三脚架高分别为 h_A 、 h_B , 天线相位中心垂直偏差分量分别为 δh_A 、 δh_B , 设 $(U_A)_{i,j}$ 、 $(U_B)_{i,j}$ 分别是测站 A、B 观测卫星得到的各测回大地高观测值, 其中下标 $i = 1, 2, 3, 4$ 代表测回数, $j = 1, 2$ 代表时段数, 则相应的第一测回第一时段有

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = [(U_B)_{1,1} - h_B - \delta h_B] - [(U_A)_{1,1} - h_A - \delta h_A] \quad (4)$$

第一测回第二时段有

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = [(U_B)_{1,2} - h_B - \delta h_A] - [(U_A)_{1,2} - h_A - \delta h_B] \quad (5)$$

两式相减得

$$\delta h_B - \delta h_A = \frac{1}{2} \{ [(U_B)_{1,1} - (U_A)_{1,1}] - [(U_B)_{1,2} - (U_A)_{1,2}] \} \quad (6)$$

令 $\Delta h_{AB} = \delta h_B - \delta h_A$, $(\Delta U_{AB})_{i,j} = (U_B)_{i,j} - (U_A)_{i,j}$, 其中 $(\Delta U_{AB})_{i,j}$ 可以由载波相位观测值双差解求得。

于是得到第 i 测回天线 A 和 B 的相位中心在垂直方向的相对偏差公式为:

$$\Delta h_{AB} = \delta h_B - \delta h_A = \frac{1}{2} (-1)^{i-1} [(\Delta U_{AB})_{i,1} - (\Delta U_{AB})_{i,2}] \quad (7)$$

取 4 个测回的 Δh_{AB} 的平均值即为最后相位中心垂直方向偏差之差值结果。如果其中一个天线的相位中心垂直偏差分量是已知的, 那么可以测定出另一个天线相位中心垂直分量的绝对值。

2.3 完全流动观测法

如果把交换天线法与旋转观测法相融合, 那么不仅可以计算出水平分量上的偏差, 也可以计算出垂直分量的偏差, 这种结合称为完全流动观测法。

先用一条虚构的闭合线连接局域网内的测站, 并把所有的接收机沿着这条线顺时针移动到下一测站, 在第二时段时再逆时针移动, 如图 3^[3]。

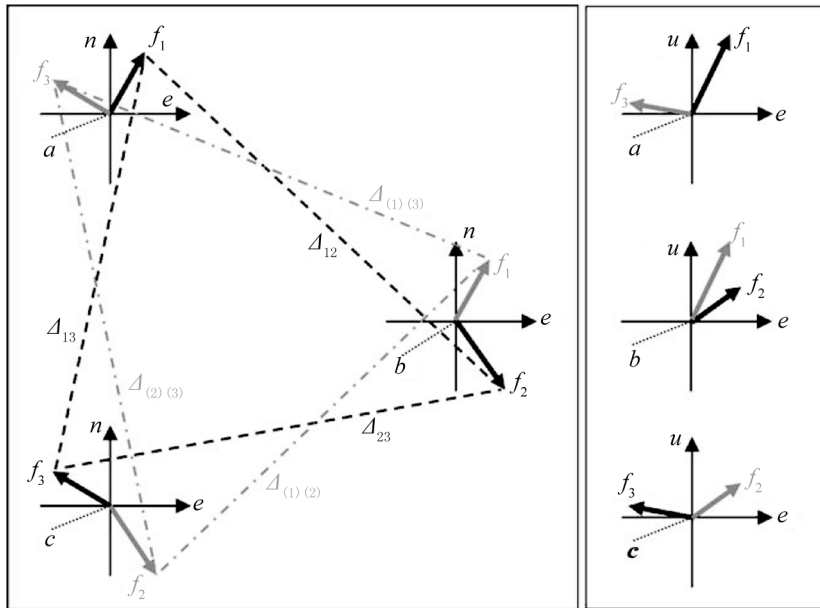


图 3 完全流动观测, 灰色表示流动之后的情况^[3]

与旋转观测法主要不同的是, 在完全流动观测法中, 测站坐标和未知相位值之间是几何相关的, 而且完全流动观测法具有同时估算相位中心偏差所有三个分量的优点, 用这种方法标定天线相位中心偏差更合理些。

2.4 相对参考天线的双差相位观测法

这种方法首先要建立一个校准场^[4], 其中有两个距离与高程都已知的固定基墩: 一个为参考基墩, 一个为测试基墩。参考基墩上安装一个参考天线, 在测试基墩上安装一个与参考天线相同类型的天线, 来测量这个天线在该基墩上的单频相位中心位置。因为两个天线的参考点 (ARP) 之间的距离矢量是已知的, 那么以高度截止角为 15°, 用 24 h 的双差相位观测数据, 得到参考天线分别在 L1, L2, LC 频率的相位中心之间的基线矢量, 与已知的距离矢量之差就是参考天线相应频率的相位中心位置 PCO, 以此作为测试基墩上被测天线的初始相位中心位置。

然后, 在测试基墩上安装被测天线, 解算基线得到的位移, 就是被测天线相对于参考天线的相位中心位置, 知道了参考天线的相位中心位置, 那么被测天线的相位中心位置就可以得到。由于相同类型的不同天线的相位中心偏差通常有几毫米的差异, 所以用相同类型的多个不同测试天线进行标定求平均, 可得到各频率的平均相位中心偏差值, 这就是所求的被测天线的相位中心偏差。

上述 4 种方法,只考虑了相对于 ARP 的相位中心偏差,而忽略了随信号方向变化的天线相位中心变化 (PCV) 的影响。但是,对于高精度的 GNSS 应用来说,不仅要考虑天线的 PCO,而且需要考虑随高度角,甚至方位角的变化而变化的 PCV。

3 天线相位中心变化精确标定方法

对 GNSS 天线,目前有 3 种有效的方法来确定相位中心变化 (PCV),它们分别是:微波暗室测量法、相对现场标定方法和自动机器人标定方法。在最新的天线相位中心变化表格中,有 70% 的接收机天线是用机器人校准得到的。

3.1 微波暗室测量法

微波暗室测量^[5,6]是通过模拟的 GPS 信号来分析被测天线的绝对相位中心改正。在普通实验室内进行天线参数的测量时,周围环境使电磁波产生反射、散射和绕射等现象,对这个室内测量场产生干扰而导致测量精度降低。建立微波暗室,就是在室内周围安装可以吸收微波干扰的材料,然后把 GNSS 天线放在暗室中,通过旋转和倾斜天线,研究模拟 GPS 信号的相位变化来获得绝对 PCV。

这种方法虽然早在 1994 年就出现了,但是微波暗室的设备昂贵、复杂,测定费用高等,使得这种方法不易推广。因此产生了对天线进行现场标定的思想,有相对现场标定和绝对现场标定两种。

3.2 相对现场标定

相对现场标定,即指被测天线的相位中心变化是相对于一个已知参考天线来确定,一般参考天线选择 AOAD/M.T 型天线,其 PCVs 被假定为 0,且其相位中心偏差为已知值^[7]。这两个天线(参考天线与被测天线)设置在一个坐标精确已知的超短基线的基墩上,由于 PCV 随高度角的变化比较明显,而随方位角的变化不大,所以通常只考虑 PCV 随高度角的变化。由于相对 PCV 对高度截止角的变化比较敏感,所以在解算时使用相同的高度截止角。

3.2.1 单差观测解算 PCV

PCV 作为高度角函数,分别对 L1, L2 或 LC 单独测量。对相对 PCV 的测量用单差相位观测^[4],以直接对单颗卫星进行测量。但是用单差观测值,就不能像双差那样把两接收机之间的钟差消除掉。因此,用铷原子振荡器作为外部频标来消除部分单差相位残差中的钟差变化和时间延迟变化。

各频率的单差相位残差是通过把前面所得到的相位中心偏差 PCO 约束到相应频率的相位中心位置而得到的,那么单差相位残差中就只剩残差时间延迟差和 PCV 的变化了。用最小二乘法解算每个历元的钟偏差和一个四阶多项式:

$$\Delta_i = \tau_i + \alpha_1 \theta_i + \alpha_2 \theta_i^2 + \alpha_3 \theta_i^3 + \alpha_4 \theta_i^4, \quad (8)$$

其中, Δ_i 表示单差相位残差, θ_i 表示高度角, α_i 是多项式系数, τ_i 是剩余的相对时间延迟。

在上面的多项式中没有估算多项式中的常数项, 因为其常数项不能从钟值中分离出来, 但是这个常数项并没有实际意义, 所以要将其从这些多项式系数所计算的被测天线的初始 PCV 中剔除, 即从 PCV 中同时减去一个常数项, 使得 PCV 在高度角 z 为 90° 时的值为 0。即约束

$$\text{PCV}(z = 90^\circ) = 0 \quad . \quad (9)$$

对相同类型的多个不同天线进行校准, 得到的相位中心偏差和变化的 RMS 重复性可达到几个毫米, 说明其精确度还是比较高的。

3.2.2 三差观测解算 PCV

选择合适的已知相位中心偏差的接收机天线, 收集 24 h 的 GNSS 相位观测数据, 分别对相位观测值进行单差、双差、三差^[8]来逐步消除一些误差, 剩余残差中只包含随高度角变化的 PCV, 被测天线的 PCV 作为一个四阶多项式^[4,8], 用最小二乘平差即得多项式系数。

以频率 L1 为例, 在观测历元 t_1 , 被测天线 (测站 1) 观测到卫星 i , 产生的累积载波相位观测量为:

$$\begin{aligned} \Phi_1^i(t_1) = & \rho_1^i(t_1) - c \cdot dT_1 + c \cdot dT^i + \frac{c}{f_{L1}} \cdot N_1^i(1) - \Delta_{1,\text{ion}}^i(t_1) + \\ & \Delta_{1,\text{trop}}^i(t_1) + d_1(t_1) + d^i(t_1) + \text{PVC}_1(\theta^i(t_1)) \quad , \end{aligned} \quad (10)$$

其中, Φ_1^i 为历元 t_1 被测天线的相位观测值, $\rho_1^i(t_1)$ 是卫星到接收机的真实距离, c 是电磁波速度, dT_1 是接收机钟差 (GPS 时), dT^i 是卫星钟差 (GPS 时), f_{L1} 是 L1 的频率, $N_1^i(1)$ 是从卫星到接收机的 L1 载波波长的未知整周数, $\Delta_{1,\text{ion}}^i(t_1)$ 是 L1 的电离层改正, $\Delta_{1,\text{trop}}^i(t_1)$ 是 L1 的对流层延迟, $d_1(t_1)$ 是接收机的硬件延迟, $d^i(t_1)$ 是卫星硬件延迟, $\text{PVC}_1(\theta^i(t_1))$ 是被测天线 L1 频率的 PCV, $\theta^i(t_1)$ 是卫星 i 在 t_1 时刻的高度角。

在相同历元观测同一颗卫星, 参考天线 (测站 2) 的累积载波相位观测量为:

$$\begin{aligned} \Phi_2^i(t_1) = & \rho_2^i(t_1) - c \cdot dT_2 + c \cdot dT^i + \frac{c}{f_{L1}} \cdot N_2^i(1) - \Delta_{2,\text{ion}}^i(t_1) + \\ & \Delta_{2,\text{trop}}^i(t_1) + d_2(t_1) + d^i(t_1) + \text{PVC}_2(\theta^i(t_1)) \quad . \end{aligned} \quad (11)$$

上述式 (10) 和式 (11) 进行单差 SD, 得到:

$$SD_{1-2}^i(t_1) = \rho_{1-2}^i(t_1) - c \cdot dT_{1-2} + \frac{c}{f_{L1}} \cdot N_{1-2}^i(1) + d_{1-2}(t_1) + \text{PVC}_{1-2}(\theta^i(t_1)) \quad . \quad (12)$$

可以看出, 跟踪同一颗卫星的两个接收机之间有关卫星的 dT^i 和 $d^i(t_1)$ 消除, 因为两台接收机距离比较近, 所以也消除了电离层项 ($\Delta_{1,\text{ion}}^i(t_1)$ 和 $\Delta_{2,\text{ion}}^i(t_1)$), 对流层项 ($\Delta_{1,\text{trop}}^i(t_1)$ 和 $\Delta_{2,\text{trop}}^i(t_1)$)。相对 PCV 可以用一个四阶多项式来表示:

$$\text{PVC}_{1-2}(\theta^i(t_1)) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (\theta^i(t_1)) + \alpha_2 \cdot (\theta^i(t_1))^2 + \alpha_3 \cdot (\theta^i(t_1))^3 + \alpha_4 \cdot (\theta^i(t_1))^4 \quad . \quad (13)$$

同样地, 用上面的被测天线 (测站 1) 和参考天线 (测站 2) 观测卫星 j , 可写出对卫星 j 的单差相位观测值:

$$SD_{1-2}^j(t_1) = \rho_{1-2}^j(t_1) - c \cdot dT_{1-2} + \frac{c}{f_{L1}} \cdot N_{1-2}^j(1) + d_{1-2}(t_1) + \alpha_0 + \alpha_1 \cdot (\theta^j(t_1)) + \alpha_2 \cdot (\theta^j(t_1))^2 + \alpha_3 \cdot (\theta^j(t_1))^3 + \alpha_4 \cdot (\theta^j(t_1))^4 . \quad (14)$$

卫星到两测站上接收机的真实距离之差 $\rho_{1-2}^i(t_1)$ 和 $\rho_{1-2}^j(t_1)$ 可以计算得到, 并被代入测量值中而消除, 为了方便, 在之后的双差观测值中消除该项, 而作为已知值代入观测值中。

在特定历元 t_1 , 在测站 1 和测站 2 之间求单差后, 再对卫星 i 和 j 求双差, 可以消除测站上两接收机之间的钟偏差:

$$DD_{1-2}^{i-j}(t_1) = + \frac{c}{f_{L1}} \cdot N_{1-2}^{i-j}(1) + \alpha_1 \cdot [(\theta^i(t_1)) - (\theta^j(t_1))] + \alpha_2 \cdot [(\theta^i(t_1))^2 - (\theta^j(t_1))^2] + \alpha_3 \cdot [(\theta^i(t_1))^3 - (\theta^j(t_1))^3] + \alpha_4 \cdot [(\theta^i(t_1))^4 - (\theta^j(t_1))^4] . \quad (15)$$

在连续历元 t_2 , 同样地, 在测站 1 和测站 2 观测卫星 i 和 j , 所得双差观测方程为

$$DD_{1-2}^{i-j}(t_2) = + \frac{c}{f_{L1}} \cdot N_{1-2}^{i-j}(1) + \alpha_1 \cdot [(\theta^i(t_2)) - (\theta^j(t_2))] + \alpha_2 \cdot [(\theta^i(t_2))^2 - (\theta^j(t_2))^2] + \alpha_3 \cdot [(\theta^i(t_2))^3 - (\theta^j(t_2))^3] + \alpha_4 \cdot [(\theta^i(t_2))^4 - (\theta^j(t_2))^4] . \quad (16)$$

为了剔除 L1 载波周期的未知整周模糊度, 使式 (16) 和 (15) 相减, 得到三差相位观测方程为:

$$TD_{1-2}^{i-j}(t_{2-1}) = +\alpha_1 \cdot A_1^{i-j}(t_{2-1}) + \alpha_2 \cdot A_2^{i-j}(t_{2-1}) + \alpha_3 \cdot A_3^{i-j}(t_{2-1}) + \alpha_4 \cdot A_4^{i-j}(t_{2-1}) , \quad (17)$$

其中,

$$A_1^{i-j}(t_{2-1}) = [(\theta^i(t_2)) - (\theta^j(t_2))] - [(\theta^i(t_1)) - (\theta^j(t_1))] , \quad (18)$$

$$A_2^{i-j}(t_{2-1}) = [(\theta^i(t_2))^2 - (\theta^j(t_2))^2] - [(\theta^i(t_1))^2 - (\theta^j(t_1))^2] , \quad (19)$$

$$A_3^{i-j}(t_{2-1}) = [(\theta^i(t_2))^3 - (\theta^j(t_2))^3] - [(\theta^i(t_1))^3 - (\theta^j(t_1))^3] , \quad (20)$$

$$A_4^{i-j}(t_{2-1}) = [(\theta^i(t_2))^4 - (\theta^j(t_2))^4] - [(\theta^i(t_1))^4 - (\theta^j(t_1))^4] . \quad (21)$$

取长时间序列数据, 用最小二乘平差来解算参数, 式 (17) 可以表达成:

$$TD_{N \times 1} = K_{N \times 4} \cdot \alpha_{4 \times 1} ,$$

其中,

$$K_{N \times 4} = \begin{bmatrix} A_1^{i-j}(t_{2-1}) & A_2^{i-j}(t_{2-1}) & A_3^{i-j}(t_{2-1}) & A_4^{i-j}(t_{2-1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_1^{i-j}(t_{n-(n-1)}) & A_2^{i-j}(t_{n-(n-1)}) & A_3^{i-j}(t_{n-(n-1)}) & A_4^{i-j}(t_{n-(n-1)}) \end{bmatrix} , \quad (22)$$

$$\alpha_{4 \times 1} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4]^T , \quad (23)$$

$$\alpha = (K^T \cdot K)^{-1} \cdot (K^T \cdot TD) . \quad (24)$$

得到相对 PCV 参数, 由于参考天线相对于被测天线的 PCV 非常小, 可以忽略, 对其拟合求得卫星在各高度角时的 PCV 值。此时, 经 PCV 改正过的双差载波相位数据的标准偏差小于 $1 \text{ cm}^{[8]}$ 。

从 1996 年 6 月 30 日起, IGS 的各个分析中心开始使用相对相位中心改正模型。但是, 事实上参考天线的绝对 PCVs 值并不为 0, 并且还可能存在其他缺陷, 会产生系统误差。于是, Wubben 等人^[9,13]讨论了相对技术的弊端, 提出用绝对现场校准来进行天线相位中心标定。

3.3 绝对现场标定

在 20 世纪 90 年代中后期, 德国汉诺威大学和 Geo++ 公司开始合作研制一种精密机器人, 用于对随高度角和方位角变化的天线相位中心变化的绝对现场标定。机器人标定方法^[10,11]是根据 GPS 卫星星座在连续两个平恒星日内相同时刻的空间分布相同的特性 (由载波相位观测方程可知, 此时可以消除与几何距离有关的误差, 多路径效应也在很大程度上被减弱), 把天线安置在普通环境中, 在短基线的一端安置天线相位中心已知的接收机, 另一端的待测接收机天线安装在自动机器人上, 自动机器人按照一定的步长进行上下左右旋转测量并采集 GPS 数据, 每转动一次测量数分钟, 第二天时将待测天线初始方向旋转某角度 (如果接收机天线在两个恒星日内保持天线方向不变, 则多路径和 PCV 均被消除) 进行测量, 得到大量观测值。然后利用这些观测值, 解算用于拟合天线相位中心模型的球谐函数系数 (由于随方位角和高度角变化的天线相位中心变化的空间分布并不均匀, 故一般选择用球谐函数来描述 PCV^[12]), 得到最终各个姿态时的 PCVs 值。其具体步骤如下。

在某一历元, 接收机对卫星的相位观测方程为:

$$\Phi_i^j = \rho_i^j(t) - c \cdot dt_i + c \cdot dT^i + \lambda \cdot N_i^j - \Delta_{\text{ion},i}^j + \Delta_{\text{trop},i}^j + \Delta_{\text{MP},i}^j + d_{\text{PCV},i}^j + \varepsilon \quad (25)$$

以平恒星日为周期^[10,13], 连续两个平恒星日内的相同时刻观测方程之差, 其操作算子被记作 δ^{SID} , 则有:

$$\delta^{\text{SID}} \Phi_i^j = -c \cdot (\delta^{\text{SID}} dt_i - \delta^{\text{SID}} dT^j) + \lambda \cdot \delta^{\text{SID}} N_i^j - \delta^{\text{SID}} \Delta_{\text{ion},i}^j + \delta^{\text{SID}} \Delta_{\text{trop},i}^j + \delta^{\text{SID}} \varepsilon \quad (26)$$

可以看出其中与几何距离有关的项、多路径效应和 PCV 都被消除了。设在短基线中, 已知天线相位中心改正的接收机作为基线一端, 另一端为待测天线对卫星进行观测, 用双差来消除钟差项和大气延迟项可得到方程:

$$\nabla \Delta \delta^{\text{SID}} \Phi_{i,k}^{j,m} = \nabla \Delta \lambda \cdot \delta^{\text{SID}} N_{i,k}^{j,m} + \nabla \Delta \delta^{\text{SID}} \varepsilon \quad (27)$$

如果在第二天, 参考测站天线固定不动, 而待测天线的初始方位角水平旋转 180° , 那么在两个平恒星日内的待测天线的相位观测方程相减为:

$$\delta^{\text{SID}} \Phi_i^j = -c \cdot (\delta^{\text{SID}} dt_i - \delta^{\text{SID}} dT^j) + \lambda \cdot \delta^{\text{SID}} N_i^j - \delta^{\text{SID}} \Delta_{\text{ion},i}^j + \delta^{\text{SID}} \Delta_{\text{trop},i}^j + d_{\text{PCV},i}^{(0,0),j} - d_{\text{PCV},i}^{(\alpha,z),j} + \delta^{\text{SID}} \varepsilon \quad (28)$$

则双差方程为

$$\nabla\Delta\delta^{\text{SID}}\Phi_{i,k}^{j,m} = \nabla\Delta\lambda \cdot \delta^{\text{SID}}N_{i,k}^{j,m} + \nabla\Delta\delta^{\text{SID}}\varepsilon + \nabla\Delta d_{\text{PCV},i,k}^{j,m}, \quad (29)$$

其中 $\nabla\Delta d_{\text{PCV}}$ 是仅针对被测天线的 PCV。

天线指向的变化会引起观测相位差, 这个差与基线中参考站所用天线无关, 而与被测天线有关, 所以可用这个相位差来建立相位中心变化的模型。以一颗卫星的信号作为信号源, 在相位观测中用不同相位中心位置观测同一颗卫星来建立相位中心变化模型, 即

$$\Delta d_{\text{PCV}}(\alpha_i, z_i, \Delta\alpha, \Delta z) = d_{\text{PCV}}(\alpha_i, z_i) - d_{\text{PCV}}(\alpha_j, z_j), \quad (30)$$

其中 $\alpha_j = \alpha_i + \Delta\alpha$, $z_j = z_i + \Delta z$ 。

用机器人按照上述步骤, 在连续两个平恒星日内以一定步长不断旋转并倾斜测量, 可以得到大量相位中心变化值, 代入球谐函数拟合可求出待定 PCV。

需要说明的是, 由于卫星天线的特殊性, 其在地面标定的方法与接收天线相同, 但其偏差值的参考点应该是卫星质心, 所以要得到卫星质心相对于估算 PCO 时所使用的参考平面的矢量值; 另外卫星天线的高度截止角相对较大, 那么在高度截止角以下的角度, 就不考虑其 PCV。为了与 ANTEX 文件中的表格值相对应, 高度角要换算成天顶角。卫星天线上天后, 其天底角与接收机天顶角有一一对应关系 (见 4.1 节), 换算后的结果即可采用。

3.4 三种标定方法的对比

尽管清楚地知道使用相对 PCV 存在着系统误差的影响, 但是在 2006 年 11 月 5 日之前, IGS 公布使用的是相对现场校准方法所得的相对相位中心改正模型, 直到同年 11 月 6 日之后, IGS 才开始使用由 GFZ 和 TUM 处理 10 多年的 GPS 数据所得的绝对天线相位中心改正模型来代替相对相位中心改正模型。

利用微波暗室测量得到绝对天线相位模式的标定方法早在 1994 年就出现了, 并且所得结果是可实际应用的。但是, IGS 没有用由该方法得到的绝对 PCVs, 而是采用相对于 AOAD/MLT 参考天线的相对 PCV, 原因是微波暗室测量法所得的天线相位中心绝对模型用在全球 GPS 解算中, 与空间大地测量技术解算的结果是不一致的。例如相比于 VLBI 和 SLR 所得的结果, 会在 GPS 全球网域内引起约 15×10^{-9} 的地球框架尺度变化^[5,14], 而 15×10^{-9} 的尺度因子相应地会引起全球所有站点约 10 cm 的高程变化^[14], 这种变化明显地比 IGS 所用模型的结果大 5~10 倍; 而把当时 IGS 所用的相对天线相位中心模型引进全球解算时, 虽然也有 $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9}$ 的变化, 但其结果与 VLBI 和 SLR 的结果较一致。

机器人现场标定结合了前两种方法的优点^[5], 它给出绝对标定值, 消除了参考天线的相位中心影响, 同时, 也大大减弱了多路径效应, 观测值覆盖整个天线半球, 可获得高度角为 $90^\circ \sim 0^\circ$ 的 PCVs, 不会受到“极洞”的影响, 且考虑了 PCVs 随方位角的变化; 而相对 PCVs 对高度截止角的依赖性比较强, 只能使用高度角在 10° 以上的观测值。另外, 用机器人方法可以执行数千次的观测, 可大大消除多路径效应, 以更精确地定义相位中心的位置, 这对于确定高分辨率和高精确度的 PCVs 模型是很有必要的, 尤其是随方位角变化的 PCVs 也能被准确而可靠地测定; 用机器人标定一次仅需几个小时, 且其测量的相位中心变化值与

微波暗室测量结果相吻合达到 1 mm 的水平^[24]。但是, 这种标定方法需要的机器人, 对测量的高度角和方位角步长定位要求必须非常精确, 因此这种标定方法也是相当昂贵的。

不同标定方法有不同的优缺点, 通过实验室标定与绝对现场标定的对比和绝对 PCVs 与相对 PCVs 的对比, 表明绝对 PCVs 有更好的可靠性和准确性, 这也是 IGS 自 2006 年后建议使用绝对天线相位中心改正模型的原因。

4 在轨卫星天线相位中心校准

前面总结了在地面上标定 GNSS 天线相位中心偏差与变化的方法。研究表明, 对于更高精度的 GNSS 应用, 卫星天线的相位中心除了在地面上进行标定外, 还需要对其在轨的 PCV 继续标定^[15], 以达到更高精度。

4.1 在轨卫星天线与地面接收机天线的关系

首先在卫星发射之前, 必须在地面上对其天线进行初步标定, 一般选择使用微波暗室方法对其进行绝对校准, 得到初始的 PCV 和 PCO。卫星发射后, 地面接收机天线与卫星天线形成一一对应关系, 即要求每一个地面接收机天线的相位中心改正值都对应于在轨卫星天线在相应的天底角时的 PCV 和 PCO。其具体关系如图 4 所示。

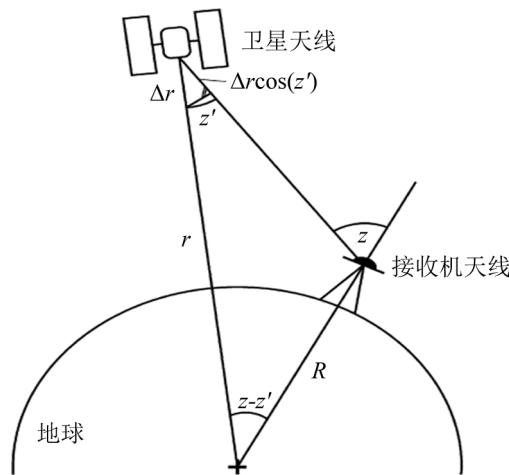


图 4 在轨卫星天线与地面接收机天线相位中心变化的相互关系

在轨卫星天线的相位中心与接收机天线的相位中心类似, 都是随发射信号变化而变化。随高度角变化的卫星天线的 PCVs 与接收机天线的 PCVs 存在一一对应关系, 图 4 中卫星的天底角 z' 与地面接收机的天顶角 z 之间有如下关系^[16]:

$$\sin(z') = \frac{R}{r} \sin(z) \quad , \quad (31)$$

其中 R 是地球半径, r 是卫星到地心的距离。当接收机天线的观测天顶角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化时, 与之对应的卫星天底角在 $0^\circ \sim 14.28^\circ$ 之间变化, 其最大值为

$$z'_{\max} = \arcsin\left(\frac{R_{\max}}{r_{\min}} \cdot \sin(z_{\max})\right) . \quad (32)$$

卫星天线相位中心改正模式包含卫星天线相位中心偏差 PCO 误差和随天底角变化的 PCV 值。地面天线相位中心模式与在轨卫星发射天线相位中心的模式相一致^[16], 即

$$\phi'(z') = \phi(z) . \quad (33)$$

接收天线随天顶角方向的变化影响着卫星发射天线相位中心的变化, 即

$$\Delta\phi'(z') = \Delta\phi(z) . \quad (34)$$

卫星天线相位中心改正量, 可以由卫星天线相位中心在 z 方向 (卫星指向地球的方向) 的偏差变化量 Δr 得到:

$$\Delta\phi'(z') = -\Delta r(1 - \cos z') . \quad (35)$$

卫星天线和接收机天线的 PCO 和 PCV 之间有一定相关性。因此, 在估算接收机天线和卫星天线的 PCV 和 PCO 时, 必须先固定其中三个作为初始值, 来计算第四个值。所以估算卫星天线的 PCV 时, 需要已知接收机天线的 PCO、PCV 和卫星天线的 PCO 值。一般地, 对于接收机天线, 使用自动机器人标定得到绝对相位中心偏差和变化值; 对于卫星天线, 使用在地面上标定的卫星天线相位中心偏差值 PCO。天线相位中心的位置是采用天线相对于一个 APR 或卫星质心的平均相位中心偏差常数和相对于平均相位中心的变化来描述的^[17], 即 PCO 和 PCV。GPS 天线 PCO 的变化会引起 PCV 的变化, 所以 PCO 和 PCV 实际上不能同时分离开来计算, 必须结合起来计算, 称之为“raw PCV”^[18,19]。

4.2 在轨卫星天线相位中心变化的估算策略

当卫星发射后, 在轨卫星天线的相位中心受到卫星姿态变化的影响, 变化更加复杂, 一般都是先假设相同类型的卫星有相同的 PCO 和 PCV, 再估算特定类型的绝对相位中心模型。

首先输入数据^[16,20]: 利用全球多个分布均匀的 IGS 测站得到的双差相位数据, 输入初始坐标文件、初始轨道文件 (来自欧洲定轨中心每天的解算)、接收机和卫星天线信息文件等。其中接收机信息文件^[21]包括接收机类型、用机器人校准或相对标定转换成绝对标定得到的接收机天线的 PCO 和 PCV 等相关信息, 卫星信息文件^[21]中包括 IGS 官方的卫星天线 PCO、卫星类型、时间窗口等。

在天底角范围内选择合适的分辨率, PCV 作为分段线性函数, 接收机天线采用绝对天线相位中心改正模型, 用无电离层的线性 LC 组合的观测值 (消除电离层影响), 固定整周模糊度, 权矩阵选为 $w = \cos^2 z$ (z 为天顶角), 采用合适的采样率及高度截止角, 以更精确地估算相应天底角范围的 PCV 值。由于卫星天线的相位中心改正与地球参考架尺度因子、对流层延迟、接收机和卫星钟、轨道参数、地球自转参数以及接收机天线的相位中心改正等之间有

高度相关性, 所以通常把卫星天线的相位中心变化 (即 raw PCV) 与测站坐标、对流层参数、卫星和接收机钟、轨道参数和地球自转参数一起估算。如 GFZ 和 TUM^[19] 就是采用上面的方法估计 14 个轨道参数、6 个地球自转参数及其变化率、天顶延迟 (采用 Neill 的映射函数, 3 h 一组)、测站坐标、钟差和 15 个 PCV 参数 ($0^\circ \sim 14^\circ$, 每度 1 个参数), 参数之间采用分段连续线性函数模型, 这样就求得每日相位模式, 得到 “raw PCV”, 然后再分离成 PCO 和 PCVs。

由于卫星钟差和 PCV 严重相关, 却很难分离, 为避免造成 PCV 解算奇异, 因此约束随天底角变化的 “raw PCV” 之和为零^[16]。即:

$$\sum_{z'=0^\circ}^{14^\circ} \text{PCV}_{\text{raw}}(z') = 0 \quad . \quad (36)$$

还有一个选择性的约束条件^[16]:

$$\text{PCV}_{\text{raw}}(z' = 0^\circ) = 0 \quad . \quad (37)$$

上述估算出的每日 raw PCV 的值, 为了分离 PCV 和 PCO, 约束 PCV 有最小偏差, 即 PCV 最平滑^[18,19]。在 PCV 和 PCO 的 z 偏差之间有如下关系:

$$\text{PCV}_{\text{raw}}(z') = \text{PCV}(z') + \Delta z \cdot (1 - \cos z') \quad . \quad (38)$$

可以通过最小二乘法拟合来分离最平滑的 PCV 和相关的 z 偏差:

$$\sum_j [\text{PCV}_{\text{raw}}(z') - a_i - \Delta z \cdot (1 - \cos z')]^2 = \min \quad (j = 1, 2, \dots, 14) \quad . \quad (39)$$

其中 a_i 是 $\text{PCV}_{\text{raw}}(z')$ 常数项, i 指某一颗卫星。拟合的残差就是最平滑的 PCV。由此得到真正的每日 PCV 和 PCO, 对每日的 PCV 和 PCO 求平均即得到该卫星的平均 PCV 和 PCO。为检验在有相同天线的不同卫星 PCV 之间的重复性, 可以选择用相同类型的单个卫星的每日 PCV 与此类型的所有卫星的每日 PCV 的平均值进行对比, 如图 5 所示^[16]。

结果表明, 相同卫星的每日 PCV 之间的吻合性很好, 而且在相同类型的不同卫星之间, 每日解算的随天底角变化的 PCV 之间的重复性也很好; 因此, 相同类型的卫星天线可使用相同的相位中心变化模型。对于天线 PCV, 可以用以下两种建模方式^[16,21]来拟合各姿态的 PCV:

(1) 只考虑高度角时用分段线性函数, 即多边形逼近来拟合模型。正如上述解算中所用, 在估算时每个多边形点作为一个参数, 其数量是可选择的。相比于下面的球谐函数, 这种方法更容易添加到各种 GNSS 数据处理软件中使用。

(2) 既考虑高度角, 又考虑方位角时, 为了对 PCV 模型化, 采用一个在水平方向和垂直方向 (参考于当地水平坐标系) 都连续的周期函数来表示与卫星方位角和高度角相关的 PCV, 即采用球谐函数, 该方法所得模型更有意义。

$$\text{PCV}(\alpha, z) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha) P_{nm}(\cos z) \quad , \quad (40)$$

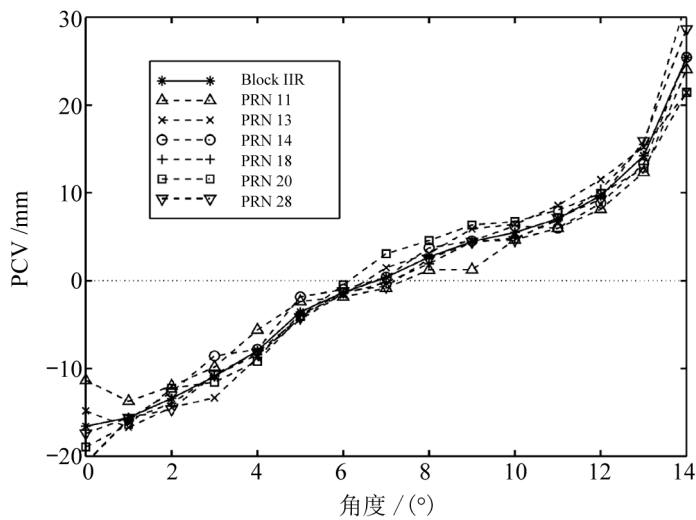


图5 单颗卫星 PCV 与 Block IIR 卫星 PCV 的对比^[16]

其中, $PCV(\alpha, z)$ 表示所给方向上的相位中心变化, α 和 z 表示对应的方位角和天顶角, p_{nm} 表示标准勒让德多项式, a_{nm} 和 b_{nm} 是标准球谐函数系数, 为待求参数, n 和 m 是球谐函数的阶和级。把之前所求的特定卫星类型的离散 PCV 参数代入等式左边, 用合适的 n 和 m 代入右边, 只有 a_{nm} 和 b_{nm} 是待求参数, 经过多次测试, 选择最好的 n 和 m (目前国外多选用 $n_{\max} = m_{\max} = 8$), 求出最合理的 a_{nm} 和 b_{nm} , 就可得各个姿态时的卫星天线 PCV。计算卫星天线的相位中心偏差时, 其 x 和 y 方向的偏差使用地面标定提供的值; 而对于不同的卫星其 z 方向的偏差值不同。

4.3 LEO GPS 卫星的在轨校准

LEO GPS 卫星在高度 500~1000 km 的轨道上运行, 其天底角可达到 17° , 这样就可给出较好的大天底角和大于 14° 天底角的 GPS 卫星天线相位中心变化模型, 且由 LEO 观测估计的 GPS 卫星天线相位中心变化不受对流层大气的影响。目前, 多数作者采用 GPS 卫星天线相位中心变化和 LEO 卫星天线相位中心变化一起解算, 原因是防止 LEO 卫星天线相位中心变化影响 GPS 卫星天线相位中心变化的估计。具体的方法是以 igs08.atx^[22] 中的 GPS 卫星天线的相位中心 PCO 和 PCV 作为相应的 14° 天底角以下的 GPS 卫星天线相位中心的初始值^[23], 14° 以上的相位中心变化值假设为常数。LEO 天线相位中心偏差是以其所携带接收机天线类型的标称值为其已知值, GPS 卫星的 PCVs 采用随天底角变化的分段线性函数, LEO 的 PCVs 采用 $5^\circ \times 5^\circ$ 的随高度角和方位角变化的分段线性模型解算。

另外, 还有作者在 LEO 定轨时用无电离层线性 LC 组合的非差相位观测值, 采用与分析中心星历产品所用历元相匹配的采样间隔来收集观测值。为避免 GPS 钟误差的影响, 采用欧洲定轨中心相应采样间隔的钟产品进行精密定轨, 载波相位残差值被看成是随高度角变化的 PCV^[24], 如:

$$\Delta(\Phi_{\text{orb}} - \Phi_{\text{model}}) = \text{PCV}_{\text{true}}(e) - \text{PCV}_{\text{model}}(e) = \Delta\text{PCV}(e) , \quad (41)$$

其中, e 表示 LEO 卫星相位中心到 GPS 卫星相位中心的单位向量。

所得结论为, 用 LEO 卫星估算的特定 GPS 卫星在天底角小于等于 14° 的 PCV 值, 与 igs08.atx 中的相应天底角的 PCV 值相比, 其吻合度达到 2~3 mm; 与在地面上估算的特定 GPS 类型的 PCV 值相比, 其吻合度好于 1 mm。所以可以用 LEO 卫星测量得到的 PCV 值来扩展 igs08.atx 中天底角在 14° 以上的 PCV 值。

虽然利用 LEO 观测可获得更大天底角的 GPS 卫星相位中心改正值, 但是这样的卫星比较少, 且近地环境可能会对 LEO 卫星的天线有不良影响^[23], 因此综合多个 LEO 卫星来确定 GPS 卫星天线相位中心变化是非常有意义的。

5 总 结

本文介绍了标定 GNSS 天线相位中心偏差与变化的多种方法, 并列举了各种方法的优劣。通过对比 3 种天线相位中心变化的标定方法, 表明机器人绝对现场标定的绝对 PCVs 比相对 PCVs 更精确。对于在轨卫星天线相位中心的标定, 由于其 PCV 与测站坐标、对流层延迟、轨道参数和地球自转参数等之间有高度相关性, 所以在估算 PCV 时, 这些参数也必须一起估算。

在轨 GPS 卫星的最大天底角为 14° , 由于 LEO GPS 卫星的轨道在 500~1300 km 的高度, 其最大天底角可达到 17° 。

由于 SVN714 的 L2 信号异常^[20], 不同于其他卫星, 其 PCV 随天底角的变化更明显^[20,25], 所以除了 R714 卫星外, 一般认为相同卫星类型的天线 PCV 相同。

影响 PCV 特征的因素很复杂, 只能概括描述, 如一个天线有附加遥感天线, 天线罩的形状和结构, 是否有接地层的存在等^[26], 都会导致 PCV 的显著变化。绝对现场标定方法的发展和在轨卫星天线绝对 PCVs 的确定, 使得 GNSS 的应用领域会有进一步的扩展 (如 GPS 监测地下水), 对地球参考框架的建立和维持作用将会有一些提高, 对定轨、定位、GPS 气象学、板块运动和地壳形变等监测的精度和可靠性也会有较大改善。

参考文献:

- [1] 陈逸群, 刘大杰. 测绘通报, 2000, (12): 15
- [2] 蔡宏翔. 测绘技术装备, 2000, 2(3): 23
- [3] Bányai L. Journal of Geodesy, 2005, 79(4): 222
- [4] Mader G L. GPS Solutions, 1999, 1: 55
- [5] Rothacher M, Schaer S, Mervart L, et al. SPECIAL TOPICS AND NEW DIRECTIONS, Gendt G, Dick G, eds. Germany: GFZ, 1995: 205

- [6] Rothacher M. GPS Solutions, 2001, 4(4): 55
- [7] Rothacher M, Mader G. Estimation and validation of IGS absolute antenna phase center variations, http://www.aiub.unibe.ch/download/igs_01.txt, 1996
- [8] Daniel N A, Andrew R, Barbara A O, et al. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, 2005, 54(5): 1820
- [9] Schmitz M, Wubben G, Boettcher G, et al. GPS Solutions, 2002, 6: 18
- [10] 张成军. 国防预研项目, 2010, (3): 7
- [11] Dach R, Schmid R, Schmitz M, et al. GPS Solutions, 2011, 15: 49
- [12] Akrou B, Santerre R, Geiger A. GPS world, 2005, 16(2): 49
- [13] Wubben G, Menge F, Schmitz M, et al. Proc Int Tech Meet ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1996: 1205
- [14] Zhu Y, Massmann H, Yu Y, et al. J Geod, 2003, 76(11): 668
- [15] Mader G L, Czopek F M. GPS World, 2002, 13(5): 40
- [16] Schmid R, Rothacher M. Journal of Geodesy, 2003, 77(7): 440
- [17] Rothacher M, Schaer S, Mervart L, et al. IGS Workshop, Germany: GFZ Potsdam, 1995: 205
- [18] Ge M, Gendt G, Meindl M. eds. Bern: Proceedings of the IGS Workshop and Symposium 2004, 2005
- [19] Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, et al. J Geod, 2007, 81: 781
- [20] Dilssner F, Springer T, Flohrer C, et al. Journal of Geodesy, 2010, 84(8): 467
- [21] Dach R, Hugentobler U, Fridez P, et al. Bernese GPS Software, version 5.0, University of Berne: Astronomical Institute, 2007: 355
- [22] <ftp://garner.ucsd.edu/pub/gamit/tables/igs08.atx>, 2012
- [23] Jaggi A, Dach R, Bock H, et al. Combining terrestrial and LEO data to extend the GPS satellite antenna patterns to nadir angles beyond 14° , <http://www.iapg.bv.tum.de/Mitarbeiter/>, 2011
- [24] Montenbruck O, Garcia-Fernandez M, Yoon Y, et al. GPS Solutions, 2009, 13(1): 23
- [25] <ftp://garner.ucsd.edu/pub/gamit/tables/antmod.dat>, 2012
- [26] Schmitz M, Wubben G, Boettcher G. GPS Solutions, 2002, 6: 18

Research on Calibration Methods of GNSS Antenna Phase Center Offsets and Variations

LI Xiao-bo^{1,2}, WANG Xiao-ya², REN Jin-wei¹

(1. Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration, Beijing 100036, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: GNSS measurement, including pseudo-range and carrier phase observation, is the distance between phase center of satellite antenna and phase center of receiver antenna. Satellite mass center and receiver antenna reference point (ARP) are used as reference in GNSS data processing. Consequently, the antenna phase center correction should be considered in GNSS data processing.

GNSS antenna phase center correction including mean phase center offset with respect to the ARP or the mass of satellite, i.e. PCO, and the variation to the mean phase center with respect to the satellite elevation and azimuth angle, i.e. PCV. In general, the same type

of antennas have similar PCO and PCV. This paper summarizes the methods of calibrating GNSS antenna phase center offsets and variations. In addition, the calibration of on-orbit GNSS satellite antenna phase center variation is described. PCVs are highly correlated with PCOs, the so-called daily “raw PCVs” are normally estimated together with other parameters including site coordinates, site-specific troposphere parameters, orbit parameters and Earth rotation parameters etc. Afterwards, the raw PCV estimates are separated into PCOs and PCVs under the assumption that PCV is the flattest by the least-square fit. The calibration of the on-orbit GPS satellite antenna PCV by LEO observations is described as well. It extends the maximum nadir angle up to 17° by establishing the un-differential carrier phase residuals.

Key words: GNSS; calibration; antenna phase center offset; antenna phase center variation; LEO

.....

《天文学进展》2013 年征订启事

《天文学进展》是天文学类中文核心期刊。刊物为季刊, 2013 年本刊于 2、5、8、11 月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年 160 元 (含邮寄费和包装费)。凡需订阅 2013 年《天文学进展》, 请到所在地邮局进行订购。

统一刊号: CN 31-1340/P

邮发代号: 4-819

欢迎订阅! 谢谢支持!

《天文学进展》编辑部