

GPS天线相位中心稳定性的检定

靳连武

总参第一测绘大队,天津市河北区中山路129号增1号,300140

摘要 从 GPS 接收机天线相位中心偏差矢量存在的物理成因出发,对其在计量检定和测量应用中的性质给出分析。针对 CH8016—95 所提供的相对定位测定方法,求出该矢量在检定结果中的量级关系,通过实际检定成果作出初步的验证。

关键词 天线相位中心偏差(APCO) 极距 等概率分布 误差性质

GPS 导航定位技术在测量领域的广泛应用,使得 GPS 接收机的作业检验和技术指标的计量检定已经成为了基本的应用研究课题。本文根据多年的检定实践,针对 GPS 接收机检定项目中“天线相位中心稳定性”几个相关问题,予以分析讨论。

1 APCO 的定义

天线相位中心偏差(Antenna Phase Center Offset)是指 GPS 天线接收卫星信号的电气中心与其机械几何中心之差。对于任何特定天线的 APCO 具有一定的稳定性,即呈现系统误差的性质。通常 GPS 测量需要多台接收机联合同步观测,而 APCO 对测量成果的影响,由于其矢量的方向具有等概率分布的特点,故可以按照偶然误差处理。这也是国家行业标准 CH8016—95 对此项目采用限差检定方法的原因。

需要注意 APCO 是一个三维矢量,不仅具有平面坐标分量,高程方向同样存在分量,如图 1 所示。其中 x、y、z 分别为地平直角坐标系下的东、北、高坐标。



图 1 APCO 矢量及其分量

APCO 矢量在 WGS84 坐标系统中,采用以参考天线为中心的地平直角坐标系表示为:

$$A = A_E x + A_N y + A_H z \quad (1)$$

式中:
 A_E —APCO 矢量的东向分量

A_N —APCO 矢量的北向分量

A_H —APCO 矢量的高程分量

另外, GPS 在工程测量中,对于不能直接安置天线的点位(墙角和设备点)可能采用偏心测量,许多后处理软件以“天线相位中心偏心差(Eccentricity)”表示,虽然对坐标成果的影响与 APCO 相同,但其是由测量方法决定的偏差矢量,一般数值较大,可达 10~100mm,而 APCO 是

天线自身的特性参数,数值仅为1~10mm左右。

2 检定方法介绍

APCO的检定方法在目前有实验室条件下的天线指标独立测定和基线测量相对测定两种方法。前者采用微波暗室的环境条件,通过精密可控微波信号源测量天线接收信号的强度分布来确定天线电气中心,计算出APCO数值。此方法需要的测定条件成本很高,一般仅国家实验室和天线制造厂家才具备。检定规程CH8016—95提供了接收机用户可以随时检验的相对定位测定方法,大多数情况采用此方法检定,比如中国地壳运动观测网络工程。

相对定位法检验“天线相位中心稳定性”步骤与限差:

- 将GPS接收机天线分别安置在5~10m的超短基线上,精确对中、整平,天线定向标志指北(初始位置);
- 观测一个时段。时段长度通常为45~90分钟,采样率为10~30s;
- 选择其中一个天线作为参考天线固定不动,其它依次旋转90°、180°、270°分别测量三个时段;
- 将参考天线相对任选一个天线依次按90°间隔旋转,再测三个方向的对应时段;
- 分别解算四个时段基线值,其最大互差不能超过二倍固定误差(仪器标称精度中的固定误差部分)。

这里需要注意基线值所指是基线的斜距长度值还是基线矢量三维分量的数值。在网络工程的技术规程中规定为“天线在不同方向下测定的基线分量和长度的变化应小于…”,显然该规程同时对两种不同的描述均给出了检验限差要求。

3 相对定位法的数学分析

相对定位法采用旋转被测天线方式测量,因此可以不失一般性地定义,n(≥ 2)等分圆周的APCO矢量描述为:

$$A^i = A_E^i x + A_N^i y + A_H^i z \quad (2)$$

式中:i—被测天线的旋转位置数

基线测量中无APCO影响的基线(Baseline)矢量和有影响的矢量可以分别表示如下:

$$B = B_E x + B_N y + B_H z \quad (3)$$

$$B^i = (B_E + A_E^i)x + (B_N + A_N^i)y + (B_H + A_H^i)z \quad (4)$$

考虑到被测天线的旋转,东、北两个平面方向分量是原APCO矢量的旋转变换后结果,而高程分量不变。使用公式(1)、(2)计算如下:

$$A'_E = A_E \cos \varphi + A_N \sin \varphi$$

$$A'_N = A_N \cos \varphi - A_E \sin \varphi \quad (5)$$

$$A'_H = A_H$$

式中: φ —平面旋转的方位角

显然,对于等分圆周 $\varphi = 2\pi i/n$,对应分量的求和则有:

$$\sum_{i=0}^{n-1} A_E^i = 0, \sum_{i=0}^{n-1} A_N^i = 0, \sum_{i=0}^{n-1} A_H^i = 0 \quad (6)$$

由此可以根据公式(4)计算基线观测量的均值,以确定不包含 APCO 平面分量的基线结果,其中仅残留了高程分量的影响,如下式:

$$\bar{B} = B_E x + B_N y + (B_H + \bar{A}_H) z \quad (7)$$

各个旋转位置基线矢量与均值矢量之差为:

$$\Delta B_i = B_i - \bar{B} = A_E^i x + A_N^i y + \epsilon_i z \quad (8)$$

式中: ϵ_i —高程分量的离散差,其数学期望为 0,故属于极小量。

由此可知,依据 CH8016-95 规程提供的相对定位法,仅能得到 APCO 矢量在平面的投影,并不能确定其高程分量。相应采用 A_E^i 和 A_N^i 数值计算出此投影矢量的极距 ρ 和方位角 θ ,来描述在各个旋转方向位置的 APCO 矢量,则有:

$$\rho_i = \sqrt{(A_E^i)^2 + (A_N^i)^2} \quad (9)$$

$$\theta_i = \arctg(A_E^i / A_N^i)$$

如果以极距 ρ 偏差方和最小原则确定极距 ρ 的估值,则可以使用简单的算术平均值表达,相应的方位角 θ 的估值同样处理。需要注意此估值是无偏的。计算公式如下:

$$\rho_0 = (\sum_{i=0}^{n-1} \rho_i) / n \quad (10)$$

$$\theta_0 = [\sum_{i=0}^{n-1} (\theta_i - 2\pi i / n)] / n$$

极距求定误差为:

$$\sigma_\rho = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (\rho_i - \rho_0)^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

使用 T 检验(Tau test)条件 $T_\rho = \rho_0 / \sigma_\rho > T_{\alpha/2}(n-1)$ 判别极距求定的置信度。

另外,考虑到公式(8)之中的差值矢量是天线旋转后的 APCO 矢量,为求定 APCO 矢量的实际值,采用平面旋转变换使之转换为“初始状态”(天线正常指北位置)的矢量,即 $(A_E^i, A_N^i) \rightarrow (A_E^1, A_N^1)$ 。这样就可以 n 个独立的观测量求定 APCO 矢量。

$$\begin{aligned} A_E &= (\sum_{i=0}^{n-1} A_E^i) / n \\ A_N &= (\sum_{i=0}^{n-1} A_N^i) / n \\ \rho_1 &= \sqrt{A_E^2 + A_N^2} \\ \theta_1 &= \arctg(A_E / A_N) \end{aligned} \quad (12)$$

4 平面投影分布以及限差与极距的关系

前述计算公式与结论都是基于相对定位法的分析结果,即平面投影矢量,而实际 APCO 是具有高程分量的三维矢量,那么平面投影相对三维矢量的分布关系如何?另外,仅取 4 个平面旋转方向是否存在采样密度不足的问题?

如图 2 所示: x 、 y 、 z 分别代表东、北、高三个方向,APCO 三维矢量的极距为 R 、与平面夹角为 β 、平面投影极距为 ρ 。以大量统计样本为基础,则计算如下:

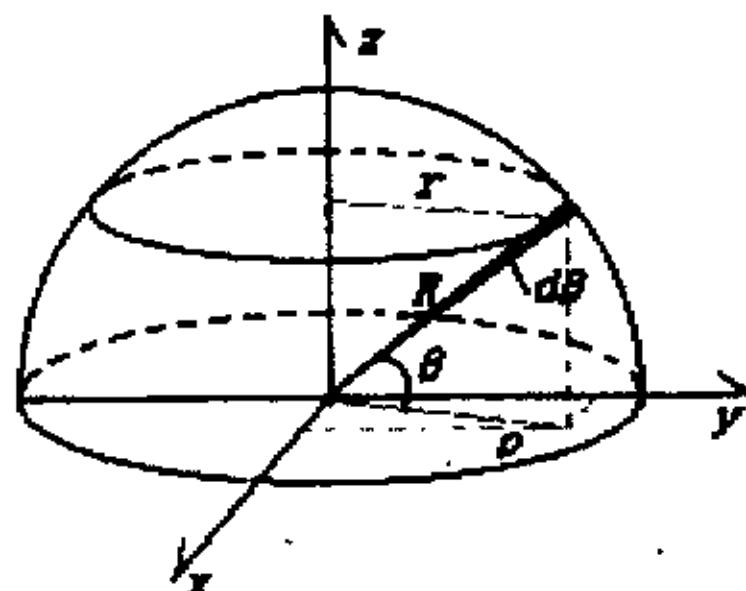


图 2 APCO 的平面投影

$$r = R \cos \beta$$

$$dS = 2\pi r \times R d\beta = 2\pi R^2 \cos \beta d\beta \quad (13)$$

$$\rho = r = R \cos \beta$$

那么,平面分量极距表现为 ρ 的矢量,其相对全部矢量的分布密度为 dS/S ,其中 S 是全方向角的“球面”面积,考虑到对称性,则 $dS/S = \cos \beta d\beta$ 。因此,平面投影分量极距与三维矢量极距的关系为:

$$\rho_{\text{mean}} = \int_0^{\pi/2} R \cos^2 \beta d\beta = \frac{\pi}{4} R \quad (14)$$

CH8016-95 检定规程及网络工程技术规程中均使用斜距和分量的最大互差作为天线 APCO 指标的限差检验依据,这里给出该限差与极距的关系系数。一般性地假定无 APCO 影响的斜距为 D ,实测斜距为 S ,被测天线 APCO 的极距为 ρ ,矢量方向与基线测向的夹角为 δ ,如图 3 所示:

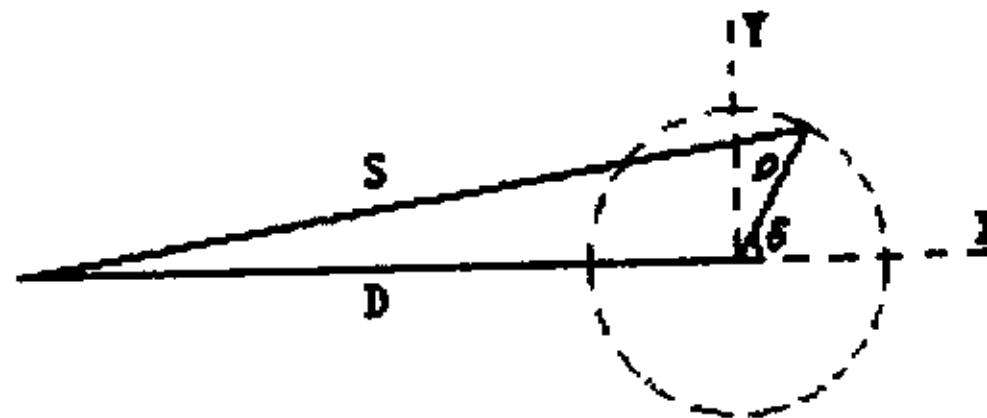


图 3 斜距限差法示意

可以得到计算公式:

$$S_x = D + \rho \cos \delta$$

$$S_y = \rho \sin \delta \quad (15)$$

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} = S_x + \Delta S$$

取一阶近似 $\Delta S = S_y^2 / 2S_x$,按照检定规程要求的检定距离和实际天线精度以极端情况取 $D = 5m$, $\rho = 10\mu m$,则 $\Delta S = 10\mu m$,对于测量来说可以忽略不计。据此,由四个方向等分圆测定,其斜距最大互差为 $S_{\max} = 2\rho \cos \delta$ 。如果从大量天线样本角度考虑,APCO 在方向上的分布应是均匀的,因此, S_{\max} 的最或然值与 2ρ 之间具有一个系数 $K = (\int_0^{\pi/4} \cos \delta d\delta) / (\int_0^{\pi/4} d\delta) = 2\sqrt{2}/\pi$ 的关系,说明使用此方法规定的 APCO(极距)允许值条件偏宽(约 10%)。采用分量限差表示与此

相同,仅仅是由北方向代替了斜距法的测线方向。因此,采用四方向相对定位法测定天线相位中心稳定性时,斜距平面分量的最大互差超过 2ρ 的天线有可能通过检验。

造成此问题的原因是等分圆的方向数 $n = 4$ 太小,掩盖了极距的表现。对于符合 $n \geq 2$ 条件的等分圆数值,可以获得具有一般性意义的表达式 $K_n = [n \sin(\pi/n)]/\pi$ 。显然, K 值将随着 n 适当增大而显著趋近于 1,参看表 1 数据。

表 1: K 值随等分圆方向数 n 变化

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_n	0.637	0.827	0.900	0.935	0.955	0.967	0.974	0.980	0.984

5 检定实测数据统计分析

表 2 是同型号 8 个天线采用不同方式描述的比较结果。其中最后一行的“归一值”为互差结果均值乘以系数 $\pi/(2\sqrt{2})$,而极距均值乘以系数 2,以检查 K_4 的数值。

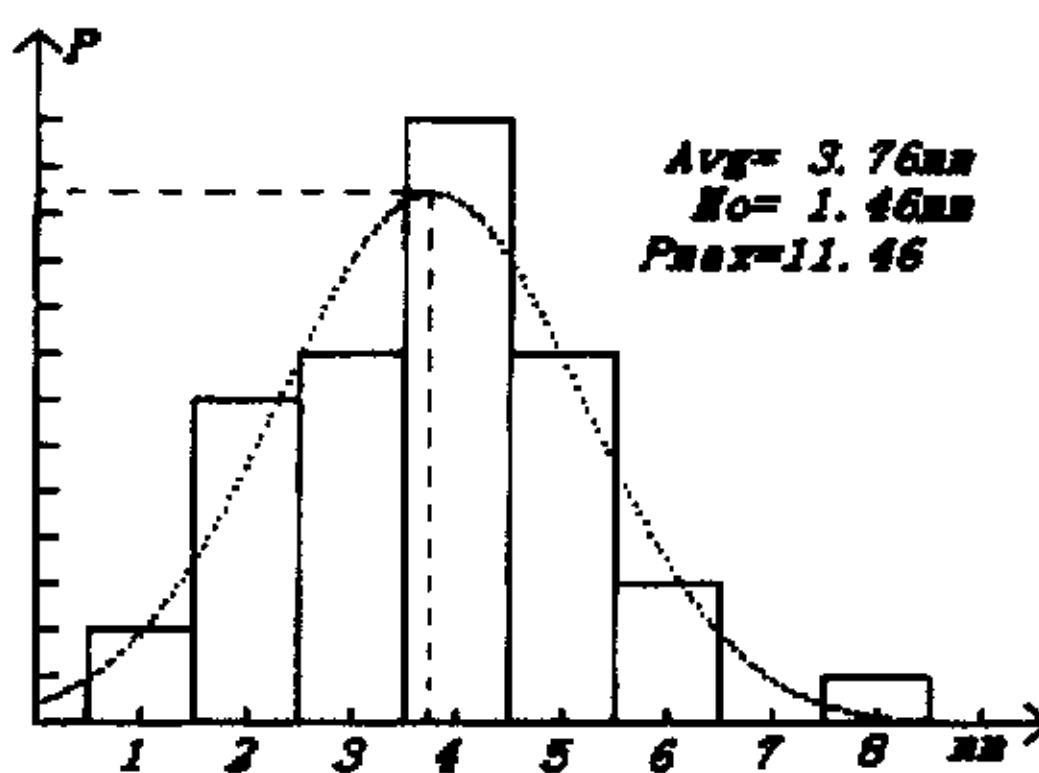
表 2: 两种描述结果比较表(单位: mm)

序号	斜距和分量描述结果				极距法描述结果		
	S_{max}	E_{max}	N_{max}	H_{max}	ρ_0	ρ_1	σ_ρ
1	4	3	4	2	1.932	1.803	0.468
2	1	2	1	3	0.809	0.500	0.252
3	10	4	8	5	4.818	0.559	2.508
4	5	4	5	4	2.562	0.000	1.514
5	8	7	7	2	3.940	0.250	2.143
6	5	5	4	5	2.430	0.354	1.260
7	6	6	4	4	2.869	0.559	1.359
8	11	9	10	4	5.400	0.559	2.797
平均值	5.56	4.44	4.78	3.22	2.751	0.509	
归一值	6.18	4.93	5.31		5.502	1.018	

从此表数据可以看出:①斜距互差与平面分量互差的统计均值相当,高程分量较小;②斜距和分量描述的均值与极距的比例系数在 $0.90 \sim 1.12$ 之间,符合 $K_4 = 0.9$;③ ρ_1 与 ρ_0 相比较小得多,表明矢量旋转后的方向分布不均匀,间接说明求定置信度较低。

对于某个型号天线 APCO 指标的一致性,可以通过批量检验采用统计方法确定,这里根据一组实际检定数据作为分析样例。

图 4 是 42 个天线检定结果的分布直方图。其中 APCO 采用斜距最大互差 S_{max} 描述。最大为 8mm,最小为 1mm,平均值为 3.76mm。如果考虑到 $K_4 = 2\sqrt{2}/\pi$,其最大者对应 2ρ 的统计意义的最或然值为 8.89mm,没有超过二倍固定误差(10mm),说明此组天线的指标全部符合检定限差要求。另外,基于此采样数的统计,可以认为该型号天线的 APCO 指标具有一定的一致性。

图4 斜距最大互差 S_{\max} 分布直方图

6 结束语

- 1、APCO 的性质从其定义(形成原因)来看属于系统误差,但需要通过相当数量的检定实验才可能确定其是否具有重复性和稳定性;
- 2、采用四方向相对定位法测定天线相位中心稳定性具有一定的风险,可以考虑在适当增加方向数 n 的前提下采用极距法描述;
- 3、影响 APCO 矢量测定的主要误差因素包括测量环境、卫星组群与分布、测定地点的地理纬度等;
- 4、天线相位中心稳定性检定期问,必须保证天线水平安装稳定,均处于 1.5m 高度左右,周围 3cm 之内没有影响信号接收的活动物。

参考文献

1. 许其凤 《GPS 卫星导航与精密定位》 解放军出版社 1994.12
2. CJB016—96 《全球定位系统(GPS)测量型接收机检定规程》 1995.1
3. 《中国地壳运动观测网络技术规程》 1998.4

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>