

GPS 天线相位中心偏差对 GPS 高程的影响及改正研究*

高 伟^{1,2}, 晏 磊¹, 徐绍铨³, 姜玉祥⁴

(1 北京大学遥感与地理信息系统研究所空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室 北京 100871;

2 山东农业大学信息科学与工程学院 泰安 271018;

3 武汉大学测绘学院 武汉 430079;

4 北京大学科技开发与产业管理办公室 北京 100871)

摘要: 本文采用室外测定 GPS 天线相位中心垂直分量偏差的差值实验, 对同种类型同种型号、同种类型不同型号以及不同类型的天线组合, 进行实际测定, 并对观测数据进行了详尽的处理和数值分析。研究了天线相位中心垂直分量偏差影响 GPS 高程精度的规律, 提出并讨论了减弱或消除 GPS 天线相位中心垂直分量偏差影响的方法。实际算例表明, 采用相位中心变化的模型函数改正 GPS 天线相位中心的偏差值, 虽然在水平方向效果不明显, 但有助于垂直方向偏差分量的改善。

关键词: GPS 天线; 相位中心; 偏差; GPS 高程

中图分类号: 228.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.1010

Research of influence and correction of GPS antenna phase center deviation on GPS height

Gao Wei^{1,2}, Yan Lei¹, Xu Shaoquan³, Jiang Yuxiang⁴

(1 Institute of RS and GIS, Beijing Key Lab of Spatial Information Integration and Its Applications,
Peking University, Beijing 100871, China;

2 School of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

4 Science and Technology Development and Industrial Management Office, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The differences of GPS antenna phase center vertical component deviations for the same model of same type of GPS receiver antenna combinations and the different model of same type or different type of GPS receiver antenna combinations were tested and practically determined using the outdoor antenna determining method. The observed data were processed and numerically analyzed in detail. The influencing regularities of the vertical component deviation of GPS receiver antenna phase center on GPS height precision were studied. The methods of weakening or eliminating the influence of the vertical component deviation of GPS receiver antenna phase center were brought forward and discussed. Practical examples indicate that using the model function of phase center change has no obvious correction effect in horizontal component direction of the phase center, but it can help improve vertical component precision.

Key words: GPS antenna; phase center; deviation; GPS height

收稿日期:2006-10 Received Date:2006-10

* 基金项目:中国博士后科学基金(20060400346)、国土资源部科技基金(国地防灾[2003]031709)、山东农业大学青年科技创新基金资助项目

1 引言

在 GPS 测量中,观测值都是以接收机天线的相位中心位置为准的,而天线的相位中心与其几何中心,在理论上应保持一致。可是实际上天线的相位中心随着信号输入的强度和方向不同而有所变化,即观测时相位中心的瞬时位置(一般称相位中心)与理论上的相位中心将有所不同,这种差别叫天线相位中心的位置偏差。这种偏差的影响,可达数毫米至数厘米,这将对高精度的 GPS 测量产生很大影响,因此如何减少相位中心的偏移是天线设计中的一个重要问题^[1,2]。

GPS 接收机天线相位中心与其几何中心不重合性构成了 GPS 接收机天线相位中心误差,包括水平偏差分量和垂直偏差分量。对于一般天线而言,其相位中心在垂直方向上的偏差远大于在水平方向上的偏差,水平偏差仅几个毫米,垂直偏差可达 160 mm 左右^[3,4]。GPS 定位所测量的点位是对应于 GPS 接收机天线相位中心位置的,为了求得观测站标石中心的位置,还必须根据 GPS 接收机厂家所提供的天线相位中心位置(通常被认为是天线几何对称轴上的某点)和实测的天线相位中心定义点到标石中心的垂直高度(天线高),将定位结果归算到标石中心。表 1 是部分 GPS 接收机天线相位中心偏差分量的标称改正值(从 ICS 下载的 PHAS_IGS 文件),也就是接收机厂家提供的改正值。基线解算时,要将这些数据提供给基线解算软件(如 GAMIT、Bernese 等),才能获可靠的结果。

表 1 天线相位中心偏差分量的标称改正值

Table 1 Nominal correction of antenna phase center deviation components

天线类型		南北方向/m	东西方向/m	垂直方向/m
JPS LEGACY	L1	0.0011	0.0002	0.1131
JPSREGANT_DD_E	L2	0.001	0.0013	0.1186
JPS LEGACY	L1	0.001	-0.0011	0.106
JPSRECANT_SD_E	L2	0.0014	0.0005	0.1196
TRIMBLE 4000SSE	L1	0.0015	-0.0012	0.0751
TR GEOD L1/L2 GP	L2	-0.0011	0.0017	0.0692
TRIMBLE 4000SSI	L1	0.0015	-0.0012	0.0751
TR GEOD L1/L2 GP	L2	-0.0011	0.0017	0.0692
TRIMBLE 4700	L1	-0.0002	0.0012	0.074
TRM33429.20 + GP	L2	0.0006	0.0009	0.0703
TRIMBLE 5700	L1	0.0003	0.0005	0.0714
TRM41249.00	L2	-0.0004	0.0001	0.0682
LEICA SR9500	L1	-0.0016	0.0014	0.084
LEIAT303	L2	0.0009	0.0008	0.1008

虽然在解算时加入了天线相位中心的偏差改正,但由于种种原因,观测时天线相位中心的真正位置与厂家所提供的几何中心不一样,即观测时天线的相位中心的瞬时位置与理论的相位中心有所不同,而且还随着时间及入射信号的强度和方向不同而变化,这就使定位结果存在着天线相位中心位置不准确的误差。GPS 接收机天线相位中心偏差及其稳定性,是影响高精度 GPS 测量的一个重要因素。对于高精度的 GPS 测量,无论是水平或者垂直偏差,这么大的偏差都是不可忽视的。其中 GPS 接收机天线相位中心垂直分量偏差,对 GPS 高程测量精度的影响是非常明显的,也是在 GPS 高程分量变形监测中很容易被忽视的重要因素,必须采取一定措施予以削弱,以保证获得可靠的变形值。

2 GPS 天线相位中心垂直分量偏差的检测原理

目前,用于 GPS 接收机天线相位中心垂直分量偏差的测定方法有 2 种^[4,5]:一是用室内微波天线测量设备测定,二是在室外测定 GPS 接收机天线相位中心偏差。

2.1 室内微波天线检定法

精确测定 GPS 接收机天线的相位中心是通过室内微波测量设备测定的。微波测量设备包括 1780 系列可编程微波接收机、1581 型方向图绘图仪、微波发射天线和微波暗室等 4 部分。室内微波天线检定法测定 GPS 接收机天线相位中心偏差分量的测量精度,可以达到 1~2 mm。但必须有微波暗室,且设备复杂、昂贵,测定费用高,而一般部门无此设备,不适于实际测量工作和应用。

2.2 室外测定 GPS 天线相位中心垂直分量偏差的原理

在实际测量工作中,主要采用在室外检测 GPS 天线相位中心垂直分量相对偏差值,来消除天线相位中心偏差对高程的影响。

在天空视野开阔、无强电磁干扰的野外,相距几米左右距离的 A、B 两点上,如图 1 所示,安置 2 台 GPS 接收机(注意天线严格置平),进行相对定位观测。由于 A、B 两点相距很近,卫星至两观测站电磁波传播路程上的大气状况极为相似,电离层延迟和对流层延迟所产生的误差以及其它 GPS 误差源的影响也很相近,就可以通过模型改正和差分的方法而削弱,从而近似地认为在高程方向上仅存在天线相位中心误差。设 A 点和 B 点的大地高分别为 H_a 和 H_b ,并设 U_a 和 U_b 分别为通过 GPS 卫星观测和计算求出的 A 和 B 点上的大地高值,安置在 A 点和 B 点上的 GPS 接收机天线相位中心垂直分量偏差分别设为 h_a 和 h_b (若相位中心位于天线抑径板上方取正值,否

则取负值)。则有:

$$\Delta H = H_b - H_a = (U_b - h_b) - (U_a - h_a) \quad (1)$$

式中: ΔH 为A、B两点的高差,可由精密水准测量测得。

由式(1)可得: $\Delta H = (U_b - U_a) - (h_b - h_a)$,令 $\Delta U = (U_b - U_a)$,可通过GPS观测和计算获得;并令 $\Delta h = h_b - h_a$,为在A和B两测站上分别安置的2台GPS接收机天线相位中心垂直分量偏差的差值。由此得:

$$\Delta h = \Delta U - \Delta H \quad (2)$$

当其中一台GPS接收机天线相位中心垂直分量偏差已知时(可由微波天线检定法测定),便可以计算出另一天线相位中心垂直分量偏差。否则,只能测定2台GPS天线相位中心垂直分量偏差的差值 Δh 。

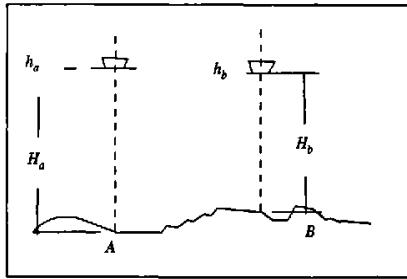


图1 天线相位中心测定示意图

Fig. 1 Sketch diagram of determination of antenna phase center

3 实验数据的采集和处理

3.1 数据采集

在武汉大学信息学部四号教学楼楼顶上,将2台GPS接收机天线分别安装在相距约7m左右的2个观测墩A点和B点上,按照图1所示,进行室外测定,观测墩A、B两点的高差 ΔH ($\Delta H = H_b - H_a$),由水准仪精确测定,其测定值 ΔH 为88.5mm,作为已知值。采用强制对中装置进行对中,基座整平后,严格量取天线高,精确到0.1mm。由于每台接收机天线的L1、L2载波的相位改正值是不同的,其改正值采用天线相位中心的标称改正值。接收机的卫星截止高度角设置为15°,数据采样间隔为15s。实验时,对Topcon、Trimble、Leica三种类型、五种型号的GPS接收机天线,进行组合观测,观测时段及天线组合见表2。

3.2 数据处理

采用GPS精密解算软件Bernese4.0版本和IGS精密星历,解算基线向量。对观测数据分别进行了分时段和整时段的解算,同时分别选择L1波段和L1+L2组合进行处理,以便于结果的比较和分析。考虑到A和B点相距仅有7m左右,观测环境和条件相同,影响GPS观测的各种误差因素,对观测值的影响非常相似,特别是对流层

表2 观测时段及天线组合统计

Table 2 Statistics of observation durations and antenna combinations

A点	B点	时段长度/h
Topcon-Legant	Topcon-Legant	24
Trimble-Zephyr	Trimble-Zephyr	24
Topcon-Legant	Topcon-Regant-RA	16
Topcon-Regant-RRA	Topcon-Legant	4
Topcon-Legant	Trimble-Zephyr	20
Leica-AT502	Topcon-Legant	5
Trimble-Zephyr	Leica-AT502	5

延迟和电离层延迟等影响因素,通过模型改正和差分的方法,在基线解算中基本可以消除,近似地认为结果中出现的误差值,主要是由GPS天线相位中心偏差引起的。

4 相位中心偏差对高程精度的影响

实验数据处理表明^[7],GPS天线相位中心偏差的存在,对GPS测量的平面位置和高程位置精度都会产生影响。而GPS天线相位中心垂直分量偏差的差值 Δh ,主要影响到高程分量的精度和最终的大地高值,是高精度GPS高程测量不能忽视的因素。观测时天线相位中心的实际位置与天线的标称位置并不完全一致,并随着时间信号入射角度的变化而变化,在数据处理时,虽然已经按照天线相位中心的标称值,进行了改正,但实验数据处理和结果分析表明,无论采用L1载波还是L1+L2组合处理,仍有差值存在,大小从几毫米到几厘米不等,对GPS高程方向的精度和准确性将产生直接影响。

对于同种类型同种型号的GPS接收机天线组合,由于按照相同的设计制作,并且有相同的制作工艺和材料,其相位中心垂直分量偏差的差值 Δh 很小,都在1mm左右,甚至小于1mm,可以认为是由于测量的残余误差、模型改正不完善以及计算误差等引起的,在数据处理时可作为偶然误差,认为两台接收机天线的相位中心垂直分量偏差相近,对毫米级的GPS高程测量的精度影响不大。

对于同种类型不同型号或者不同类型的GPS接收机天线组合,由于天线的设计、构造、制造工艺等不同,相位中心的位置偏差很大,大小从几毫米到几厘米不等,必须减弱或消除其影响,以提高GPS高程测量的精度。由于在地面沉降监测、陆海垂直运动、构造沉降等研究中,每年或者每期的高程形变量都很小,一般在几个毫米到十几个毫米之间,如果忽略了GPS天线相位中心垂直分量偏差的差值 Δh 的影响,就很难得到准确的变形量,甚

至会得出相反的变形趋势,给国民经济建设和灾害监测预测以及重大决策,带来不利的影响,甚至是灾难性的。

5 GPS天线相位中心垂直分量偏差的改正

对于同种类型不同型号或者不同类型的GPS接收机天线,在高精度GPS高程测量中,应该测前或者测后,精确地测定其相位中心垂直分量偏差的差值 Δh 。在采集数据时,尽量使每个测站上使用同种类型同种型号的接收机天线,并且在每期的观测中,做到每个测站上始终使用同一台GPS接收机天线;同时在数据处理时,也要加以系统改正,以获得准确可靠的高程分量变形值。

因此,对于同种类型同种型号的GPS接收机天线组合,其相位中心垂直分量偏差的差值 Δh 很小,对于GPS高程测量的精度影响不大。而对于同种类型不同型号或者不同类型的GPS接收机天线组合,其相位中心垂直分量偏差的差值 Δh 一般很大,严重影响GPS高程分量的精度,也很难获得准确的垂直沉降变形信息,应该在实践中予以改正。改正的方法如下^[7]:

5.1 室内微波天线检定法

采用室内微波天线检定法,在室内精确测定每台GPS接收机天线相位中心的各个偏差分量,特别要测定垂直分量偏差的值,可以在GPS地面沉降监测高程结果中,直接改正;也可以在基线解算前,加到相位中心文件中去,通过对观测数据的处理进行改正。

5.2 室外测定GPS接收机天线相位中心垂直分量偏差

这种方法前面已经详细介绍,除了进行GPS测量,还需要利用水准仪测定两点的高差,最后得到的是GPS接收机天线相位中心垂直分量偏差的差值,是一个相对值,观测和计算改正时,要都始终以其中一台天线为参考天线,所有的观测和计算中相位中心偏差改正都是相对于参考天线而言的。

5.3 交换天线法

采用交换天线法,也可以消除相位中心相对垂直偏差分量的影响。这种方法只需将GPS接收机置于天空视野开阔的地方,随时都可测定,只要观测方法得当也可以达到很高精度。

5.4 相位中心变化改正模型

上述几种改正方法是在室内或者距离很近的测站间(大约几米)上进行的,而由于GPS信号来自不同方向的卫星,天线相位中心的位置依赖于信号的方向,使得GPS接收机相位中心的变化更复杂。对于L1和L2载波来说,天线相位中心的位置与相位中心的偏差值也不相同。

如果同时使用不同类型的天线组合进行GPS测量,必须顾及天线相位中心随信号入射方向变化的影响,可考虑相位中心变化的模型化改正。国内外的研究也表明,对于100 km范围内的GPS基线,不论基线长度如何,使用不同类型天线,在两个端点的GPS站的垂直分量的相对误差最大可能达到 ± 10 cm,甚至同一类型的GPS接收机天线也可能有如此结果,而这导致基线的尺度误差最大可能达 $0.015 \times 10^{-6} D$ ^[7-10],如果基线长度为100 km,即使使用同种类型同种型号的接收机天线,其相位中心垂直分量偏差的差值最大可以达到1.5 mm左右,对需要获得精度很高的高程分量变形信息的地面沉降监测,也是不能忽视的。随着基线长度的增加,测站间的气象状况、环境条件、卫星信号的入射角度等,都有很大的差异,采用室内或者近距离的室外测定的垂直分量偏差值也会发生很大变化,仅仅靠改正掉这些测定值,是不能真实反映GPS高程分量的精度的,因此天线相位中心变化的模型化是必要的。

可采用如下的天线相位中心变化改正模型^[11-12]:

$$\Delta\phi(\alpha, z) = \Delta\phi'(\alpha, z) - \Delta\phi_0 + \Delta r \cdot e \quad (3)$$

式中: α 和 z 分别为卫星的方位角和天顶距; $\Delta\phi_0$ 是由 $\Delta\phi(\alpha, 0) = 0$ 定义的一个固定的相位偏移量; Δr 是相对于天线参考点而言的平均天线相位中心偏移值,它唯一地由:

$$\int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{\pi} \Delta\phi(\alpha, z) \sin z dz d\alpha = \min \quad (4)$$

确定,例如,可以取 $z_{\max} = 75^\circ$,对于不同的天线,其参考点的位置是不同的,一般IGS都会在相应的天线文件(RJNEX格式或者IGS标准)里发布; e 为天线到卫星方向的单位向量; $\Delta\phi'(\alpha, z)$ 是相位中心变化的函数模型; $\Delta\phi(\alpha, z)$ 为相位中心偏差改正值,可以加到载波相位的观测方程中。

使用式(3)计算天线相位中心的关键,是模型函数 $\Delta\phi'(\alpha, z)$ 的确定,用来描述天线相位中心相对于平均相位中心的变化情况,可采用下面两种函数中的一个来计算^[12-13]:

(1)随高度角(或天顶距)变化的分段线性函数,即多边形趋近。

(2) n 次 m 阶的球谐函数($m_{\max} \leq n_{\max}$):

$$\Delta\phi'(\alpha, z) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\cos 2z) (a_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha) \quad (5)$$

式中: $\bar{P}_{nm}(\cos 2z)$ 为 n 次 m 阶勒让德(Legendre)函数; a_{nm} 、 b_{nm} 为球谐系数。

表 3 组合天线相位改正误差统计(3 组天线)

Table 3 Error statistics of phase correction of antenna combinations (3 groups of antennas)

相位改正	无相位改正				分段线性函数				球谐函数			
	频率		L1	L2	L1		L2	L1		L2	L1	
中误差/mm	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
Top-Leg	0	0	1.9	0	0	1.9	0	0	1.9	0	0	1.9
Trim-Zep	4.3	3.9	8.6	4.2	4.5	12.2	2.1	2.2	3.6	2.4	2.3	3.2
Top-Leg	0	0	1.9	0	0	1.9	0	0	1.9	0	0	1.9
Lei-AT502	3.4	3.2	17.6	3.3	4.1	22.3	2.1	3.7	4.3	2.2	3.5	4.6
Trim-Zep	0	0	1.7	0	0	1.7	0	0	1.7	0	0	1.7
Lei502	1.4	2.3	28	1.1	2.1	43	0.9	0.7	2.5	0.8	0.7	2.1

表 4 组合天线相位改正误差统计(Trimble-Ashtech)

Table 4 Error statistics of phase correction of antenna combinations (Trimble-Ashtech)

相位改正	无相位改正				分段线性函数				球谐函数			
	频率		L1	L2	L1		L2	L1		L2	L1	
中误差/mm	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
TRM#9315	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8	0	0	1.8
TRM#4689	0.7	0.8	1.6	0.7	0.5	1.2	2.8	2.9	1.1	2.9	3.1	1
Ash718	3.5	3.2	9.9	3.4	4.2	16.4	2.5	4.4	5.8	4	4.9	4.8
Ash845	3.3	2.6	16	3.5	4.3	9.7	2.3	4	1.8	4.6	4.8	2
Ash700	3.8	3.3	33.5	3	3.2	20.2	1.6	5.7	5.6	3.6	4.2	7.4

表 5 组合天线相位改正误差统计(Trimble-Leica)

Table 5 Error statistics of phase correction of antenna combinations (Trimble-Leica)

相位改正	无相位改正				分段线性函数				球谐函数			
	频率		L1	L2	L1		L2	L1		L2	L1	
中误差/mm	N	E	U	N	E	U	N	E	U	N	E	U
TRM#9315	0	0	2.2	0	0	2.2	0	0	2.2	0	0	2.2
TRM#4689	0.7	0.4	2.5	0.9	1.3	2.4	0.8	0.4	2.2	0.7	1	2.1
LEI#5727	1.1	2.6	52	0.6	2.1	42	0.8	0.4	2.2	0.7	0.4	1.8
LEI#4463	0.9	2.5	50	2.6	5.2	55	0.6	0.5	2.2	1	0.7	3.3

表 3、表 4 和表 5 分别为不同类型组合 GPS 天线的相位中心改正误差统计,其中表 3 是 3 组两两组合天线,分别为:Topcon-Legant 与 Trimble-Zephyr、Topcon-Legant 与 Leica-AT502、Trimble-Zephyr 与 Leica-AT502,观测数据采用 3.1 中实验测定的数据,3 组中的 Topcon-Legant、Topcon-Legant 和 Trimble-Zephyr 天线分别为各自组合中的参考天线;表 4 和表 5 中的结果,是通过一个建在台湾地球科学所楼顶上的 GPS 天线相位中心测定网的观测数据计算而来的^[7],该实验与 3.1 中的实验过程和方法一样,只是参与实验的天线更多,表 4 和表 5 中的天线是两种组合,分别为 5 台和 4 台天线,数据处理采用

Bernese 软件。

从表 3、表 4 和表 5 中可以看出,天线相位中心偏差改正,对于水平方向的影响不是很显著,但对垂直分量的精度影响很大,也是本文要关注的 GPS 高程测量的精度。如果未进行相位中心改正时,如表 3 中的 Trimble-Zephyr 与 Leica-AT502 组合的垂直方向最大中误差为 43 mm,表 4 中的 TRM9315-Ash700 的垂直方向最大中误差为 33.5 mm,表 5 中的 TRM9315-LEI4463 组合的垂直方向的最大中误差为 55 mm。采用模型函数(分段线性函数或球谐函数)对相位中心的偏差进行改正后,无论哪种组合,无论是 L1 还是 L2 波段,GPS 接收机天线相位中

心的垂直分量偏差的中误差都明显减小,即使是改正后最大的垂直分量中误差也仅为7.5 mm,与改正前的20.2 mm相比,已经有很明显的改进。因此,采用模型改正GPS天线相位中心的偏差值,虽然在水平方向效果不明显,但有利于垂直方向偏差分量的改善。

6 结 论

GPS接收机天线相位中心的垂直分量偏差对GPS高程分量精度的影响是很显著的,在实际的观测和数据处理中要注意消除或减弱。通过分析和研究天线相位中心垂直分量偏差影响GPS高程精度的规律,提出并讨论了减弱或消除GPS天线相位中心垂直分量偏差影响的方法。实际算例表明,采用相位中心变化的模型函数改正GPS天线相位中心的偏差值,虽然在水平方向效果不明显,但有助于垂直方向偏差分量的改善。上述几种改正方法,更多的是在室内或者室外的实验场地(基线长度仅为几米左右)进行的,与实际的GPS观测还是有区别的。无论长短基线网的测量,参与计算的长度都远远大于实验的长度,测区各种情况差异很大,每个测站的相关性变得很弱,实验测定的改正值并不能代表在实际的GPS测量中的垂直分量偏差值。即使采用室内微波测定法测定其绝对偏差或者在室外实测其相对偏差,或者通过计算用模型改正,都无法避免在实际测量中相位中心偏差的变化以及对高精度高程的影响,并不能保证完全改善垂直分量的精度。因此,致力于GPS天线相位中心偏差的变化规律和模型化的研究,特别是相位中心垂直分量偏差随基线长度和环境因素等变化规律的研究,是非常必要的和有意义的。最根本的是,未来应该致力于GPS接收机天线的设计和接收性能的改正上,从接收信号的硬件方面来改善各种类型GPS接收机天线相位中心变化的模式,以期获得能令人满意的GPS高程精度。

参考文献

- [1] BRUNNER F K, HARTINGER H, TROYER L. GPS signal diffraction modelling: The stochastic SIGMA-model [J]. *J. Geod.*, 1999, 73: 259-267.
- [2] HARTINGER H, BRUNNER F K. Variances of GPS phase observations: The SIGMA-model [J]. *GPS Solutions*, 1999, 2/4: 35-43.
- [3] LANGLEY R. GPS receiver system noise [J]. *GPS World*, 1997, 6: 40-45.
- [4] BRAUN J, ROCKEN G, JOHNSON J. Consistency of high precision GPS antennas [J]. *EOS Transactions*, AUG 1994 Fall Meting, 1994, 75(44): 173-182.
- [5] ROTHACHER M, SCHAER S, MERVART L, et al. Determination of antenna phase center variations using GPS data, in IGS workshop Proceedings on Special Topics and New Directions [M]. 1995.
- [6] SCHMID R, ROTHACHER M, THALLER D. Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas [J]. *GPS Solutions*, 2005, 9(4): 283-293.
- [7] 高伟. GPS高程测量的理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
- GAO W. Research on theory and methodology of GPS height measurement [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [8] 陈俊勇, 魏子卿, 胡建国, 等. 迈入新千年的大地测量学[J]. 测绘学报, 2000, 29(1): 1-11.
- CHEN J Y, WEI Z Q, HU J G, et al. Geodesy striding into the new millennium [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(1): 1-11.
- [9] ANDREAS W, FRITZ K B. An extended weight model for GPS phase observations [J]. *Earth Planets Space*, 2000, 52: 777-782.
- [10] TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Rank-defect integer estimation and phase-only modernized GPS ambiguity resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 76: 523-535.
- [11] BEUTLER G, BROCKMANN E, FANKHAUSER S, et al. The bernese GPS software version 4.0 [M]. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 1996.
- [12] GEIGER A. Modelling of phase center variation and its influence on GPS-positioning [J]. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 1988, 19: 381-392.
- [13] IMAKURE T, IIMURA Y, SAGA S H, et al. Results of phase characteristics measurements of GPS receivers antennas(2) [J]. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 1997, 43, 2: 79-90.

作者简介



高伟,男,1968年7月出生,分别于1991年和1997年在山东科技大学获得学士和硕士学位,2004年于武汉大学获得博士学位,现为山东农业大学教授,主要研究方向为GPS卫星导航与定位理论与方法的研究、GPS沉降与变形监测的研究与应用等。

E-mail:gaowei@china@yahoo.com.cn

Gao Wei (1968-), male, he received bachelor degree in 1991, master degree in 1997 both from Shandong University of Science and Technology, and received Dr. degree from Wuhan University in 2004. Now he is a professor in Shandong Agricultural University. His main research direction is theoretical and methodological research of GPS satellite navigation and positioning, research and application of GPS deformation and settlement monitoring.

E-mail:gaowei@china@yahoo.com.cn

晏磊,男,1956年10月出生,1981年于南京航空航天大学获得学士学位,1989年于海军工程大学获得硕士学位,1993年于清华大学获得博士学位,现为北京大学教授,主要研究方向为自动控制、电子精密仪器仪表、导航遥感、光电成像等。

E-mail:lyan@pku.edu.cn

Yan Lei (1956-), male, he received bachelor degree from Nanjing University of Aeronautics & Astronautics in 1981, master degree from Navy Engineering University in 1989, and Dr. degree from Tsinghua University in 1993. Now he is a professor in Peking University. His main research direction is automation, electronic precision instruments and mechanology, navigation and remote sensing, photo-electricity imaging.

E-mail:lyan@pku.edu.cn

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>