

iGPS 测量原理及其精度分析

康海东¹ 范百兴² 李宗春² 李广云²

(1. 河南省地矿建设工程(集团)有限公司 河南 郑州 450007; 2. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

iGPS Measurement Principle and Precision Analysis

KANG Haidong, FAN Baixing, LI Zongchun, LI Guangyun

摘要: iGPS 测量技术采用类似于 GPS 的空间定位原理, 通过测量两台以上发射器发射的红外激光信号, 解算得到接收传感器的空间三维坐标。在分析 iGPS 角度测量原理的基础上, 进一步分析 iGPS 的系统平差原理和在线控制程序开发技术, 最后分析 iGPS 的测量精度及其应用, 提出完全测量空间概念。

关键词: iGPS; 红外激光发射器; 光束法平差; 定位精度; 固定参考点

一、引言

20 世纪 90 年代, 美国 Arcsecond 公司开发了类似于 GPS 定位系统的 iGPS (indoor/infrared GPS) 空间定位测量系统。该系统以红外激光发射器代替 GPS 卫星, 光电接收器根据发射器投射光线的特征参数, 计算接收器相对于发射器的方位和俯仰角, 并将模拟信号转换成数字信号, 通过无线网络发送给中心控制服务器, 采用光束法平差原理实现各发射器之间的系统标定, 然后采用类似于角度空间前方交会的原理解算空间点位坐标及其他位置信息, 并供远端的多用户共享, 属于精密工业测量系统。

二、iGPS 系统组成

1. 3Di 星座群

3Di 星座群由多台红外激光发射器(也称为主机, 如图 1 所示)组成, 该部分的结构和功能类似于 GPS 系统中的卫星, 每台发射器都发射红外激光信号(激光等级为 2 级), 包括两束扇形光束和一束选通光束。两台以上的发射器构成一个星座群, 随着发射器数量的增加, 空间定位精度也可以进一步得到提高。



图 1 红外激光发射器

发射器在测量过程中, 应该稳定地固定在测量空间内。目前, 单台发射器的信号覆盖范围为 2 ~ 55 m, 随着发射器数量的增加, 测量范围可以进行现行扩展。测角精度优于 $\pm 1.0''$, 水平和垂直测量范围分别为 $\pm 180^\circ$ 和 $\pm 20^\circ$, 发射信号时的旋转速度为 40 ~ 55 Hz, 不同发射器的旋转频率之差小于 0.1 Hz, 预热时间为 15 min。

2. 接收器

接收器的作用类似于 GPS 接收机, 用来接收星座发出的红外激光信号以实现空间定位, 其数量可以根据需求配置, 该系统对接收器数量没有限制。接收器可以设计成多种样式, 包括丁字型、球形、圆柱形、手持型等, 如图 2 所示。另外, 还可以根据用户的要求而改变和订做, 目前可以加长到 3 m。



图 2 iGPS 常用接收器

以圆柱型接收器为例, 它是一种全方向的接收

收稿日期: 2011-03-01

作者简介: 康海东(1976—), 男, 河南偃师人, 工程师, 主要研究方向为精密工程测量。

器,水平方向的接收范围达 360°,垂直方向的接收范围达 ±60°。而手持式测量探头由两个接收器组合而成,提供了 5 个自由度的测量,可以测量隐藏点,其末端的硬测头可以更换。

3. 基准尺

与经纬仪系统类似,iGPS 测量系统也提供了基准尺(scale bar),该基准尺的两端各稳定地安装有一个信号接收器,测量前,两个信号接收器之间的距离采用激光干涉仪进行精密校准。基准尺的作用是为系统引入并建立长度基准,系统建标时还可作为光束法平差的定向点,并对测量系统的精度进行校准。目前,iGPS的基准尺分为 1 m 和 2 m 两种类型。

4. 坐标解算处理器

坐标解算处理器(position calculation engine,PCE)是 iGPS 测量系统的一个主要组成模块,它采用 TCP/IP 协议接收来自放大器的数字信号,并将其转变成角度数据信息,然后根据角度信息解算得到空间三维坐标值,然后将三维坐标值传输到计算机中。处理器的配置包括单头模式、双头模式和多头模式 3 种。

此外,iGPS 系统硬件还包括数字信号放大器、信号传输装置、三脚架和供电装置等附件。

5. 测量软件

定位网络软件(position network software,PNS)将处理器传送来的各种角度信息(定向点、基准尺、测量点)处理成坐标信息。PNS 与第三方软件如 SA、Metrolog II、Build IT 及 Rhino 等实现了无缝连接。通过第三方软件可对坐标信息进一步处理,得到用户所关心的形位误差等信息。

为便于用户进行二次开发,iGPS 系统提供了 PI (public interface) training kit 软件开发包,软件包中包括 Metris.Common.Communication.dll、Metris.Common.Mathematics.dll、Metris.Core.dll、Metris.Surveyor.Client.dll 和 Metris.Surveyor.Common.dll 等 5 个动态链接库,目前支持 C#、VB.NET 和 C++ 等 3 种计算机编程语言。用户在启动 Surveyor 软件后,可以通过调用动态链接库所提供的函数,接收传感器数据并对测量设备的参数进行设置。比如参考点类型的设置为 ReferencePointXml,其继承关系为 System Object→Coordinate→Metris.Surveyor.ReferencePoint,其 VC++ 的声明格式为

ReferencePoint(CString name,double x,double y,double z)

在实际应用中,用户可以通过上述途径,对 iGPS 系统进行专业开发,可以实时获取测量数据,

并进行处理计算,以满足特殊的测量需求。

三、iGPS 测量原理

iGPS 的角度测量原理其实就是利用角速度和时间求角度。红外激光发射器发出两束扇形光束,如图 3 所示,两扇形光束在水平面内成 θ 角,其名义值为 90°,分别与旋转轴成 φ 角,其名义值为 30°,当发射器旋转的时候,两扇形光束扫出如图 4 所示的测量范围。每一台发射器的转速不同,可据此识别不同的发射器。第 3 束光为选通脉冲,作为每一圈旋转(一测回)的起始标志,其实质是方位角的参考线。选通脉冲的发射/接收范围是以发射器“正面”为准,在方位面上 ±145°范围内,俯仰角的测量范围为 ±30°。扇形光束的垂直传播、选通脉冲的水平传播、扇形光束和选通脉冲的测程共同决定了发射器的测量范围。

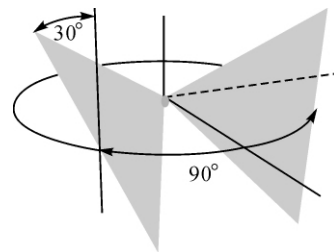


图3 发射器扇形光束

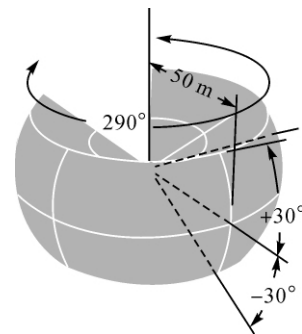


图4 发射器工作范围

测量过程中,以选通脉冲作为计时零位,发射器发出的第 1 束扇形光束到接收器的时刻记为 t₁₁,第 2 束扇形光束到接收器的时刻记为 t₁₂,设发射器的旋转角速度为 ω,则水平角 Az 和垂直角 El 分别为(推导过程略)

$$\left. \begin{aligned} Az &= \frac{(t_{11} + t_{12}) \omega - \theta}{2} \\ El &= \arctan \left(\frac{2 \sin \frac{(t_{11} + t_{12}) \omega - \theta}{4}}{\tan \varphi} \right) \end{aligned} \right\}$$

通过以上分析可知,方位角是由发射器的旋转速度、接收器接收选通脉冲和两扇形光束的时间差以及两扇形光束在方位面的投影夹角共同决定的。俯仰角是由发射器的旋转速度、接收器接收两扇形光束的时间差以及扇形光束与旋转轴夹角共同决定的。如果发射器可以整平,则方位角即为水平角,俯仰角即为垂直角。

对于单台发射器来说,如果接收器得到了其水平和垂直角度,则该发射器的功能就相当于一台电子经纬仪。可利用两台及以上的发射器组成测量系统,利用角度观测值经过系统标定后确定所有发射器之间的相对位置关系,最后利用角度前方交会的原理,即可得到空间点的三维坐标值。

四、iGPS 星座平差

虽然接收器能够测量得到各个发射器的水平和垂直角度值,但与经纬仪系统相比,iGPS星座的各台发射器之间无法互瞄,因此iGPS系统采用以下3种定向方法。

1. 光束法平差

光束法平差是在4台发射器组成的测量空间内,依次在不同的位置放置测量基准尺,基准尺两端的接收器依次接收各个发射器的信号,即相当于经纬仪依次瞄准所有定向点测量水平角和垂直角,按照光束法平差的原理即可实现系统定向,如图5所示。光束法平差定向过程比较简单快捷,并且不需要其他测量设备,但是受温度等环境因素变化的

影响较大。因此,如果进行一天的测量工作,一般需要重复观测两次。

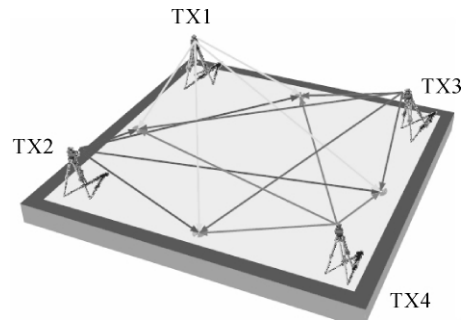


图5 iGPS系统布设规划图

2. 固定参考点平差

该方法是在测量的空间范围内布设若干个固定参考点接收器,这些固定参考点相互之间的位置关系通常采用激光雷达或激光跟踪仪等高精度测量设备获取。通常情况下,该方法受环境因素影响较小,固定参考点平差的精度要高于光束法平差。

3. 混合定向法

该方法首先采用光束法平差建立坐标系统,然后依次测量固定参考点,并将测量的坐标直接转换到固定参考点坐标系中。混合定向法综合了两种方法的优点,但整体而言,其精度稍低于固定参考点法。

系统完成定向后,即可得到各台发射器在测量坐标系中的位置和姿态,以4台发射器为例,其定向解算数据如表1所示。

表1 iGPS定向解算结果

发射器序号	X_0/mm	Y_0/mm	Z_0/mm	$R_x/(^\circ)$	$R_y/(^\circ)$	$R_z/(^\circ)$
TX1	0.000	0.000	0.000	0.000 00	0.000 00	289.994 60
TX2	5 004.411	-2.2×10^{-13}	333.347	0.090 61	0.637 76	354.864 73
TX3	7 863.074	5 639.999	331.910	0.251 71	359.995 86	54.268 63
TX4	-4 335.933	12 457.346	14.322	0.213 40	0.448 00	179.747 90

从表1中的数据可以看出:

1) iGPS测量坐标系。以第1台发射器的电子中心为测量坐标系原点,旋转轴向上为+Z轴,以垂直于Z轴并过第1台中心的平面为XOY平面,第1台到第2台发射器的中心连线在XOY平面内的投影为+X轴,按照右手系确定Y轴。

2) 发射器坐标系。与经纬仪类似,iGPS发射器的电子中心为测量坐标系原点,旋转轴向上为+Z轴,水平零方向为+X轴,按照右手系确定Y轴。

五、iGPS 点位测量精度

iGPS的空间定位采用角度前方交会的原理,点位测量的误差源主要有4方面。

1) 与发射器相关的误差。两扇形光束与旋转轴的夹角 ϕ_1 、 ϕ_2 不符合标称值而产生的误差,两扇形光束形状的圆锥误差 α_1 、 α_2 ,两扇形光束在发射器旋转头平面内的夹角 θ 不符合标称值而产生的误差,此5项误差为系统误差,可通过相关校准程序予以校正。

2) 与接收器相关的误差。以圆柱型接收器为例,其表面并不是光滑连续的,而是由多片平面型光电接收器组合而成。所以需要标定每台接收器的实际直径及平面型光电接收器偏离值,设其直径为1 cm,则该误差的标准不确定度为0.03 mm。

3) 环境误差。在室外使用时,阳光中的红外光会产生干扰,距离越长该误差越显著,所以系统一般用于室内。温度和气压会对光学系统产生影响,所以要尽量避免剧烈的温度梯度。温度和气压变化的影响可以通过四路观测减弱,并增加气象传感器以提高精度,但无法完全消除。

4) 建站误差。系统建立过程中的误差可参考经纬仪测量系统相关部分,其不确定度包括0.030 mm的固定误差和0.8"的比例误差。

通过上述误差分析可以看出,旋转误差是主要的误差源,根据平均测量的经验,如果取100次观测数据,则旋转误差提升至0.51"。目前,iGPS的标称扩展不确定度公式为

$$U_{95} = 2 \sqrt{40^2 + 14L^2}$$

式中,不确定度单位为 μm ; L 为测量距离,单位为m。设测量范围为30 m,并且考虑4台发射器建站的情况,则由固定误差及角度误差合成的标准不确定度为0.12 mm (1σ)和0.25 mm (2σ)。

除了上述几个影响测量误差的因素外,iGPS的测量精度还和下面两个因素密切相关:

1) 随着激光发射器台数的增加,交会图形条件增强,测量精度会进一步提高。试验数据表明,3台发射器相对于2台发射器其测量精度可提高50%,4台发射器相对于3台发射器其测量精度可提高30%,5台发射器相对于4台发射器其测量精度可提高10%~15%。

2) 标准基准尺的测量精度。

六、结束语

iGPS既可建立固定的测量空间,也可以作为便携式精密工业测量系统,与其他测量手段相比,iGPS在大尺寸工业测量中具有以下优势:

1) 测量精度较高。在10 m范围内,采用4台发射器,点位测量精度可以达到 ± 0.1 mm。

2) 支持多任务同时测量。和GPS相似,在测量区域内,iGPS支持多个测量传感器可以同时工作,可以同时完成多个测量任务,并且传感器的个数几乎不受限制。

3) 测量范围可以扩充。iGPS系统随着发射器台数的增加,测量范围可以呈线性增加,只要空间交会的图形条件足够强,点位测量的精度几乎不受测量范围的影响。

4) 适用于高精度动态测量。iGPS接收器的采样频率达到20~50 Hz,可以满足中低速度的动态测量要求,并且该模式下的单点测量精度没有明显降低。

正是由于上述各点,iGPS系统在航空制造与检测、汽车设计与制造、船舶设计与制造、焊接与变形检测、动态跟踪测量、逆向工程等领域都有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 李广云,李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2011.
- [2] 王晏民,洪立波,过静璐,等. 现代工程测量技术发展和应用[J]. 测绘通报,2007(4):1-5.
- [3] 黄桂平,李广云. 电子经纬仪工业测量系统定向及坐标解算算法研究[J]. 测绘学报,2003,32(3):256-260.

(上接第8页)

- [7] 李成钢,黄丁发,袁林果,等. GPS参考站网络的电离层延迟建模技术[J]. 西南交通大学学报,2005,40(5):610-615.
- [8] 李成钢,黄丁发,周乐韬,等. GPS/VRS参考站网络的电离层误差建模技术研究[J]. 测绘科学,2007,32(4):29-31.
- [9] 黄丁发,李成钢,吴耀强,等. GPS/VRS实时网络改正

数生成算法研究[J]. 测绘学报,2007,36(3):256-261,339.

- [10] LI Chenggang, SHI Xiaochun, TANG Liming, et al. Real-time Geological Disaster Monitoring with Deformation Parameters Auto-detection Technique[C]//Monitoring and Assessment of Ground Subsidence and Earthquakes. Chengdu, China: SPIE, 2009.