

文章编号:1004-9037(2014)06-0957-07

# 光载 GPS 一机多天线系统的实验验证

宋希希 郭荣辉 周永刚 潘时龙

(雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室,南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

**摘要:**基于 GPS 的姿态测量和结构健康监测系统具有速度快、精度高、可连续工作等特点,传统结构主要使用电缆连接天线和接收机。本文实验论证了一种光载 GPS 一机多天线系统。利用体积小、质量轻、损耗低、抗电磁干扰的光纤代替电缆,实现了天线与接收机之间的高质量连接,拓展了该系统的基线长度和测量区域;同时,在同一接收机中引入多个同步解算模块,避免了传统一机多天线系统信号切换时引入的周跳,从而大幅降低了数据处理算法的复杂性,提高了整体系统的效率和测量精度。实验结果表明,所提出的光载 GPS 一机多天线系统能精确测量出基线向量,且测量精度达到毫米量级,在飞行器姿态测量和建筑物结构健康监测等方面具有潜在的应用性。

**关键词:**全球导航卫星系统;光纤;一机多天线系统;健康监测

中图分类号:TN29

文献标志码:A

## Experimental Demonstration of GPS-over-Fiber Multi-antenna Receiver System

*Song Xixi, Guo Ronghui, Zhou Yonggang, Pan Shilong*

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Attitude determination and structural health monitoring system based on GPS multi-antenna has the advantages of fast speed, high precision and continuous working. However, the conventional systems usually use cable to connect antennas and receivers. A GPS-over-fiber multi-antenna receiver system is experimentally demonstrated. Thanks to the advantages of small size, light weight, low loss and immunity to electromagnetic interference of the optical fiber, the proposed system can achieve longer baseline and larger measuring areas than conventional systems. Parallel decoding algorithm is also applied in the proposed system. It can avoid cycle slips introduced by the signal switching in the conventional GPS multi-antenna system. The complexity of data processing algorithm is thus reduced and the efficiency and measuring precision are improved significantly. Experimental results show that the proposed GPS-over-fiber multi-antenna receiver system can measure the baseline accurately and the measurement error is only a few millimeters. The system can be potentially applied to attitude determination and structural health monitoring.

**Key words:** GPS; optical fiber; multi-antenna receiver system; health monitoring

## 引 言

全球导航卫星系统(以 GPS 系统为例)经过

30 多年的发展已经具有覆盖率高、定位准确、可全天候连续运行等特点<sup>[1]</sup>。将 GPS 多天线系统应用于姿态测量和结构健康监测等领域已有广泛的报道,早在 20 世纪 90 年代,国际上就有利用 GPS 多

天线系统作为航空航天器的全能敏感器来进行导航和测姿的案例。例如 1993 年,美国航空航天局(NASA)在 King Air 200 双涡轮螺旋桨运输机上用 GPS 进行了姿态测量,精度达到  $0.05^\circ$ (RMS),数据更新率达到 2 Hz,验证了 GPS 用于航空器姿态测量的可行性<sup>[2]</sup>;同年,加拿大在 Matthew 运动传感器海上实验中也验证了 GPS 用于船舶姿态测量的可行性<sup>[3]</sup>;1994 年,Atlantis 号航天飞机释放的一颗 Crista-SPAS 卫星也利用 GPS 同时测定其姿态和轨道。相对而言,国内开展 GPS 姿态测量的研究较晚,2000 年,武汉测绘科技大学利用 3 台接收机对船体姿态进行测量,测量精度达到了厘米量级<sup>[4]</sup>。

结构变形监测是 GPS 多天线系统应用的另一个重要方面。为检测全长 2 817.46 m 的山东黄河大桥健康情况,文献[5]利用计算机技术、无线通信技术和 GPS 技术远程监测运营期间大桥位移连续变化。文献[6]研究开发了“虎门大桥三维位移 GPS 实时动态监测系统”,实测资料表明,该系统与加速度计测量结果十分相近。但该监测系统包含了 13 台 GPS 接收机,高昂的成本极大地限制了其应用范围。

为了解决昂贵的多接收机问题,1999 年丁晓利等人构建了一种一机多天线的系统<sup>[7]</sup>,该系统在不改变已有接收机结构的情况下,利用多天线控制器将多根天线与接收机相连。在滑坡和大坝等局部变形监测中使用这种系统可以极大地降低成本,已应用于小浪底大坝变形的监测<sup>[8]</sup>,隔河岩大坝的变形监测<sup>[9]</sup>,小湾电站边坡的监测<sup>[10]</sup>等。然而,该系统采用的仍然是损耗很大的电缆连接链路,在具有长基线的监测系统中,必须使用多个 GPS 放大器;且多根天线轮流和接收机相连,信号之间的切换不可避免地引入周跳,增加了后期处理算法的复杂性。

针对传统 GPS 监测系统中存在的问题,人们提出了光载 GPS 系统。文献[11]利用直调激光器将远端的 GPS 信号调制到光载波上,通过光纤传输至中心站,光电转换后进入接收机解调,初步论证了光载 GPS 系统的可行性;加拿大 Laval 大学研究小组已经实现了一机多天线的的光载 GPS 接收机,并且利用天线与接收机之间的实时相对硬件延时监测模块,将垂直精度提高到与水平精度相当,达到毫米量级<sup>[12,13]</sup>;此外,美国 ZONU、英国 TimeTools 等公司纷纷研制了相应的光载 GPS 链路,并取得了一定的进展。相对而言,国内光载 GPS

研究较少,目前未见有报道。

本文构建了一种光载 GPS 一机多天线系统,利用不同天线处的载波相位观测值精确计算出各天线位置的相对变化,从而求解出待测物体的微小形变。相对于文献[11],本文设计的系统只需一个接收机,降低了系统成本;其次,本系统使用的接收机具有多个同步解算模块,相对于文献[7]提出的传统一机多天线系统,不需要控制器选择天线接入,降低了后期数据处理的复杂性,同时本系统以光纤代替电缆连接天线和接收机,使得系统具有体积小、质量轻、损耗低、抗电磁干扰等优点,本系统在飞行器姿态测量,建筑物微小形变监测等方面具有潜在的应用。

## 1 载波相位测量原理

GPS 卫星主要发射两种不同频率的载波信号  $L1$  和  $L2$ ,其中  $L1$  载波频率为 1 575.42 MHz,对应的波长约为  $\lambda=19.03$  cm。接收机一般可以测量到波长的百分之一,故理论上载波相位测量精度可以达到毫米量级<sup>[1]</sup>,因此,在对精度要求很高的姿态测量和微小形变监测系统中,一般利用 GPS 载波相位值来解算多个天线间的相对位置。原始的 GPS 载波相位观测方程为

$$\lambda \cdot \phi_i^j(t) = \rho_{i0}^j(t) - [l_i^j(t) \quad m_i^j(t) \quad n_i^j(t)] \cdot \begin{bmatrix} \delta X_i \\ \delta Y_i \\ \delta Z_i \end{bmatrix} - \lambda \cdot N_i^j(t_0) + c \cdot \delta t_i(t) - c \cdot \delta t^j(t) + I_i^j(t) + T_i^j(t) \quad (1)$$

其中载波相位实际观测量为

$$\phi_i^j(t) = \phi_i(t) - \varphi^j(t) \quad (2)$$

式中: $\phi_i(t)$ 为接收机产生的参考载波相位; $\varphi^j(t)$ 为接收到的 GPS 卫星信号的载波相位; $\delta t_i(t)$ 为接收机钟差; $\delta t^j(t)$ 为卫星钟差; $I_i^j(t)$ 为电离层延迟误差; $T_i^j(t)$ 为对流层延迟误差; $N_i^j(t_0)$ 为初始观测时刻的整周模糊度; $[X_0^i \ Y_0^i \ Z_0^i]$ 为卫星近似位置; $[X_{i0} \ Y_{i0} \ Z_{i0}]$ 为接收机近似位置; $\rho_{i0}^j = \sqrt{(X_0^i - X_{i0})^2 + (Y_0^i - Y_{i0})^2 + (Z_0^i - Z_{i0})^2}$ 为卫星与接收机间的近似距离; $l_i^j(t) = \frac{X_0^i - X_{i0}}{\rho_{i0}^j}$ , $m_i^j(t) = \frac{Y_0^i - Y_{i0}}{\rho_{i0}^j}$ , $n_i^j(t) = \frac{Z_0^i - Z_{i0}}{\rho_{i0}^j}$ 为卫星与接收机间的方向余弦; $[\delta X_i \ \delta Y_i \ \delta Z_i]$ 为接收机坐标改正值;

令下标  $i$  表示接收机,上标  $j$  表示卫星,将接收机 1 作为基站(参考站),接收机 2 作为流动站,在短基线  $<20$  km 情况下,假设接收机 2 的近似坐

标为接收机 1 的真实坐标,即:  $\rho_{20}^i(t) = \rho_1^i(t)$ , 在原始载波相位观测方程(1)中取  $i=1, 2$ ; 相减得到修正的单差观测方程为

$$\lambda \cdot \Delta \phi^j(t) = -[l_2^j(t) \quad m_2^j(t) \quad n_2^j(t)] \cdot \begin{bmatrix} \delta X_2 \\ \delta Y_2 \\ \delta Z_2 \end{bmatrix} - \lambda \cdot \Delta N^j(t_0) + c \cdot \delta t_2(t) - c \cdot \delta t_1(t) + D2 - D1 \quad (3)$$

式中:  $\Delta$  表示单差操作符,  $[\delta X_2 \quad \delta Y_2 \quad \delta Z_2]^T$  表示接收机 2 相对于接收机 1 的位置偏移量,称之为基线向量,也是本文待求的重要数据。  $D1, D2$  为 GPS 信号从天线到接收机的传输距离,因为实际需要计算的是天线间的相对位置,而采集的观测数据是进入接收机时刻的载波相位,与天线接收时刻的相位并不一样,中间有一个因传输延时引起的相位差,相位差中整周的载波部分可以计入初始观测时刻的整周模糊度  $N_i^j(t_0)$  中,只剩下不足一周的部分,实际计算可认为  $D1, D2$  均小于  $\lambda$ 。

在短基线情况下,单差观测方程能够很好地消除卫星钟差,极大地减小对流层、电离层的误差。采用一机多天线系统,接收机只有一个时钟,因而接收机钟差也可消除,若能实时测量天线到接收机间由于硬件延时引起的相位差,并对接收的载波相位值进行校准,采用一机多天线系统的单差观测方程可以将垂直精度提高至与水平精度相当,且达到毫米级<sup>[12-13]</sup>。

单差观测方程(3)对每颗卫星都适用,同步观测多颗卫星时,选择其中一颗作为参考卫星,其余卫星所得单差观测方程与参考卫星单差观测方程相减,可得载波相位双差观测方程

$$\lambda \cdot \nabla \Delta \phi^k(t) = -[\nabla l_2^k(t) \quad \nabla m_2^k(t) \quad \nabla n_2^k(t)] \cdot \begin{bmatrix} \delta X_2 \\ \delta Y_2 \\ \delta Z_2 \end{bmatrix} - \lambda \cdot \nabla \Delta N^k(t_0) \quad (4)$$

式中  $\nabla$  表示双差操作符。由式(4)可知双差观测方程能够消除接收机钟差,同时消除了天线与接收机间由于硬件延时引起的相位差,即各天线到接收机的长度不同对测量结果没有影响。在实际测量中,双差观测方程应用最广泛;本文采用双差观测方程进行基线的解算。

双差观测方程(4)讨论的是单个历元的情况,一般解算需持续观测多颗卫星、多个历元,将所有方程组合起来可以得载波相位双差观测方程的矩阵形式

$$y = A \cdot a + B \cdot b + e \quad (5)$$

式中:  $m$  为观测历元数,  $n+1$  为卫星数;  $y$  为双差相位观测矢量;  $A$  为整周模糊度系数矩阵;  $a$  为双差相位整周模糊度向量;  $B$  为方向余弦矩阵;  $b$  为基线向量;  $e$  为观测噪声。方程(5)含有两个未知量:双差相位整周模糊度  $a$  ( $a$  为整数)和基线向量  $b$ 。一般先利用最小二乘法求出整周模糊度和基线向量的初始解(浮点解),此时  $a, b$  均为小数,再用模糊度固定算法正确固定  $a$  的整数解,最终求得基线向量  $b$  的固定解。整周模糊度的固定时间决定基线解算的时间,本文采用经典 LAMBDA 算法进行模糊度的固定<sup>[14]</sup>,实际验证结果稳定准确。

## 2 实验原理

### 2.1 数据采集

本次实验所用的接收机是在通用软件无线电平台(上海宇志通信有限公司 SDR6862)上开发而成,该平台有 4 个独立射频前端模块,通过编程重构最大可同时接入 4 根天线进行定位解算,从而形成一机多天线系统。通过串口可将载波相位观测方程解算所需的数据输出并保存至电脑,主要数据包括同一时刻不同卫星的坐标,不同天线对应不同卫星的伪距,不同天线处的载波相位观测值,接收机的近似坐标等。

### 2.2 实验原理图和实物图

实验原理如图 1 所示。在远端天线单元, GPS 天线接收的信号经过一定的放大和滤波后进入光电调制器进行电光转换,然后通过一定长度的光纤传输到中心站。在中心站,通过光电探测器还原出 GPS 信号,然后进入接收机进行数据采集和信号处理,最终解算出基线向量。实际测量系统中,选择窄带 GPS 低噪放可以不需要 GPS 带通滤波器,远端只需放大器、激光器和调制器,系统结构简单紧凑。由于 GPS 信号频率较低,使用低频的调制器和探测器可以使应用成本进一步降低。本实验的实物图如图 2 所示。

### 2.3 电光调制性能分析

GPS 信号到达地面的功率大约为  $-130$  dBm<sup>[1]</sup>, 要将 GPS 信号有效地调制到光载波上需要将信号放大,实验中除去所用增益可达 40 dB 的 GPS 天线外,还需使用 GPS 低噪放<sup>[15]</sup>, 本实验首先测量了接收机能够锁定的卫星数目和所用 GPS 低噪放增益之间的关系,结果如图 3 所示。

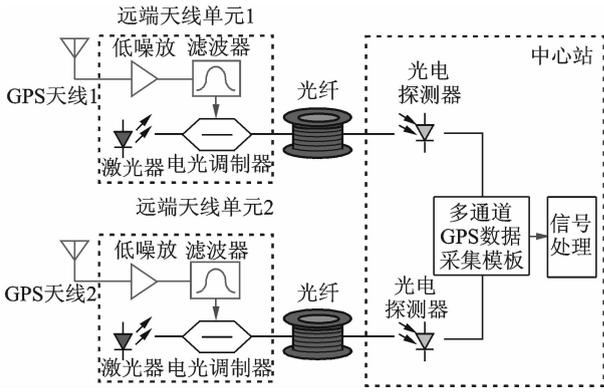


图 1 光载 GPS 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of proposed GPS-over-fiber system

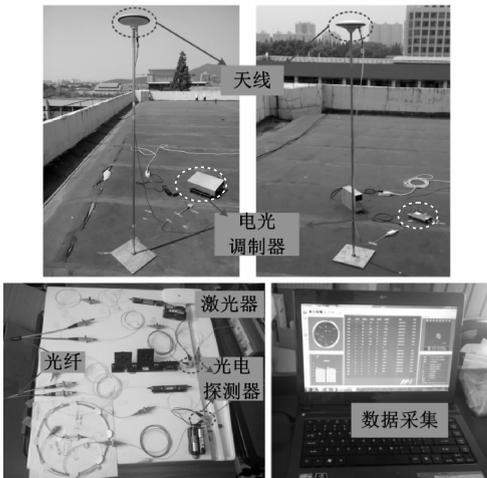


图 2 光载 GPS 系统实物照片

Fig. 2 Photograph of GPS-over-fiber system

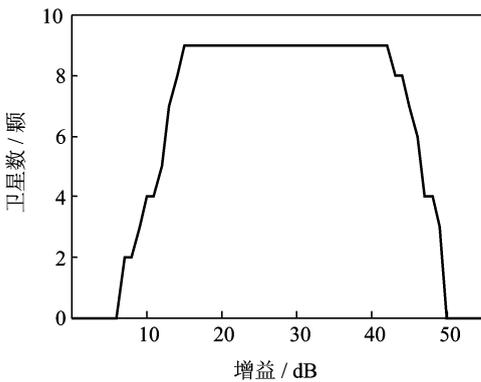


图 3 观测卫星数与放大器增益的关系

Fig. 3 Relationship between number of captured satellites and amplifier gain

实验时将调制器偏置在线性点,由图 3 可知,当放大器增益很小时, GPS 信号很微弱,调制器的调制深度很小,观测的卫星数很少;增益达 10 dB

以上可观测到 4 颗卫星,在 15 dB 时达到 9 颗卫星,也是该时间段所能观测到的最大卫星数;随着增益的增大,卫星数保持最大值;当增益超过 42 dB 时,卫星数开始减少;超过 48 dB 时,卫星数减少为 4 颗以下。原因可能是增益到一定值时,放大的 GPS 信号出现饱和失真,接收机不能正确地解调,由此可知本系统放大器的增益选择在 10 dB 至 48 dB 内,可以有效地观测到解算所需最小卫星数 (4 颗),有 38 dB 的增益动态范围。根据此测量,实验中将放大器增益设定为 30 dB。

### 3 实验结果与分析

本文通过以下几组实验,验证和分析了光载 GPS 系统的可行性:

(1) 首先按照传统结构将天线直接通过 10 m 电缆连接接收机,采集 2 根天线接收到的数据,将所得数据代入观测方程(5)中解算,得出基线长和各卫星残差随时间变化关系,如图 4 所示。

(2) 基线长度不变,用 150 m 的光纤代替电缆连接天线和接收机,得出基线长和残差随时间变化关系,如图 5 所示。

(3) 基线长度不变,将光纤增长至 2 km,再次求解基线长和残差随时间变化关系,如图 6 所示。

本实验选取历元间隔为 10 s,总共观测 250 个历元。每个基线图中插入了两个特殊点,一个表示整周模糊度固定时的历元数和对应的基线长度,另一个表示观测到第 250 个历元时对应的基线长度。根据实验结果可知,无论是电缆连接的系统还是光纤连接的系统,经过一定时间的观测,基线向量都可精确固定,此后将保持稳定。由于不同测量情况下卫星的数目、高度角和观测噪声等因素不同,整周模糊度固定的时间也不相同。

为了进一步验证整周模糊度的正确性,本文还绘制了基线向量固定后双差观测值的残差图。一般来说,所有卫星的残差值都小于二分之一载波波长时才能认为模糊度正确固定<sup>[1]</sup>,本实验结果显示基线向量固定后所有残差值随时间变化均在 0.1 周之内,验证了基线求解结果的正确性和稳定性。

此外,实验中还使用 150 m 光纤连接天线和接收机,分别构建了长为 40 m,110 m 左右的基线向量,得到的基线长和残差结果如图 7,8 所示。

根据实验结果可知,本系统能够精确地求解出基线长度,使用光纤链路基线可以长达上千米,在

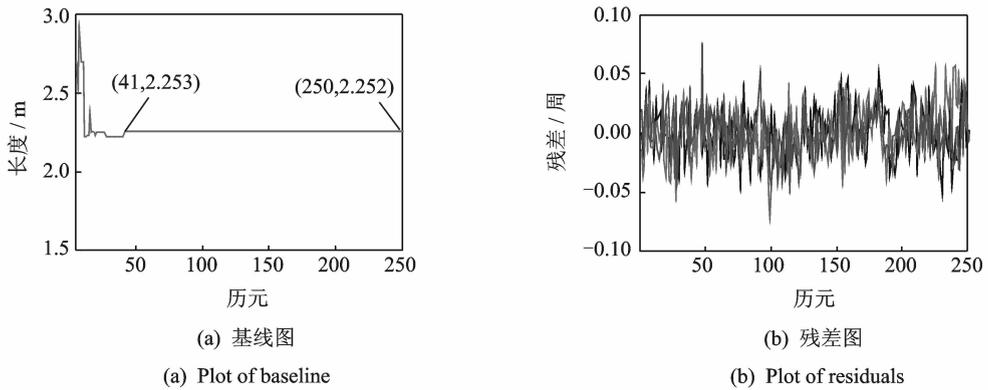


图 4 使用电缆连接天线和接收机时的解算结果

Fig. 4 Measurement results when antennas and receiver are connected by electrical cables

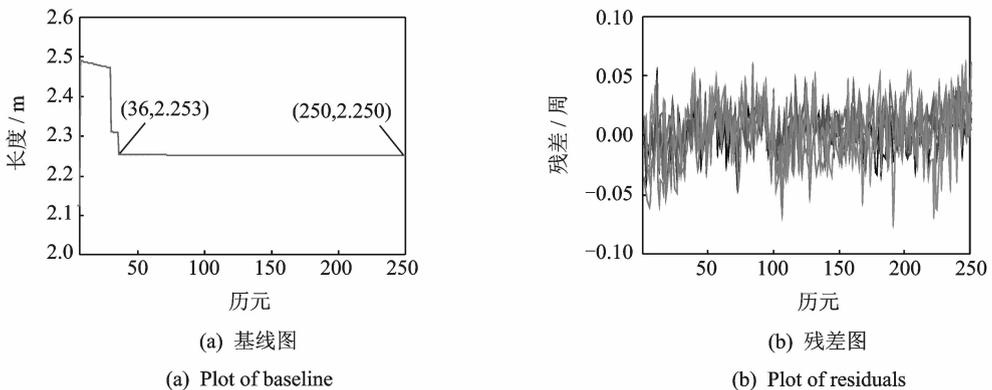


图 5 使用 150 m 长光纤连接天线和接收机时的解算结果

Fig. 5 Measurement results when antennas and receiver are connected by 150 m optical fibers

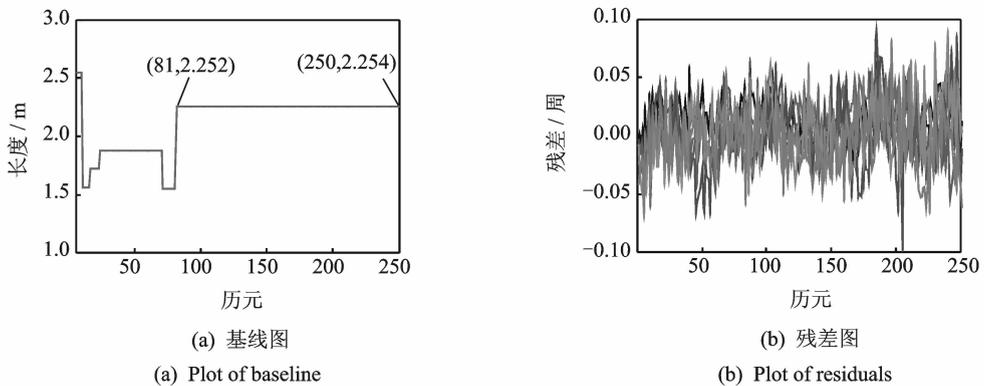


图 6 使用 2 000 m 长光纤连接天线和接收机时的解算结果

Fig. 6 Measurement results when antennas and receiver are connected by 2 km optical fibers

山体滑坡、大坝监测等野外系统中有较大应用意义。

为了进一步求解测量精度,本文分析了两种不同长度的基线向量三维坐标  $X, Y, Z$  和基线长度  $L$  在 WGS-84 坐标系中的抖动(本文以标准差描述),如表 1 所示。

通过图表可知,本系统能够快速求解出基线

向量,且三维坐标和基线长度测量精度达到毫米量级。

表 1 基线向量的三维坐标抖动

Table 1 Standard deviation of 3-D coordinate

基线长/m	$X/mm$	$Y/mm$	$Z/mm$	$L/mm$
38.76	1.82	2.33	1.92	0.81
111.49	0.80	1.24	0.52	0.34

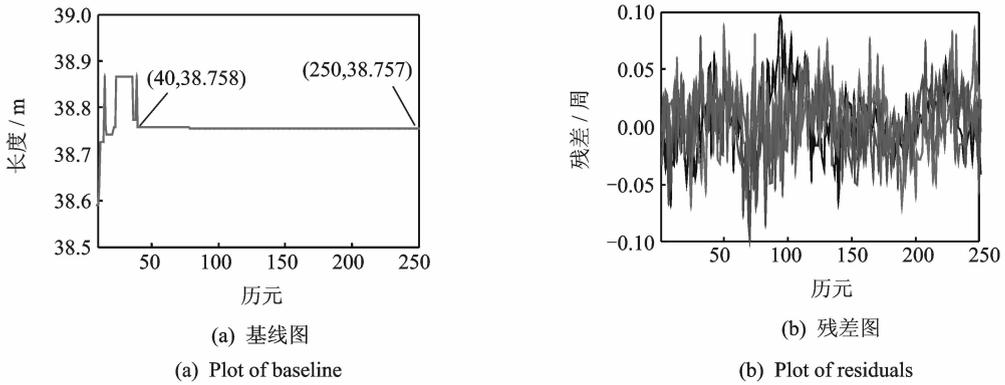


图7 基线长40 m左右的解算结果

Fig. 7 Measurement results when baseline length is about 40 m

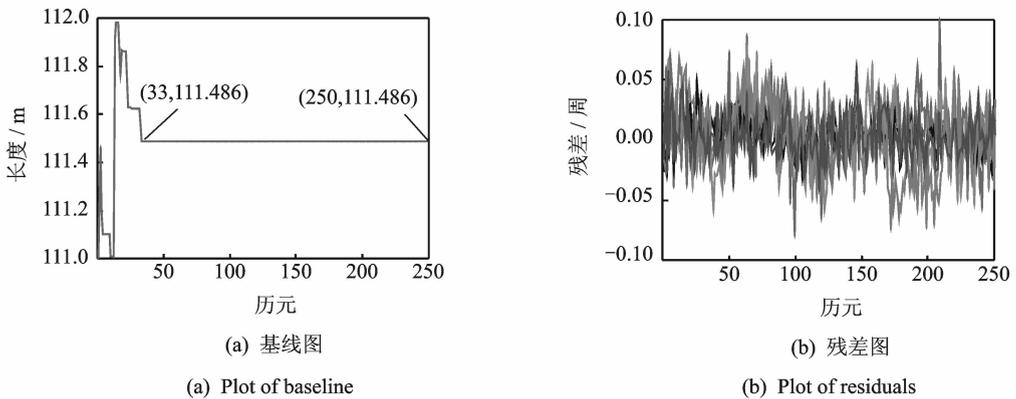


图8 基线长110 m左右的解算结果

Fig. 8 Measurement results when baseline length is about 110 m

## 4 结束语

本文通过使用光纤代替电缆将多根天线和接收机相连,构建了一个体积小、质量轻、抗电磁干扰的光载GPS一机多天线系统。实验结果表明,引入光链路后没有恶化系统的测量精度,实验中测量精度达到毫米量级,说明该系统在姿态测量,微小形变监测等系统中能发挥重大作用。

为了进一步减少精确测量的时间,应该尽量在观测条件良好的情况下选择高度角大的卫星测量。同时,要达到快速实时的测量,还需要进一步优化算法。另外,本文构建的光载GPS一机多天线系统使用是双差观测方程进行基线向量的解算,由于双差相位观测间存在较强的相关性,双差观测方程会引入较多的随机观测噪声,降低了垂直方向的测量精度。若能使用单差观测方程,实时测量硬件延时误差并对载波相位观测值进行校准,能将垂直精度提高到和水平精度相当,这是需要进一步研究

的内容。

### 参考文献:

- [1] 兰孝奇,黄张裕,李森,等. GPS观测数据处理与应用[M]. 北京:科学出版社,2012:12.  
Lan Xiaoqi, Huang Zhangyu, Li Sen, et al. Processing and application of GPS observation data[M]. Beijing: Science Press, 2012:12.
- [2] Cohen C E, Parkinson B W, McNally B D. Flight tests of attitude determination using GPS compared against an inertial navigation unit[J]. Navigation, 1994, 41(1):83-97.
- [3] Lachapelle G, Cannon M E, Lu G, et al. Shipborne GPS attitude determination during MMST-93[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(1): 100-104.
- [4] 赵建虎,刘经南. GPS测定船体姿态方法研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000,25(4):353-357.  
Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Method in determining vessel attitude with GPS[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(4):353-357.

- [5] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的应用[J]. 中国科学基金, 2005, 19(1): 8-12.  
Ou Jinping. Research and practice of smart sensor networks and health monitoring systems for civil infrastructures in mainland China[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2005, 19(1): 8-12.
- [6] 过静珺, 戴连君, 卢云川. 虎门大桥 GPS(RTK)实时位移监测方法研究[J]. 测绘通报, 2000, 12(2): 4-12.  
Guo Jingjun, Dai Lianjun, Lu Yunchuan. Study of method for realtime survey on Humen Bridge by GPS (RTK) [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000, 12(2): 4-12.
- [7] Ding X L, Chen Y Q, Huang D F, et al. Slope monitoring using GPS-A multi-antenna approach [J]. GPS World, 2000, 11(3): 52-55.
- [8] 杨光, 何秀凤, 华锡生, 等. GPS 一机多天线在小浪底大坝变形监测中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(3): 52-55.  
Yang Guang, He Xiufeng, Hua Xisheng, et al. Application of GPS multi-antenna system to Xiao Lang Di dam deformation monitoring [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(3): 52-55.
- [9] 张小红, 李征航, 李振洪. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的灵敏度分析[J]. 测绘通报, 2000 (11): 10-12.  
Zhang Xiaohong, Li Zhenghang, Li Zhenhong. GPS sensitivity analysis applied to the automatic monitoring system of Ge He Yan dam deformation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000 (11): 10-12.
- [10] 许斌, 何秀凤, 桑文刚, 等. GPS 一机多天线技术在小湾电站边坡监测中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(3): 64-67.  
Xu Bin, He Xiufeng, Sang Wengang, et al. Application of GPS multi-antenna technology to slope deformation monitoring at Xiao Wan hydropower station[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2005, 29(3): 64-67.
- [11] Pessoa L M, Oliveira J M B, Coelho D, et al. Transmission of differential GPS signals over fiber for aircraft attitude determination[C]//IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference (AVFOP 2012). [S. l.]: IEEE, 2012: 80-81.
- [12] Macias-Valadez D, Santerre R, Larochelle S, et al. Improving vertical GPS precision with a GPS-over-fiber architecture and real-time relative delay calibration[J]. GPS solutions, 2012, 16(4): 449-462.
- [13] Macias-Valadez D, LaRochelle S, Santerre R, et al. Fiber optic synchronisation architecture for high precision GPS applications[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America. [S. l.]: IEEE, 2009: 1-3.
- [14] De Jonge P, Tiberius C. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects [J]. Publications of the Delft Computing Centre, LGR-Series, 1996, 12(12): 1-47.
- [15] 张文, 饶谷音, 韩松来, 等. 不同相干积分方法对 GPS 弱信号捕获的影响[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(1): 38-44.  
Zhang Wen, Rao Guyin, Han Songlai, et al. Effect of different noncoherent integration alternatives on weak GPS signal acquisition [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(1): 38-44.

作者简介: 宋希希(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 微波光子学, E-mail: doublexixi1016@163.com; 郭荣辉(1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 电路与系统; 周永刚(1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 电磁场与微波技术; 潘时龙(1982-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 微波光子学, E-mail: pans@nuaa.edu.cn.

