

一种基于 RTK 的遥测设备方位零位标定方法*

庞岳峰, 霍文杰, 张彬艳, 马占顺
(酒泉卫星发射中心 酒泉 732750)

摘要: 针对现有遥测设备方位零位标定方法不满足机动测控需求的问题, 提出一种基于旋翼无人机及实时动态 RTK 载波相位差分技术的遥测设备方位零位标定方法, 推导测向关键算法, 完成方位零位标定系统设计。通过采用数据同步匹配、异常值剔除及随机误差平滑等算法提高标定精度。测试及分析结果表明, 采用该方法的方位零位标定精度可满足当前 S 频段和 Ka 频段遥测设备要求。

关键词: 方位零位; 旋翼无人机; RTK; 遥测设备

中图分类号: V556.1

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)02-0068-07

Azimuth zero position calibration method of telemetry equipment based on RTK surveying technology

PANG Yuefeng, HUO Wenjie, ZHANG Binyan, MA Zhanshun
(Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

Abstract: In order to solve the problem that the azimuth zero position calibration method of current telemetry equipment doesn't meet the requirements of mobile measurement and control, this paper proposes an azimuth zero position calibration method based on rotor UAV and RTK surveying technology. The key algorithm of direction finding is deduced and the design of azimuth zero calibration system is completed. The calibration accuracy is improved by using the algorithms of data synchronization matching, outlier elimination and random error smoothing. The test result shows that the calibration accuracy of this method can meet the requirements of current telemetry equipment in S and Ka frequency bands.

Key words: Azimuth zero position; Rotor UAV; RTK; Telemetry equipment

引 言

实时动态 RTK (Real-Time Kinematic) 载波相位差分技术是基于载波相位观测值的实时动态定位技术, 能够实时得到厘米级的定位精度^[1,2]。其优势是在消除卫星轨道、钟差等残余误差^[3,4]的同时可以实时估计电离层参数或采用高精度电离层改正数来削弱其影响^[5]。

为了实现目标捕获与跟踪, 车载遥测设备到达布站位置后, 要标定天线方位零位偏差。当前, 部分车载遥测设备无寻北功能, 在外场执行任务时, 现有的方位零位偏差标定方法不能兼顾标定精度和对机动测控设备快速标校的需求。针对该问题, 研究了采用小型旋翼无人机及 RTK 载波相位差分技术来实现方位零位偏差修正的方法, 完成了低成本、高精度遥测设备方位零位标定系统设计。

1 遥测设备方位零位偏差

天线方位零位偏差是指天线在自身参考方位零度时, 天线的电轴指向在水平面上与大地正北方向的夹角, 顺时针方向为正, 逆时针方向为负。方位零位偏差随着布站时停车方向而变化, 当车尾方向由北沿顺时针方向逐渐转向南时, 方位零位偏差由 0° 逐渐向 180° 过渡; 而当车尾方向由北沿逆时针方向逐渐转向南时, 方位零位偏差由 0° 逐渐向 -180° 过渡, 几个角度之间的关系如图 1 所示。图中 θ 为天线车尾方向相对于正北方向的方位零位偏差, θ_1 为天线相对于正北的方位角, θ_2 为天线方向相对于车

*基金项目: 酒泉卫星发射中心科研基金 (2018ZKZ003)

收稿日期: 2020-03-17

尾方向的卷绕角。

2 基于 RTK 技术的方位零位标定系统设计

随着我国北斗系统全面建成，多系统多频信号 RTK 测向的优势更加明显，多频多模观测信号将大大减弱环境限制对 RTK 技术的影响，提高定位测向的精度和可用性^[6-8]。单个 GNSS 接收机可确定位置，两个以上 GNSS 接收机可测向，据此原理设计基于 RTK 测向技术的遥测设备方位零位标定系统。

2.1 方位零位标定系统组成

方位零位标定系统由旋翼无人机、RTK 移动端、RTK 基准站及数据处理终端组成。RTK 基准站接基准天线和测向天线，可作为独立的测向单元使用。在遥测设备机械零位已校准的前提下，采用基准、测向天线测量出的设备车尾方位即方位零位偏差，由于这种测量方式基线较短，方位零位偏差测量精度在 0.1°左右。

在需要进一步提高方位零位偏差测量精度时，采用无人机搭载 RTK 移动端的模式，RTK 基准站基准、测向天线与 RTK 移动端位置信息进行联合解算完成。测量时将基准端天线安放在设备车体上，无人机搭载 RTK 移动端悬停，无人机动力及所搭载设备供电统一由无人机电源模块提供。采用数传电台把基准站的观测信息连续传给移动端，移动端通过电台接收观测数据，解算后实时得到三维坐标、基线长度和方位信息并向地面数据处理终端发送，同时数据处理终端通过电台发送无人机控制信息和信标设置命令。这种动态测量模式一般要求基准站和移动站同时接收到 5 颗以上的卫星，遥测设备方位零位标定系统组成如图 2 所示。

基准站由主机、电源模块和电台组成。RTK 板卡接收卫星信号，并接收所有卫星的 RTK 改正数据，然后按照 RTCM 的标准格式通过串口发送给数传电台，数传电台将改正数据发送给 RTK 移动端，供其进行实时载波相位差分。RTK 基准站组成见图 3、板卡实物见图 5。

无人机及 RTK 移动端由旋翼无人机、数传电台和 RTK 移动端组成。RTK 移动端与 RTK 基准站主要有两方面区别：一是为减小移动端体积，延长电池使用时间，采用小型化设计；二是为方便野外作业，RTK 移动端可选择采用无人机电源供电或外接电池供电。移动端接收卫星信号，并接收基准站发送的改正数据，进行实时载波相位差分，从而获得高精度基线测向。基准站和移动端的 RTK 板卡采用 2018 年上市的 ZED-F9P 芯片；数传电台采用 XBee 模块 XPB9B，其传输实测距离大于 1200m；Ingenic X1000 微处理器完成相关运算和通信参数设置。无人机及 RTK 移动端组成关系如图 4 所示。

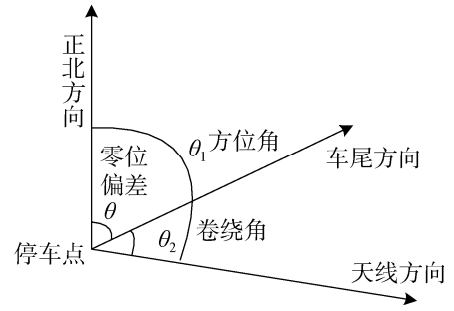


图 1 方位零位偏差定义
Fig. 1 Definition of azimuth zero position deviation

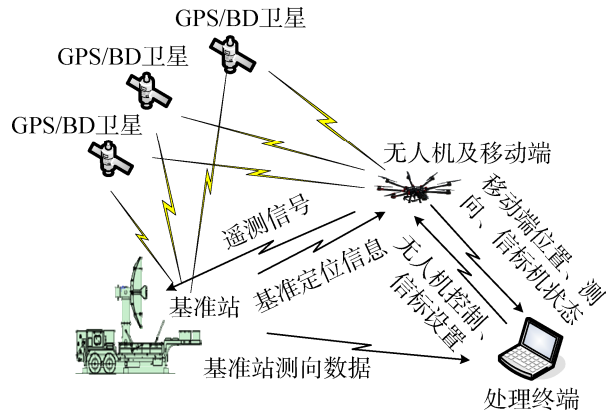


图 2 方位零位标定系统示意图
Fig. 2 Diagram of azimuth zero calibration system

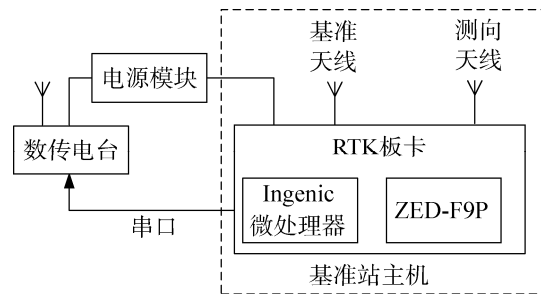


图 3 RTK 基准站组成示意图
Fig. 3 The diagram of RTK base station composition

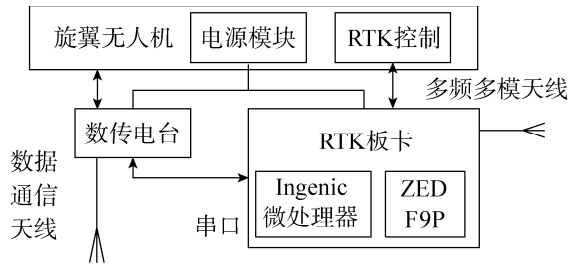


图 4 RTK 移动端组成示意图
Fig. 4 The diagram of RTK mobile device composition

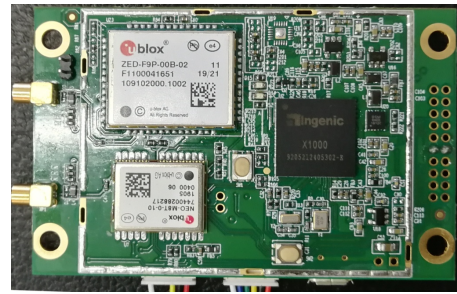


图 5 RTK 基准站板卡实物图
Fig. 5 The physical picture of RTK base station

2.2 测向解算流程设计

方位零位标定的前提是求解基线向量。计算的流程是首先利用三差求出近似的基线长度, 再利用浮动双差法求出相位模糊度和基线矢量, 将求得的相位模糊度凑整后, 进行固定双差的解算, 最后求解出精密基线向量^[9-11]。移动端电台将接收到的改正数据通过串口送达开发板, 移动端同时进行卫星观测、解算卫星位置, 在选星及周跳探测后建立双差观测方程, 然后通过确定单个天线的载波相位整周模糊度, 进而确定双天线的载波相位整周模糊度单差, 完成基线解算及精度计算后输出结果, 处理结果发送模块将测向值通过串口发送给电台。基于载波相位的差分测向解算流程如图 6 所示。

2.3 方位零位标定方法

为提高测量精度, 标定时需获得遥测天线站址中心相对于 RTK 基准天线的坐标, 该参数可用几何学原理求得。方位零位标定时, 基准端接基准天线和测向天线, 两天线放置于遥测天线站址中心同一水平面内, 与站址中心构成一个形状固定的三角形。基准和测向天线的位置通过测量得到, 通过坐标转换以及三角形余弦定理, 计算出遥测天线的相对站址坐标。无人机搭载 RTK 移动端和信标机在车体外一定距离悬停 (图 7), 具体步骤如下:

- ① O 为遥测天线站址中心, 事先已测定 R_0 、 OB_1 长度和 $\angle OB_1B_2$ 角度。
- ② 在天线载车 B_1 处放置 RTK 基准端基准天线, B_2 处放置基准端测向天线, 无人机搭载 RTK 移动端悬停, M 为无人机悬停点在 OB_1B_2 投影面上的投影点, 载波相位差分测定 R_1 、 R_2 、 θ_1 、 θ_2 , 依据 R_1 、 R_2 及 R_0 可解算出角度 $\angle B_2B_1M$

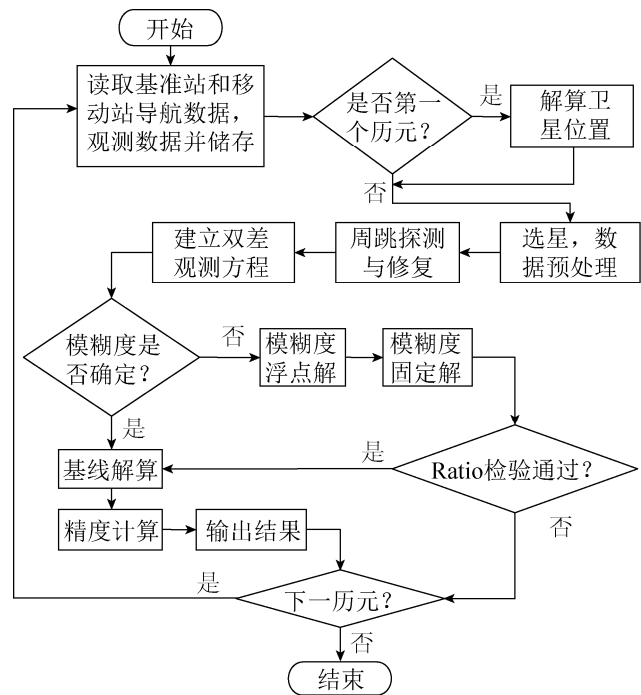


图 6 基于载波相位差分的测向流程图
Fig. 6 Directional flow chart based on carrier phase difference

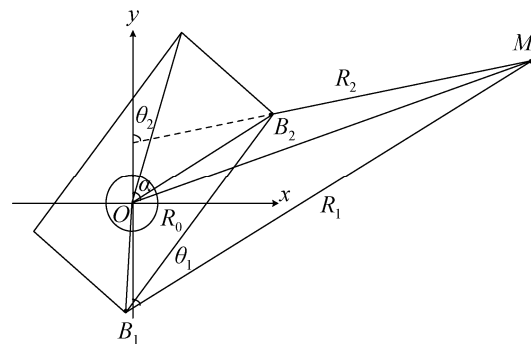


图 7 RTK 测量标定方位零位示意图
Fig. 7 Diagram of azimuth zero position calibration method based on RTK surveying technology

(余弦定理)。

③ 三角形 OB_1M 中, 已知两边一夹角 (OB_1 、 B_1M 、 $\angle OB_1M$), 计算出 $\angle OMB_1$ 。

④ 计算出天线相对于正北的方位角 $\alpha = \angle \theta_1 + \angle OMB_1$ 。

⑤ 转动天线, 使无人机 RTK 移动端天线位于标校电视中央, 记下卷绕角 θ_0 , 设天线车的方位零位偏差为 θ , 则方位零位偏差 $\theta = \theta_0 - \alpha$ 。

⑥ 控制无人机改变悬停位置, 重复步骤②至步骤⑤, 同样方法进行三次标定, 取均值作为正式值。

3 方位零位标定系统关键算法

考虑无人机悬停精度易受外界条件影响, 地面处理终端通过实时接收处理遥测设备伺服跟踪数据和 RTK 数据得出方位零位偏差, 通过对遥测设备伺服跟踪数据和 RTK 数据的时间对齐、插值、野值剔除、平滑等算法提高测量精度。

3.1 RTK 测向结果计算

RTK 测向计算过程在数据处理终端实现, 基准站及移动端定位信息通过电台发送至数据处理终端后由终端计算基线方向。由于遥测设备采用的是站心坐标系, 需要进行坐标转换, 具体步骤如下。

步骤 1: 坐标转换根据基准站记录的位置信息 (经度 L_c 、纬度 B_c 、高程 H_c), 将它转换成地心固连系位置参数。具体公式如下:

$$\begin{aligned} x_c &= (N_c + H_c) \cos B_c \cos L_c \\ y_c &= (N_c + H_c) \cos B_c \sin L_c \\ z_c &= [N_c(1 - e^2) + H_c] \sin B_c \end{aligned} \quad (1)$$

其中 N_c 为遥测设备在卯酉圈的曲率半径, $N_c = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_c}$, e^2 为第一地球离心率的平方, $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$, a 为地球椭球赤道半径 (长半径), b 为地球椭球短半径。同样, 将测量的移动端的大地经度 L_m 、纬度 B_m 、高程 H_m 用式 (1) 计算出相应的地心固连系位置参数 x_m 、 y_m 、 z_m 。

步骤 2: 将移动端由大地直角坐标系转换为移动端相对于基准站的东北天坐标 (N, E, U) 公式如下:

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_c \cos L_c & -\sin B_c \sin L_c & \cos B_c \\ \sin L_c & \cos L_c & 0 \\ \cos B_c \cos L_c & \cos B_c \sin L_c & \sin B_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c - x_m \\ y_c - y_m \\ z_c - z_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

步骤 3: 按照下式计算方位角 A 、俯仰角 E 和距离 R :

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{E^2 + N^2 + U^2} \\ A &= \arctan(E / N) \\ E &= \arccos(U / \sqrt{E^2 + N^2 + U^2}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 N 、 E 具有方向性, N 、 E 的不同符号与方位角计算关系见表 1, 方位角度转换完成后, 可以得到移动站相对于基准站的距离、方位和俯仰。

3.2 数据同步及匹配

由于 RTK 测量数据和遥测设备测角数据的传输频率不同, 因此需进行数据同步和匹配。数据同步主要是为保证两数据时间的对齐, 在此以移动端收星时间作为同步基准。遥测测角的采样率和 RTK 定位信息的采样率不同, 并且在测量数据记录的过程中, 可能会有某个点的数据没有被记录到, 所以在时间对齐后还需要进行采样率匹配, 以实现数据同步。

遥测测角的采样率为每秒 20 次, RTK 测量数据传输为每秒 5 次, 工程中还需要进行插值。RTK

表 1 方位角符号与计算关系

Table 1 Azimuth symbol and calculation relation

E 符号	N 符号	$A(^{\circ})$
+	+	$ A $
+	-	$180 - A $
-	-	$180 + A $
-	+	$360 - A $

测量数据插值选择 Neville 算法, 发挥其模型简单、计算量小的优势。具体插值方法可参考文献[12], 此处不再赘述。

3.3 测量数据随机误差平滑

平滑计算的目的是减小随机误差。遥测设备测量数据和 RTK 测量数据常带有随机误差, 需要对测量数据进行平滑处理, 以提高求解精度, 本文采取多项式平滑方法。

设一组测量数据 $\{t_i, x_i\} (i=1, 2, \dots, n)$, (t_i 为采样时间, x_i 为测量数据), 设多项式为

$$X_i = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_n t_i^n \tag{4}$$

通过最小二乘法原理使偏差最小, 即

$$\sum (x_i - X_i)^2 = \min \tag{5}$$

根据求极值方法, 将式 (4) 代入式 (5), 并求偏导数得出:

$$\frac{\partial}{\partial a_j} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{j=0}^N a_j t_i^j \right) = 0 (j=0, 1, \dots, N) \tag{6}$$

3.4 异常值的检测与剔除

采用外推拟合法进行野值的识别和检验。外推拟合法通常取前 4 个或 5 个连续正常的测量数据, 采用一阶或二阶多项式进行计算。 δ 为相应测量误差的均方差。假设连续 5 个测量数据为: $x_{i-5}, x_{i-4}, x_{i-3}, x_{i-2}, x_{i-1}$, 由最小二乘线性估计外推获取第 i 时刻测量数据估值 \bar{x}_i 为

$$\bar{x}_i = -\frac{4}{10}x_{i-5} - \frac{1}{10}x_{i-4} + \frac{2}{10}x_{i-3} + \frac{5}{10}x_{i-2} + \frac{8}{10}x_{i-1} \tag{7}$$

$$\begin{cases} |x_i - \bar{x}_i| < \delta & \text{数据可用} \\ |x_i - \bar{x}_i| > \delta & \text{数据剔除} \end{cases}$$

δ 一般选为多项式平滑的均方误差的 3 倍, $\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - X_k)^2}$, X_k 为时间 t_k 时的拟合多项式值。

4 标定精度测试与分析

遥测设备方位零位偏差的精度要求为 $\delta \leq 0.1 \times \theta_{0.5}$ 。S 频段车载遥测设备天线口径一般不超过 5.2m。5.2m 天线口径的 S 频段遥测设备半功率波束宽度为 0.9° , 方位零位偏差要求为 $\delta \leq 0.09^\circ$; 天线口径 1.8m 的遥测设备半功率波束宽度为 2.6° , 方位零位偏差要求为 $\delta \leq 0.26^\circ$ 。常用 Ka 频段遥测设备半功率波束宽度为 0.1° , 则方位零位偏差要求为 $\delta \leq 0.01^\circ$ 。

4.1 RTK 测向精度

利用经过大地精确测量的点位, 分别对 96.2m、422.5m 和 807.7m 基线下 RTK 测向精度进行了测试。96.2m 基线精度为 0.015° , 422.5m 基线精度为 0.004° , 807.7m 基线精度为 0.002° 。结果表明测向精度与基线长度具有很大的相关性, 基线越长计算的精度越高。为保证方位角计算的精确度, 在有效距离内应尽量增加基线长度。

4.2 无人机悬停精度

对无人机搭载移动端悬停进行精度测试, 无人机型号为大疆 M600 pro, 选择基线距离为 800m 左右的 5 个不同悬停位置进行测试, 每次悬停时间 180s, 每秒记录 5 组数据。统计悬停时段的方位最大差及均方差, 测试结果反映无人机悬停的水平方向均方差在 $0.026^\circ \sim 0.029^\circ$ 之间, 见表 2。

表 2 无人机悬停精度 (方位)

Table 2 UAV hovering accuracy (azimuth)

	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
最大值 ($^\circ$)	88.642	12.238	154.354	226.377	112.846
最小值 ($^\circ$)	88.578	12.177	154.296	226.315	112.783
最大差 ($^\circ$)	0.064	0.061	0.058	0.062	0.063
均方差 ($^\circ$)	0.028	0.027	0.026	0.029	0.026

4.3 方位零位标定精度

在某S频段5.2m天线口径车载遥测设备上, 进行方位零位标定精度测试, 测试前采用方位标对设备方位零位偏差进行校准, 以此校准值为方位零位偏差真值, 然后采用无人机搭载RTK移动端标定方法进行重新标定。选用两套设备进行精度测试, 每套设备进行3次标定。3次标定时无人机悬停方位不同, 但无人机与待标定设备距离均保持在800m左右, 标定结果如表3。

表3 方位零位标定精度

设备	次数	真值(°)	标定值(°)	精度(°)
设备1	第1次	48.562	48.513	0.049
	第2次	48.562	48.515	0.047
	第3次	48.562	48.605	-0.043
设备2	第1次	112.846	112.799	0.047
	第2次	112.846	112.892	-0.046
	第3次	112.846	112.801	0.045

进一步对图7中参与推导方位零位的各项误差进行分析, 影响方位零位标定精度的变量为 R_1 及 R_2 误差、 R_0 及 OB_1 测量误差、标校电视测量误差、无人机悬停水平精度和RTK移动端测量精度。已测得方位零位标定精度小于 0.049° , 满足现有S频段车载遥测设备的标定要求。大疆M600 pro悬停引入误差为 0.029° , 属于主要误差源。所以采用具有RTK差分功能的无人机后, 方位零位标定精度还会明显提高。

5 结束语

移动端还设计了一个小型信标机。该信标机在方位零位标定功能中并未用到, 但它是实现定向灵敏度标定和光电轴校准的必要器件, 为后续功能拓展提供支持。本文精度测试所采用的大疆M600 pro无人机水平悬停精度为1.5m, 如果采用具备RTK差分功能的无人机, 其水平悬停精度可提高一个数量级, 再通过改用高精度标校望远镜、加长基线距离、提高基准站天线安装精度等措施后, 该标定系统方位零位标定精度可满足Ka频段遥测系统不大于 0.01° 的方位零位标定精度要求。

参考文献

- [1] 张宝成. GNSS非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[J]. 测绘学报, 2014, 43(10): 1099.
ZHANG Baocheng. Study on the oretical methodology and applications of precise point positioning using un-differenced and uncombined GNSS data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(10): 1099.
- [2] 王世进, 秘金钟, 李得海, 等. GPS/BDS的RTK定位算法研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2014, 39(5): 621-625.
WANG Shijin, MI Jinzhong, LI Dehai, et al. Real-time kinematic positioning algorithm of GPS/BDS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 621-625.
- [3] 邹璇, 唐卫明, 葛茂荣, 等. 基于非差观测的网络实时动态定位方法及其在连续运行基准站跨网服务中的应用[J]. 测绘学报, 2011, 40(s1): 1-5.
ZOU Xuan, TANG Weiming, GE Maorong, et al. Method of network RTK based on un-differenced observation corrections and its functional realization in cross CORS service[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(s1): 1-5.
- [4] 鄢子平, 丁乐乐, 黄恩兴, 等. 网络RTK参考站间模糊度固定新方法[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2013, 38(3): 295-298.
YAN Ziping, DING Lele, HUANG Enxing, et al. A new method of ambiguity resolution in network RTK between reference stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(3): 295-298.
- [5] LI Xingxing, GE Maorong, ZHANG Hongping, et al. The GFZ real-time GNSS precise positioning service system and its adaption for COMPASS[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 1008-1018.
- [6] 姚宜斌, 胡明贤, 许超铃. 基于DREAMNET的GPS/BDS/GLONASS多系统网络RTK定位性能分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1009-1018.
YAO Yibin, HU Mingxian, XU Chaoqian. Algorithm and positioning accuracy analysis of GPS/BDS/GLONASS network RTK nased on DREAMNET[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1009-1018.

- [7] 何俊, 袁小玲, 曾琪, 等. GPS/BDS/GLONASS 组合单点定位研究[J]. 测绘科学, 2014, 39(8): 124–128, 170.
HE Jun, YUAN Xiaoling, ZENG Qi, et al. Study of GPS/BDS/GLONASS combined single point localization[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(8): 124–128, 170.
- [8] 李豹, 许江宁, 曹可劲, 等. 改进 LAMBDA 算法实现单频 GPS 整周模糊度快速解算[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(3): 365–368.
LI Bao, XU Jiangning, CAO Kejing, et al. A fast resolution of single frequency GPS integer ambiguity realized by improved LAMBDA algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(3): 365–368.
- [9] WILLI D, ROTHACHER M. GNSS attitude determination with non-synchronized receivers and short baselines on board a spacecraft[J]. GNSS Solutions, 2017, 21(4): 1605–1617.
- [10] 席志红, 耿更飞, 付存利. 一种基于双天线的北斗定位系统设计与实现[J]. 电子科技, 2014, 27(8): 101–104.
XI Zhihong, GEN Gengfei, FU Cunli. Design and implement of Beidou positioning system based on double antenna[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(8): 101–104.
- [11] 吴玉平, 王建华, 杨钊. 基于双天线的高精度 GPS 定位测向系统及其在无人水面艇上的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1330–1332.
WU Yuping, WANG Jianhua, YANG Zhao. High precision GPS system based on double antennas and its application in unmanned surface vessel[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(4): 1330–1332.
- [12] 庞岳峰, 吴小东, 牛攀峰. 测控设备引导跟踪数据插值方法[J]. 电子科技, 2016, 29(11): 118–121.
PANG Yuefeng, WU Xiaodong, NIU Panfeng. Measurement and control equipment tracking data interpolation method[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(11): 118–121.

[作者简介]

- 庞岳峰 1980 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线电测控技术。
霍文杰 1988 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为航天工程。
张彬彬 1979 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信号与信息处理。
马占顺 1994 年生, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为无线电测控技术。

(上接第 35 页)

- [11] KÖLLENSPERGER P A, LARL W J, AHMAD M M, et al. Patterning of platinum (Pt) thin films by chemical wet etching in aqua regia[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22: 067001.
- [12] MILKOVE K R, COFFIN J A, DZIOBKOWSKI C. Effects of argon addition to a platinum dry etch process[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1998, 16(3): 1483–1488.
- [13] MILKOVE K R, WANG C X. Analysis of a fence-free platinum etch process[J]. Integrated Ferroelectrics, 1997, 17: 403–419.
- [14] MAA J S, YING H, ZHANG F Y. Effect of temperature on etch rate of iridium and platinum in CF_4/O_2 [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2001, 19(4): 1312–1314.
- [15] CUNHA M P D, LAD R J, MOOMLIGHT T, et al. High temperature stability of langasite surface acoustic wave devices[C]. Proceedings of 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2008: 205–208.
- [16] RANPURA H M, BUTLER D H, CHANG L H, et al. Aqueous cleaning of sidewall redepositions formed by reactive ion etching of platinum[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1999, 146 (8): 3114–3118.
- [17] QUIRK M, SERDA J. Semiconductor manufacturing technology[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001.

[作者简介]

- 骆伟 1986 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为 RF MEMS 器件及高温 MEMS 传感器等。
郝文昌 1989 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为声表面波质量传感器、温度传感器及压力传感器等。
郭伟龙 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 MEMS 高精度硅谐振压力传感器等。
赵广宏 1984 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 与传感器技术。
尹玉刚 1982 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为超高温 MEMS 压力传感器技术。