

引用格式:陈思,仲启媛,谭立龙,等.基于RFID辅助的车载SINS/OD定位研究[J].电光与控制,2018,25(12):35-39,106. CHEN S, ZHONG Q Y, TAN L L, et al. RFID aided vehicle-mounted SINS/OD positioning[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12):35-39, 106.

基于RFID辅助的车载SINS/OD定位研究

陈思, 仲启媛, 谭立龙, 王鹏, 张彦涛
(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 针对无依托发射作战应用背景下导弹发射车车载定位定向技术存在的问题,提出一种基于射频识别(RFID)辅助的捷联惯导(SINS)/里程计(OD)组合导航的方案。设计了发射车利用RFID进行定位的多种方式,分析了实际使用的相关问题,并将其应用在较为成熟的SINS/OD模式中,建立SINS/OD/RFID模型,进行了行进间辅助定位的方法探究,为车载定位定向发展提供一种新角度新辅助方式。实验结果表明,该方案定位精度达到米级,有效延长满足精度要求的导航时间,提高了使用效能。

关键词: 组合导航; RFID; SINS/OD; 定位修正

中图分类号: V242.625 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.12.008

RFID Aided Vehicle-Mounted SINS/OD Positioning

CHEN Si, ZHONG Qi-yuan, TAN Li-long, WANG Peng, ZHANG Yan-tao
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: To solve the problems in the positioning and orientation technology of the missile launching vehicle in the background of independent emission, a scheme of integrated navigation of SINS/odometer (OD) based on Radio-Frequency Identification (RFID) is presented. A variety of positioning approaches based on RFID for the launching vehicle are designed and the related problems in actual use are analyzed. Then the scheme is applied to the mature SINS/OD mode. The model of SINS/OD/RFID is built, and the approaches to the auxiliary positioning in progressing are explored, which provide a new auxiliary method for the positioning and orientation development of the launching vehicle. The experimental results of this scheme show that, the positioning accuracy can reach the level of meter, which can effectively extend the navigation time meeting the precision requirements, and improve the application performance.

Key words: integrated navigation; RFID; SINS/OD; positioning correction

0 引言

发射车车载定位定向技术是实现导弹无预设阵地机动发射的关键技术,本质是指车载导航系统在发射车行进过程中实时提供精确的经纬度、高程、北向方位角和姿态角等导弹瞄准与发射所需的基本信息^[1]。基于作战应用的车载定位定向系统要求具有自主性、快速性、精确性和抗干扰性。从国内外发展历程上看,捷联惯导系统(SINS)凭借其完全自主性和实用性得到广泛认可,但由于误差随时间累积而不能长时单一使用^[2];最初采用零速修正或地标点停车修正方式^[3]的车载导航因其削弱了车载发射的机动性而不被青睐;

采用SINS/GPS组合导航系统^[4]虽然抑制了误差发散,但GPS信号易受遮挡且技术受制于人,因此不能作战使用,即使采用国产北斗系统来定位也存在卫星信号被干扰等类似问题;采用地图匹配技术^[5]来辅助有一定效果,但存在地图精度要求高、数据处理技术也有较高要求等问题;SINS/里程计(OD)组合导航采用航位推算技术,其自主性好,误差发散得到一定程度抑制,但由于车轮空转、打滑等因素导致长时导航误差较大^[6],也无法解决野外导航系统误差超范围或者出现故障需要重新启动而无法有效快速获取初始地理信息的实际问题。

近年来,物联网技术迅猛发展,带动了射频识别技术(Radio Frequency Identification Devices, RFID)的快速提升与应用。RFID利用射频信号将储存于标签内的信息传送给RFID阅读器,是一种新兴的识别与定位手段,具有构造简单、寿命长、抗恶劣环境、非接触、

收稿日期:2017-12-27

修回日期:2018-01-12

作者简介:陈思(1993—),男,四川乐山人,硕士生,研究方向为车载定位定向技术。

快速、安全、准确、价廉等优势^[7]。RFID 的军事应用可追溯到二战时期,美军将其用于识别盟军飞机,近年来军用射频标签被应用于军事物流、军车定位等领域。结合现阶段普遍采用的 SINS/OD 组合定位定向系统的优势,在发射车作战区域内设置射频定位系统,弥补其不足,辅助车载定位定向,具有可期的前景。

1 RFID 定位系统的设计

1.1 RFID 工作原理

RFID 由标签、阅读器、天线组成:标签存储数字信息,阅读器控制射频模块通过天线发射射频信号,读取对应标签信息,如图 1 所示。RFID 可识别高速运动物体、穿透塑料等材质识别,并可同时识别多个标签^[8]。

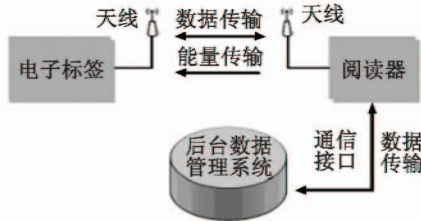


图 1 RFID 工作原理图

Fig.1 RFID working principle

1.2 发射车利用 RFID 定位方案设计

标签分为无源标签和有源标签,鉴于作战实际,采用无源标签并加密处理;阅读器可采用高速阅读器,其识别标签并读取内置信息的时间为 20 ms 左右;识别距离可根据需求调节选用频率,几十米内的识别距离均可选。

1.2.1 方案一

射频标签铺设于车道路面中央,标签内储存该位置的地理信息代码(经纬度、高程等),阅读器安装在发射车底部,车辆通过标签上方时,识别读取并传送到车载计算机,迅速与车载惯性导航系统定位信息进行融合处理。考虑到碾压破坏等问题,可采用凹陷下坑或贴于路面反光路钮内的方法,如图 2 所示。

该方案经多次参数调整、行车实验验证,一旦识别,定位精度能达到 0.5 m 以内,完全满足行进间定位修正要求,而且无需停车,简单易行,快速行车(30 km/h 左右)时单点识别效果最佳。

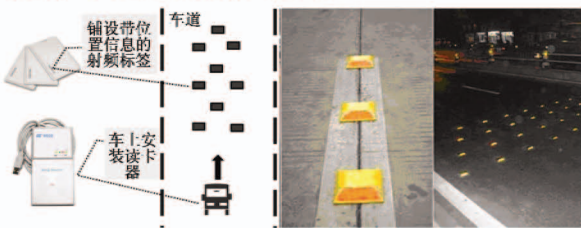


图 2 路面安装射频定位示意图

Fig.2 Driveway installation of RFID positioning devices

1.2.2 方案二

射频标签等距安装在路中隔离带或者路边防护桩上,阅读器安装于发射车左(右)侧与标签同高位置,在行进间读取位置信息,称之为路标定位,如图 3 所示。

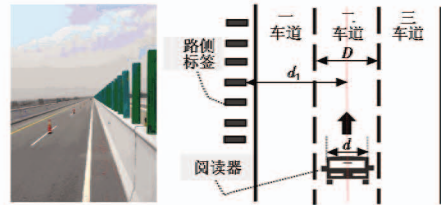


图 3 路侧安装射频定位示意图

Fig.3 Roadside installation of RFID positioning devices

图中: D 为车道宽; d 为发射车宽; d_1 为该标签垂直对应车道中线处距离,标签内存储该标签垂直对应车道中线处位置坐标代码。根据向有特种超宽车辆驾驶经验的驾驶员问卷调查可知,所有被调查人员均表示驾驶车辆保持在单一车道内行驶非常容易,以此为实际可行条件进行定位误差分析。

由图 3 可知,在发射车保持同一车道内行驶的条件下,横向理论定位误差为

$$\delta x = \frac{D-d}{2} \quad (1)$$

纵向误差由识别距离、识别角度和车速共同决定。纵向定位误差示意图见图 4。

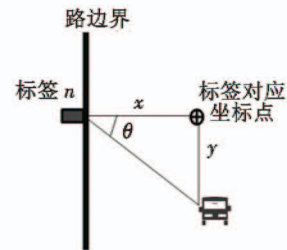


图 4 纵向定位误差示意图

Fig.4 The longitudinal positioning error

图中: x, y 分别为射频卡接收到阅读器发出的射频信号时两者的横向距离和纵向距离; θ 为标签接收到信号时的角度。则纵向误差为

$$\delta y = x \tan \theta - v \cdot t_0 \quad (2)$$

式中: v 为车速; t_0 为射频识别时间。

则定位坐标点概率偏差为

$$\delta r = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2} \quad (3)$$

按国家道路标准,一至四级公路单一行车道宽度均在 3.5 m 左右,例如高速公路车道宽 3.75 m。参照俄罗斯“白杨”系列发射车标准,假设取车宽 3 m、接收信号角 15° ,以车速 40 km/h 行驶在二车道进行分析可得: $\delta x \approx 0.375$ m, $\delta y \approx 1.285$ m,则理论计算精度为 $\delta r = 1.338$ m,可以达到美国军用 GPS 数量级。

在实际工程应用中,通过调整射频识别距离、功率、识别角度,在正常行车速度 20 ~ 50 km/h 情况下可以忽略反应距离,因为实地实验时也无法测量,只需测量识别到标签时车辆实际位置与理论位置之差。在一段废弃高速公路上进行实地实验,标签间隔 10 m,共计 30 个,铺设 300 m 长距离,合理调节配置射频识别参数,实验采用民用斯太尔大货车(宽 2.5 m)分别以 20 km/h, 30 km/h, 50 km/h 进入识别区域,以差分全球定位系统(DGPS)定位数据为参考基准,有效识别率达到 97.7%,所以每组取 24 个实验定位数据分析如表 1 所示。

表 1 不同车速下射频定位偏差

Table 1 Positioning deviation under different speed

组数	车速/(km · h ⁻¹)	平均定位偏差/m
1	20	1.96
2	30	1.65
3	50	2.42

从实验结果来看,RFID 在车辆运动中识别标签时几乎没有丢失,同一参数下,过快或过慢车速均使得误差增大,在该实验条件下,30 km/h 的行车速度定位精度最高。

1.2.3 方案三

在长隧道或者洞库顶壁上安装多个阅读器,识别贴于发射车上方的无源标签,在车辆正常行进中实时定位,并将定位信息通过数据链同步传给车载计算机进行信息融合。根据相关实验表明,该方式下定位精度能达到 0.3 m 以内。相关硬件设施投入较大,但可以与民用 RFID 车辆识别发展思路契合,通过军民融合方式解决隐蔽性和高成本问题。限于篇幅,在此不多阐述此类较复杂方案的原理。

2 车载 SINS/OD 组合导航分析

SINS 具有自主性,是作战时车载定位的首选设备,通过高精度的陀螺和加表进行导航解算,从出发点进行位置、姿态的累积推算^[9],如图 5 所示。

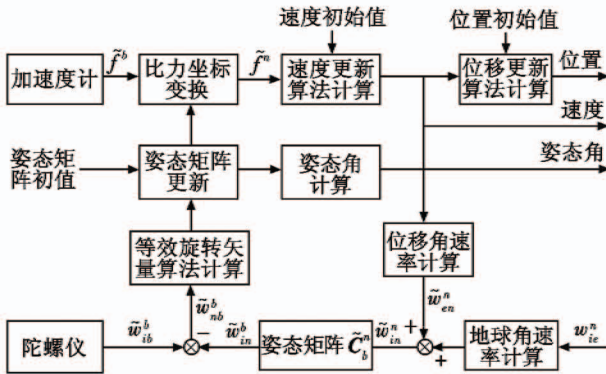


图 5 捷联惯导解算图

Fig.5 The calculating diagram of strapdown inertial navigation

短航时下,SINS 解算精度特别高,但由于常值漂移和随机漂移存在,长航时下,误差不断累积,直至超出误差允许范围,定位数据失去作战使用价值。因此,现阶段在研设备普遍采用高精度里程计(10⁻⁴ m/s)测速来抑制其误差发散,延长了满足战标要求精度下的导航定位时间,达到了较好的效果。

2.1 惯导和里程计误差分析

2.1.1 里程计误差分析

参考系选东-北-天(ENU)地理系作为导航坐标系(*n*系),惯组坐标系与载车坐标系认定重合(*b*系),OD 坐标系(*m*系)为与车体固连的“右-前-上”右手直角坐标系,因此 OD 的理论输出在 *m* 系上可以表示为

$$v_D^m = [0 \quad v_D \quad 0]^T \quad (4)$$

由于里程计刻度系数误差 δK_D 的存在,OD 实际速度输出 \tilde{v}_D^m 变为

$$\tilde{v}_D^m = (1 + \delta K_D)v_D^m = (1 + \delta K_D)[0 \quad v_D \quad 0]^T \quad (5)$$

变换到 *n* 系的过程中,姿态矩阵 C_b^n 的使用又引入了 SINS 该时刻的姿态误差 ϕ ,得到 OD 在 *n* 系下的输出为

$$\tilde{v}_D^n = \tilde{C}_b^n \tilde{v}_D^m = [I - \phi \times] C_b^n (1 + \delta K_D)[0 \quad v_D \quad 0]^T \quad (6)$$

合理舍去 δK_D 和 ϕ 的高阶小量,展开得到

$$\tilde{v}_D^n \approx C_b^n v_D^m + \delta K_D C_b^n v_D^m - (\phi \times) C_b^n v_D^m \quad (7)$$

至此,推导出 OD 的输出速度误差为

$$\delta v_D^n = \tilde{v}_D^n - v_D^n = \delta K_D v_D^n + \phi \times v_D^n \quad (8)$$

2.1.2 SINS 误差

根据文献[10],推导分析小失准角下 SINS 误差模型如下所述。

姿态误差为

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \phi \times w_{in}^n + \delta w_{in}^n - \delta w_{ib}^n = \\ &\phi \times w_{in}^n + M_2 \delta v^n + (M_1 + M_3) \delta p - \epsilon^n \end{aligned} \quad (9)$$

速度误差为

$$\begin{aligned} \delta \dot{v}^n &= -\phi \times f^n + \delta v^n \times (2w_{ie}^n + w_{en}^n) + \\ &v^n \times (2\delta w_{ie}^n + \delta w_{en}^n) + \nabla^n = \\ &-\phi \times f^n + \delta v^n \times (2w_{ie}^n + w_{en}^n) + \\ &v^n \times (2M_1 \delta p + M_2 \delta v^n + M_3 \delta p) + \nabla^n = \\ &-\phi \times f^n + (v^n \times M_2 - (2w_{ie}^n + w_{en}^n) \times) \delta v^n + \\ &v^n \times (2M_1 + M_3) \delta p + \nabla^n = \\ &-\phi \times f^n + M_4 \delta v^n + M_5 \delta p + \nabla^n \end{aligned} \quad (10)$$

位置误差为

$$\delta \dot{p} = M_6 \delta v^n + M_7 \delta p \quad (11)$$

式中:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -w_{ie} \sin L & 0 & 0 \\ w_{ie} \cos L & 0 & 0 \end{bmatrix}; M_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M+h} & 0 \\ \frac{1}{R_N+h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N+h} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{v_N^n}{(R_M+h)^2} \\ 0 & 0 & -\frac{v_E^n}{(R_N+h)^2} \\ \frac{v_E^n \sec^2 L}{R_N+h} & 0 & -\frac{v_E^n \tan L}{(R_N+h)^2} \end{bmatrix}; M_6 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_N+h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{v_N^n}{(R_M+h)^2} \\ \frac{v_E^n \sec L \tan L}{R_M+h} & 0 & -\frac{v_E^n \sec L}{(R_N+h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

2.2 SINS/OD 组合导航模型

在分析误差模型的基础上,建立 SINS/OD 组合导航模型,其原理如图 6 所示。

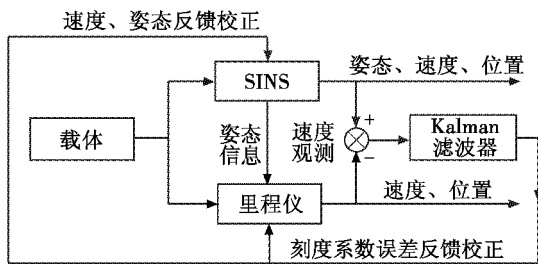


图 6 SINS/OD 组合导航图

Fig. 6 SINS/OD integrated navigation

由以上分析可以看出,里程仪可以抑制纯惯导误差发散,但是由于其解算过程中引用了 C_b^c 和 SINS 形成交叉干扰,再加上本身 δK_D 受胎压、路况等影响,决定了这种组合方式不能无限制地保持较高精度,可以预测长航时下误差将增大。为了延长作战环境下发射车车载定位定向系统的高精度保持性,在作战区域内的发射车必经地域或者潜在行进地域内按上述方案布置 RFID 定位系统,在不停车条件下辅助 SINS/OD 定位,提高发射车野外作战机动能力。

3 RFID 辅助修正 SINS/OD 组合定位模型

3.1 方案设计

如果不考虑作战应用,民用领域对 SINS/OD 系统的最佳修正方式莫过于 GPS、北斗和已知点停车修正。军用领域可以转换思维模式,提出“将卫星定位移到地上,让静态地标活动起来”的思想,利用 RFID 定位方

式弥补战时卫星受损、停车定位限制机动等传统方式的缺陷。

方案设计如下:如图 7 所示,车载 SINS/OD 在作战区内按预定作战计划行进,不必刻意行驶至布置有无源 RFID 标签的区域,而是在经过长航时、定位误差增大时,在行车过程中顺便路过某个 RFID 定位区,辅助修正 SINS/OD,使之降低误差,然后再度续航,投入战斗。

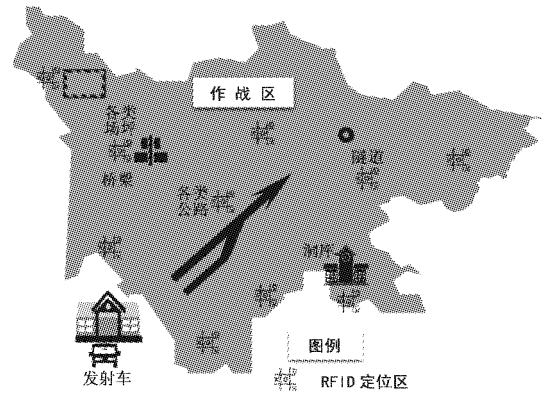


图 7 方案示意图

Fig. 7 The proposed scheme

3.2 SINS/OD/RFID 组合模型建立

3.2.1 系统总体设计

OD 和 RFID 的定位修正都能提供 Kalman 滤波观测值,给予 SINS 状态量两个不同的误差修正量。两者观测精度不同,协方差矩阵存在差异,并且 RFID 定位修正的采样频率远远低于 OD,导致观测输入滤波器具有时间不同步性。采用并行 Kalman 滤波 (PKF) 可以解决该问题。

如图 8 所示,OD 对加表、陀螺和姿态误差的观测性较强,可以同时修正速度、位置、姿态、加表和陀螺; RFID 定位修正点只提供绝对位置坐标,除状态量中的速度、位置以外,其余量可观测性较弱,但是其观测值精度高(0~2 m)。系统内设置断点,当采集到 OD 或 RFID 定位数据时,自动判断选择相应滤波器进行导航修正。其中,SINS 高度通道的发散由车载气压高度计抑制,RFID 定位信息包含经纬度、高程、重力加速度,高程误差几乎为零,直接用于替换解算值。

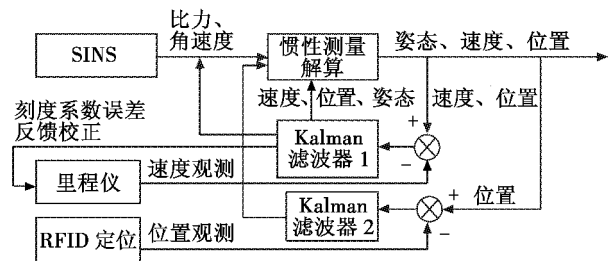


图 8 SINS/OD/RFID 组合导航原理

Fig. 8 SINS/OD/RFID integrated navigation principle

3.2.2 系统状态方程

系统状态量为： $X(t) = [\delta v_E \ \delta v_N \ \phi_E \ \phi_N \ \phi_U \ \delta \lambda \ \delta L \ \nabla_x \ \nabla_y \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \delta K_D]^T$ 。其中： $\delta v_E, \delta v_N$ 为东、北向的速度误差； ϕ_E, ϕ_N, ϕ_U 为姿态失准角； $\delta \lambda, \delta L$ 为 SINS 经纬度误差； $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为陀螺漂移； ∇_x, ∇_y 为加表零偏。

系统状态方程为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t) \quad (12)$$

式中， $W(t)$ 为系统噪声向量是方差为 Q 的零均值白噪声向量。系统状态矩阵为 13×13 的矩阵： $F(t) =$

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & N_1 & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & N_2 & \mathbf{0}_{7 \times 1} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ & \mathbf{0}_{6 \times 7} & & & \alpha \end{bmatrix} \text{。其中各分量如下：}$$

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{v_N^n \tan L}{R_N + h} & 2w_{ie} \sin L + \frac{v_E}{R_N + h} \tan L \\ -2w_{ie} \sin L - \frac{v_E}{R_N + h} \tan L & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -w_{ie} \sin L \\ 0 & w_{ie} \cos L + \frac{v_E^n}{R_N + h} \sec^2 L \end{bmatrix}, N_2 = -C_b^n, F_{31} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} \\ \frac{\sec L}{R_N + h} & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{32} = \mathbf{0}_{2 \times 3}, F_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{v_E^n \tan L \sec L}{R_N + h} \end{bmatrix}, N_1 = \begin{bmatrix} C_{b11}^n & C_{b12}^n \\ C_{b21}^n & C_{b22}^n \end{bmatrix},$$

$$\alpha = \text{diag} \left\{ -\frac{1}{\tau_{GE}}, -\frac{1}{\tau_{GN}}, -\frac{1}{\tau_{AE}}, -\frac{1}{\tau_{AN}}, -\frac{1}{\tau_{AU}}, -\frac{1}{\tau_D} \right\} \text{。}$$

由于航时长，对加表、陀螺仪测量偏差和里程计误差系数模型的描述，采用附加随机一阶马尔可夫过程偏差模式，其反相关时间分别为 $-\frac{1}{\tau_A}, -\frac{1}{\tau_G}, -\frac{1}{\tau_D}$ 。

3.2.3 系统观测方程

SINS/OD 滤波器观测方程为

$$Z_{OD}(t) = H_{OD}(t)X(t) + V_{OD}(t) \quad (13)$$

式中， $V_{OD}(t)$ 是零均值方差为 R_{OD} 的量测噪声向量。

观测量 $Z_{OD}(t)$ 算式为

$$Z_{OD}(t) = \hat{v}^n - \hat{v}_D^n = \delta v^n - v_D^n \times \phi - v_D^n \delta K_D \quad (14)$$

量测矩阵 $H_{OD}(t)$ 展开式为

$$H_{OD}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_{DU}^n & -v_{DN}^n & \mathbf{0}_{1 \times 7} & -v_{DE}^n \\ 0 & 1 & -v_{DU}^n & 0 & v_{DE}^n & \mathbf{0}_{1 \times 7} & -v_{DN}^n \end{bmatrix}$$

SINS/RFID 滤波器量测方程为

$$Z_{RFID}(t) = H_{RFID}(t)X(t) + V_{RFID}(t) \quad (15)$$

$$\text{式中, } Z_{RFID}(t) = \begin{bmatrix} L_{SINS} - L_{RFID} \\ \lambda_{SINS} - \lambda_{RFID} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta L - V_{RFID1} \\ \delta \lambda - V_{RFID2} \end{bmatrix} \text{。}$$

根据上述各 RFID 定位结果分析，观测噪声方差

R_{RFID} 选择为 $R_A = (1.2 \text{ m})^2, R_L = (1.2 \text{ m})^2$ 。

4 车载实验及分析

为了验证 RFID 辅助修正 SINS/OD 长航时组合定位效果，采用某车载定位定向设备进行了一次长达 3.6 h 的跑车实验，行程约 300 km。实验用车载定位定向系统参数如下：SINS 系统误差是：陀螺常值漂移 $0.01 (\text{ }^\circ)/\text{h}$ ，加速度计常值漂移 $10^{-4} g$ ，标定 OD 刻度系数误差是 0.001 31。实验全程模拟实际应用情况，行车路线如图 9 所示。

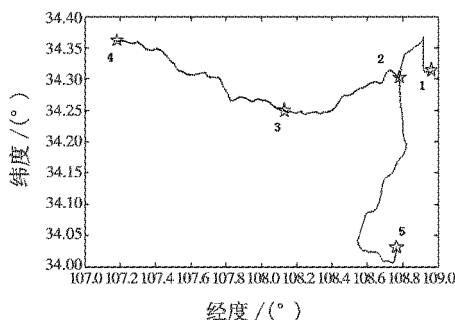


图 9 行车轨迹图

Fig. 9 Driving track

从某火车站 1 点出发，途径 2, 3, 4 点，并在 4 点折返至 4-3-2-5 点，从 2 点开始假定里程仪损坏。长航时（约 1 h）后，在行车过程中随机大间隔引入 RFID 定位，定位偏差合理认定为 1.2 m。行车过程中定位基准由车载 GPS 提供。

SINS/OD 定位偏差如图 10 所示。

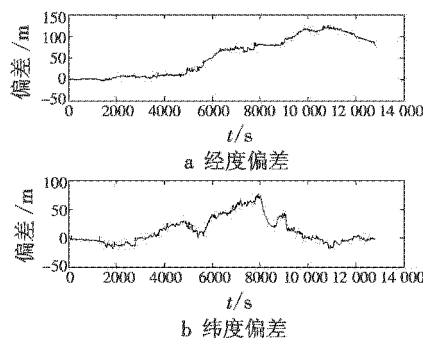


图 10 SINS/OD 定位偏差

Fig. 10 SINS/OD positioning errors

分析图 10 可知，SINS/OD 组合能较长时间保持较高的定位结果。根据高精度定位应用需求，以 20 m 为参考精度要求，那么在该条件下能保持约 1.5 h，之后误差逐渐发散，在模拟里程计损坏后更是达到 100 m 以上的定位误差。

若根据使用情况，模拟车辆分别在 5000 s, 5800 s, 7900 s, 10 000 s 时经过 4 个 RFID 定位区域，获取了修

(下转第 106 页)

方法,避免了反复迭代,简单明了,且相比于极值分布近似方法具有更好的拟合精度;

3) 下一步如何将灰色系统方法应用于多元退化、退化与突发竞争失效等性能退化过程,有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] ZIO E. Reliability engineering: old problems and new challenges [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94: 125-141.
- [2] WU L F, LIU S F, YAO L G, et al. The effect of sample size on the grey system model [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(1): 6577-6583.
- [3] 陈骥群, 赵书强, 马燕峰, 等. 贝叶斯网络法与盲数相结合的配电网可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 112-116.
- [4] 胡美玉, 胡志坚. 多场景技术与盲数相结合的配电系统可靠性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 21-27.
- [5] 杨恒, 徐格宁, 韩子渊. 基于盲数理论的性能退化数据可靠性分析 [J]. 机械强度, 2013, 35(6): 777-782.
- [6] MARKOVIC D, JUKIC D, BENSIC M. Nonlinear weighted least squares estimation of a three-parameter Weibull density with a nonparametric start [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2009, 228(1): 304-312.
- [7] YANG F, YUE Z F. Kernel density estimation of three-parameter Weibull distribution with neural network and genetic algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 247(1): 803-814.
- [8] DENG J L. Proving GM(1, 1) modeling via four data (at least) [J]. Journal of Grey System, 2004, 16(1): 1-4.
- [9] 郑荣跃, 严剑松. 威布尔分布参数估计新方法研究 [J]. 机械强度, 2002, 24(4): 599-601.
- [10] XIE N M, LIU S F. Novel methods on comparing grey numbers [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(2): 415-423.
- [11] HSU L C, WANG C H. Forecasting the output of integrated circuit industry using a grey model improved by the Bayesian analysis [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2007, 74(6): 843-853.
- [12] 钟强晖, 张志华, 吴和声. 基于退化数据的可靠性评估方法探讨 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2280-2284.

(上接第 39 页)

正信息,则结果如图 11 所示。

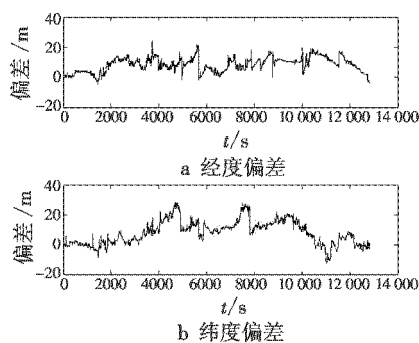


图 11 RFID 辅助修正后的定位偏差

Fig. 11 Positioning errors revised by RFID

由图 11 可知,定位误差大幅减小,误差控制在精度要求范围内,达到米级,有效定位航时延长了一倍多,达 3.6 h 以上。

5 结 束 语

本文从作战应用背景下的现阶段发射车车载定位定向技术存在的问题出发,探讨并提出了应用 RFID 定位修正 SINS/OD 方案。对工程背景下的 RFID 行车定位方式进行设计与验证,得出其定位精度高、易于实现的结论;同时,为解决长航时下 SINS/OD 精度不满足要求的问题,建立 SINS/OD/RFID 模型对其进行了修正改进,并结合解决问题的实际情况,进行一次模拟长

航时跑车实验。实验结果表明,随机 4 次 RFID 定位辅助的 SINS/OD 抑制了误差发散,将满足精度要求的导航时间延长近一倍,提高了发射车在野外无阵地依托时的作战能力,为工程实现提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] 陈思, 仲启媛, 谭立龙, 等. 车载定位定向技术概述 [J]. 飞航导弹, 2017(10): 26-30.
- [2] 蔺博, 汤霞清, 黄湘远. 军用车载定位导航系统发展及应用现状 [J]. 科技展望, 2015(31): 205-206.
- [3] 李瑞涛, 徐胜红, 曹文静. 基于地标信息的车载惯导姿态修正技术 [J]. 海军航空工程学院学报, 2014, 29(4): 315-318.
- [4] WANG J H, GAO Y. GPS-based land vehicle navigation system assisted by a low-cost gyro-free INS using neural network [J]. The Journal of Navigation, 2004, 57(3): 417-428.
- [5] 方伟骏. GPS 与数字地图匹配的组合导航研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [6] 严恭敏. 车载自主定位定向系统研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [7] 唐拥政, 王明辉, 王春风. RFID 技术及应用 [M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2014.
- [8] 彭力. 无线射频识别 (RFID) 技术基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [9] 王凯. 基于联邦卡尔曼滤波的组合定位定向技术研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2012.
- [10] 秦永元. 惯性导航 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014.