

不同惯导系统零速检测算法的性能分析

石 波, 李耀宗, 程 敏, 杨伟彬

(山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 分别使用四种零速检测算法, 检验了不同精度两种惯性导航系统的检测性能, 通过绘制载体速度时间图像、检测的零速折线图以及检测统计量变化曲线图, 分析了车载实验下不同惯导系统相同零速检测算法之间、不同零速检测算法相同惯导系统之间各曲线变化。结果表明, 相同的零速检测算法对性能较好的惯导系统检测的零速时段精度更高; 而对于相同的惯导系统使用不同的零速检测算法, 通过对比广义似然比检测结果和角速度量测能量检测结果发现, 零速检测过程中提供最可靠信息的是陀螺信号。

关键词: 惯性导航系统; 阈值; Neyman-Pearson 准则; 零速检测; 零速折线图

中图分类号: V249.322

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)02-0057-07

Performance Analysis of Different Zero Velocity Detection Algorithms in Inertial Navigation Systems

SHI Bo, LI Yaozong, CHENG Min, YANG Weibin

(College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: This paper discussed the detection performance of four zero-velocity detection algorithms with two sets of Inertial Navigation System (INS) of different precisions. By drawing velocity-time image, zero velocity line chart and statistical quantity curve chart, it analyzed the variation of curves between different inertial navigation systems with the same zero velocity algorithm and between different zero velocity algorithms with the same inertial navigation system. The results show that the zero velocity detection of the same algorithm is more accurate for an INS with better performance, while for a specified INS with different zero velocity detection algorithm, the gyro signal provides the most reliable information in zero velocity detection, as indicated by the comparison between the results of the generalized likelihood ratio test and the angular rate measurement energy test.

Key words: inertial navigation system; threshold; Neyman-Pearson criterion; zero-velocity detection; zero velocity line chart

惯性导航是根据惯性传感器(陀螺仪、加速度计)提供的载体相对于惯性空间的线速度和角速度信息, 来确定载体位置的过程^[1]。不同于其他类型的导航系统, 惯性导航系统是一个完全自主的, 不依赖于任何外部信息的系统, 具有隐蔽性好、精度高、全天候作业、不易被电子干扰的优点, 但同时也具有一些弊端, 最明显的就是导航误差随时间积累问题, 因而长时间工作后会产生不同程度的积累误差, 此误差可以通过与一个或多个辅助传感器组合来使它达到有界, 提高系统性能。相对来讲, 零速修正技术(zero velocity update, ZUPT)是进行误差控制的一种简单而且有效的手段^[2], 是利用载体停止时惯性导航系统的速度输出作为系

收稿日期: 2016-11-06

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAB16B01); 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305034); 车载移动测量系统中传感器间空间关系精密检校方法研究项目(J13LH04)

作者简介: 石 波(1979—), 男, 山东章丘人, 副教授, 博士, 主要从事非线性滤波理论及组合导航定位定姿和移动测量系统多传感器硬件集成控制技术等方面的研究工作. E-mail: boshi_cn@163.com

统速度误差的观测量,进而对其他各项误差进行修正。零速修正算法主要分为两个步骤,即零速检测和零速更新。

目前,零速修正技术在车载以及个人导航等领域都得到了广泛应用,而零速检测算法的运用也不尽相同,根据实际载体、环境等条件选择使用不同的检测算法。就目前算法来讲,主要有广义似然比检测(generalized likelihood ratio test, GLRT)、加速度计测量方差检测(accelerometer measurements variance test, MV)、加速度计测量幅值检测(accelerometer measurements magnitude test, MAG)、角速度测量能量检测^[3](angular rate measurement energy test, ARE)、对磁场强度设定阈值的检测算法^[4]、压力传感器检测算法^[5]、摄像机检测算法^[6]等。

基于 OpenShoe 项目^[7]中使用的 GLRT、MV、MAG、ARE 四种检测算法,针对两种不同精度的惯导系统进行跑车实验,陈述这四种零速检测算法的理论基础,并对分析四种检测算法的性能。

1 零速检测算法

零速检测,顾名思义就是检测系统速度为零的时段,为零速修正做前期准备。通过把检测到的零速时段作为系统速度误差的外部量测信息,对系统的各项误差进行控制校正,提高系统定位精度。

零速检测可以理解为一个二元信号的统计检测,信源在某一时刻会输出两种不同信号状态之一,人们事先并不知道信源在这一时刻输出的是哪种信号,因而需要做出判决。为了分析方便,通常把信源的输出称为假设,在此记为假设 H_0 和假设 H_1 ,并定义假设 H_0 状态时有信号输出,载体处于运动状态; H_1 状态时无信号,载体是静止的^[8]。

根据 Neyman-Pearson 准则^[9],即在错误判决概率 $P(H_1 | H_0) = \alpha$ 的约束条件下,使正确判决概率 $P(H_1 | H_1)$ 最大的准则。通常来说,错误判决概率 $P(H_1 | H_0)$ 是虚警概率 P_F ,而正确判决概率 $P(H_1 | H_1)$ 是检测概率 P_D 。

惯性测量单元由陀螺仪和加速度计组成,实验时安装在车顶部,其中陀螺仪输出载体坐标系下的角速率信息,加速度计提供载体坐标系中比力的测量值。这样一来,可以定义惯性测量单元的输出矢量为 x_k ,

$$x_k = \begin{bmatrix} \alpha_k \\ \omega_k \end{bmatrix}. \quad (1)$$

α_k 为 k 时刻加速度计输出的比力信息, ω_k 为 k 时刻陀螺输出的角速率。设采样数为 W , n 时刻到 $n+W-1$ 时刻的观测量^[10]为 $z_n^a \triangleq \{y_k^a\}_{k=n}^{n+W-1}$ 和 $z_n^\omega \triangleq \{\omega_k^\omega\}_{k=n}^{n+W-1}$ 。根据假设检验理论,在 $T(z_n^a, z_n^\omega) < \gamma$ 的条件下,惯导系统是处于静止状态的。其中, $T(z_n^a, z_n^\omega)$ 是检测器的统计量, γ 是检测器的阈值。常用的零速检测方法 GLRT、MV、MAG、ARE 的统计量表达式如下^[11]。

1) 广义似然比检测(GLRT)

$$T(z_n^a, z_n^\omega) = \frac{1}{W} \sum_{k=n}^{n+W-1} \frac{1}{\sigma_a^2} \|y_k^a - g \frac{\bar{y}_n^a}{\|y_n^a\|}\|^2 + \frac{1}{\sigma_\omega^2} \|\bar{y}_n^\omega\|^2. \quad (2)$$

2) 加速度计测量方差检测(MV)

$$T(z_n^a, z_n^\omega) = \frac{1}{\sigma_a^2 W} \sum_{k=n}^{n+W-1} \|y_k^a - \bar{y}_n^a\|^2. \quad (3)$$

3) 加速度计测量幅值检测(MAG)

$$T(z_n^a, z_n^\omega) = \frac{1}{\sigma_a^2 W} \sum_{k=n}^{n+W-1} (\|y_k^a\| - g)^2. \quad (4)$$

4) 角速度测量能量检测(ARE)

$$T(z_n^a, z_n^\omega) = \frac{1}{\sigma_\omega^2 W} \sum_{k=n}^{n+W-1} \|\omega_k^\omega\|^2. \quad (5)$$

其中, σ_a^2 和 σ_ω^2 分别是加速度计和陀螺测量噪声的方差; $\|a\|^2 = a^T a$; $(\cdot)^T$ 表示转置; \bar{y}_n^a 表示样本平均值,即

$$\bar{y}_n^a = \frac{1}{W} \sum_{k=n}^{n+W-1} y_k^a \quad (6)$$

2 零速检测实验

2.1 实验系统介绍

实验中使用两种不同精度惯导系统,实验区域道路比较平坦,相邻历元高程变化较小。第一种系统是 NovAtel 公司的 SPAN-LCI 惯性测量单元^[12];另一种是英国 OxTS(Oxford Technical Solutions)公司生产的 Inertial+ 惯性导航系统,是使用了 MEMS 陀螺仪和高精度加速度计的低成本惯导系统^[13]。

2.2 惯性器件性能参数

惯性器件光纤惯导 SPAN-LCI 和 MEMS 惯导 Inertial+ 的主要性能指标如表 1 所示。

2.3 车载实验分析

为了验证零速检测算法的效果,对光纤惯导 SPAN-LCI 和 MEMS 惯导 Inertial+ 分别进行多次车载实验,组合导航系统安装在车顶部,与车固联,每次实验时间为一两个小时不等,实验后根据三种曲线图(速度时间曲线、统计量时间曲线、检测算法折线图)分别对两种惯导系统的四种检测算法性能进行对比分析。下面首先对实验中涉及到的三种曲线图做出解释。

1) 速度时间曲线图

其中速度是通过 Inertial Explorer 软件对惯导数据和 GPS 数据进行紧组合,导出每一个时间更新点的三向速度,再经过 MATLAB 软件计算并绘制每个时间更新点的三向合速度,此时比 GPS 输出的速度要更准确。

合速度计算流程框图如图 1 所示。

2) 统计量时间曲线图

由公式(2~5)计算各种检测算法的统计量,绘制每个时间点的统计量时间图像,根据统计量时间曲线和已知某段时间载体运动与静止状态找出最佳阈值。

3) 检测算法折线图

通过判断统计量 T 与阈值 γ 的大小关系,绘制四种检测算法的折线图。折线图中折线值为 0,表示阈值大于统计量,载体处于静止状态;而折线值为 5 时,认为载体存在速度。

2.4 实验对比及讨论

分别对两种惯导系统下的四种检测算法进行对比研究:

1) SPAN-LCI

实验中分别绘制每种算法的整体图和部分时间段局部图,具体如图 2~5 所示,分别为 SPAN-LCI 惯导系统紧组合的速度时间曲线和 GLRT、ARE、MAG、MV 四种检测算法检测的零速折线图。在实验开始和结束阶段分别进行十分钟左右的初始对准,四种算法对这两个零速时段均能准确检测出来。每幅图中均绘制一段时间的局部图,放大 124 000 到 125 500 时间段 1 500 s 的载体组合速度时间曲线和各检测算法的折线图,由局部图可以清楚看出,检测出的折线值 0 或 5 跟实际组合速度基本吻合,虽然偶尔出现局部不吻合,但对于 200 Hz 数据率频繁变化的速度来说,检测的准确率已经较高,可达 98% 以上。

表 1 惯性器件主要性能指标

Tab. 1 Main performance index of inertial device

惯导类型 仪器参数	LCI	Inertial+
	加速度计零偏/mg	<1
加速度计标定因数/ppm	250	1 000
陀螺零偏	0.3°/h	0.01°/s
陀螺标定因数/ppm	100	1 000
角速度随机游走/(°/√hr)	<0.05	0.2
采样率/Hz	200	100

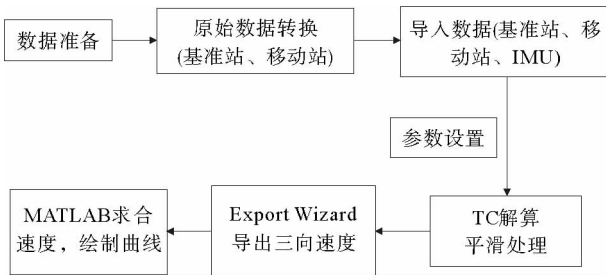


图 1 合速度计算流程框图

Fig. 1 Flow chart of the calculation of coupled-velocity

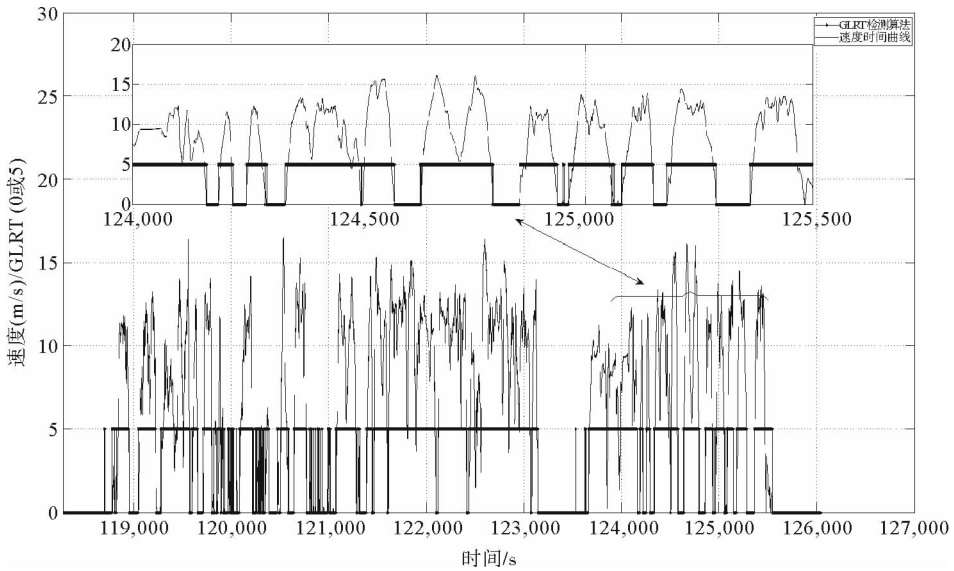


图 2 紧组合速度与 GLRT 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 2 Tightly-coupled velocity curve compared with GLRT detection of zero velocity line chart

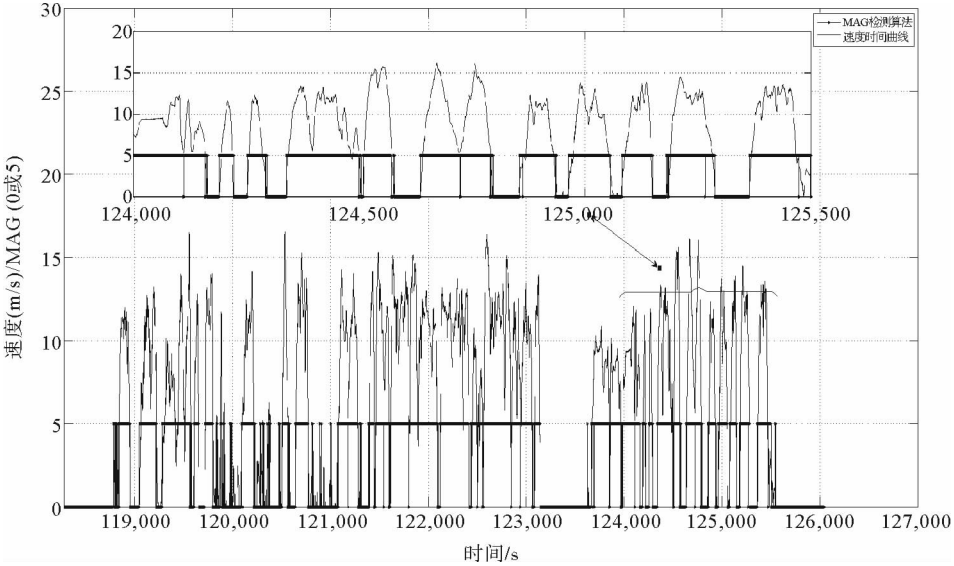


图 3 紧组合速度与 MAG 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 3 Tightly-coupled velocity curve compared with MAG detection of zero velocity line chart

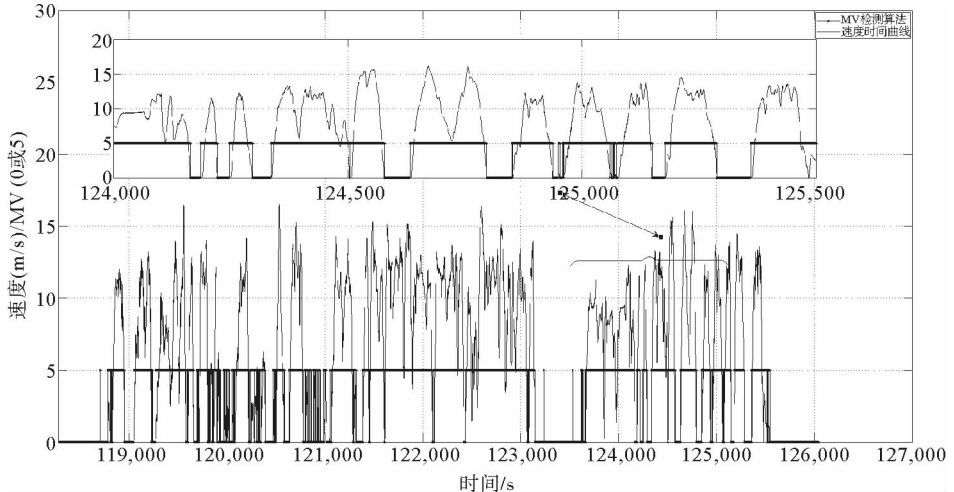


图 4 紧组合速度与 MV 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 4 Tightly-coupled velocity curve compared with MV detection of zero velocity line chart

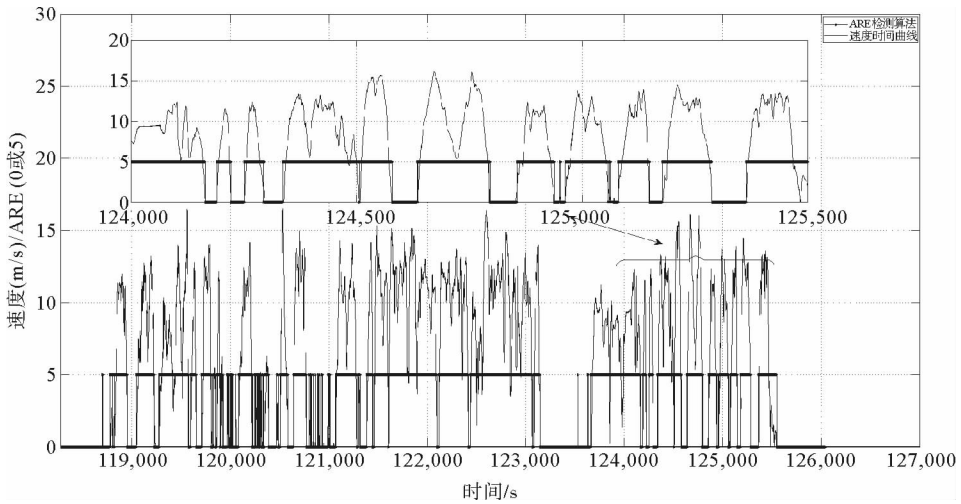


图 5 紧组合速度与 ARE 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 5 Tightly-coupled velocity curve compared with ARE detection of zero velocity line chart

表 2 为 SPAN-LCI 惯导系统的四种检测算法的阈值和采样数设置。实验中 GLRT 算法和 ARE 算法的阈值基本相同,而且折线图也很相近。由公式可知, GLRT 算法受角速度和加速度信息的影响,而 ARE 仅受陀螺信息的影响,在采样数和阈值相同情况下,两者检测结果大致相同。可以看出,检测算法中角速率起到了主要作用,也就是陀螺信号为零速检测提供了最可靠的信息。ARE 算法可以看成 GLRT 算法的一种特殊情况,即 $\sigma_a^2/\sigma_\omega^2 \rightarrow \infty$ 。

表 2 SPAN-LCI 惯导系统各检测算法设置

Tab. 2 Detection algorithm settings of SPAN-LCI system

检测算法	W(Samples)	γ (Threshold)
GLRT	500	1×10^9
ARE	500	1×10^9
MV	500	1.5×10^5
MAG	500	1.5×10^5

就精度来讲, MV 和 MAG 算法主要受加速度信息的影响,检测精度较 GLRT 和 ARE 算法低;计算量方面,四种算法中 GLRT 算法的计算量最大;应用范围方面, ARE 算法仅依赖于角速率信息,在一些受加速度信息影响较大的情况, ARE 算法可能无法工作或者会有较差的检测精度。因此,就这种情况而言, GLRT 要优于 ARE 算法,适用的范围更广。

2) Inertial+

如图 6~9 所示,分别绘制 Inertial+ 惯导下四种算法的零速检测与实际紧组合的速度对比结果。表 3

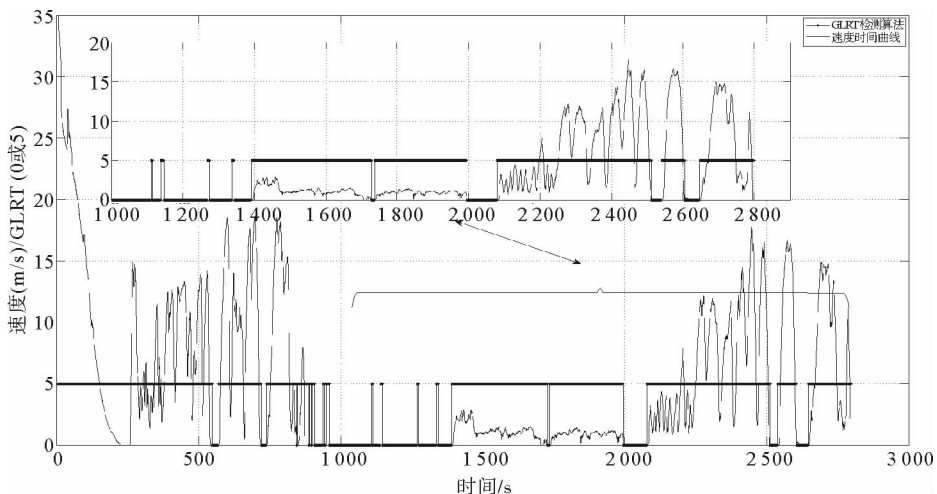


图 6 紧组合速度与 GLRT 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 6 Tightly-coupled velocity curve compared with GLRT detection of zero velocity line chart

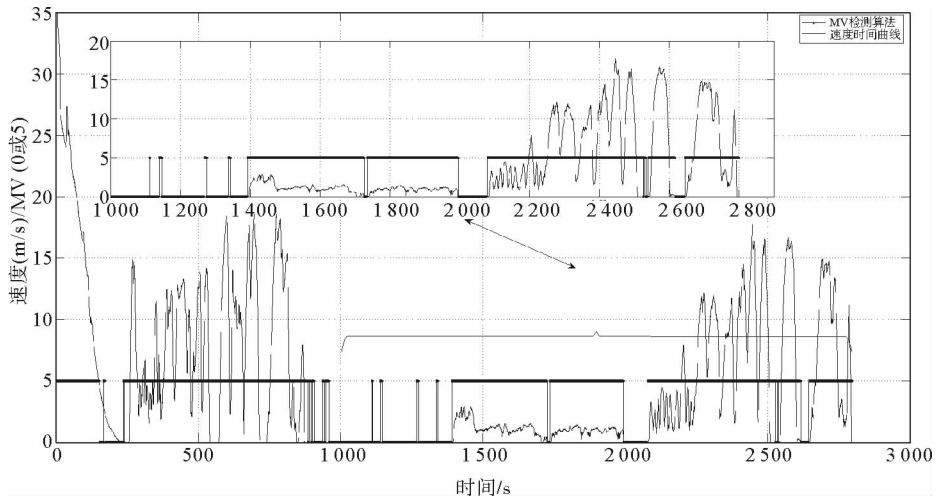


图 7 紧组合速度与 MV 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 7 Tightly-coupled velocity curve compared with MV detection of zero velocity line chart

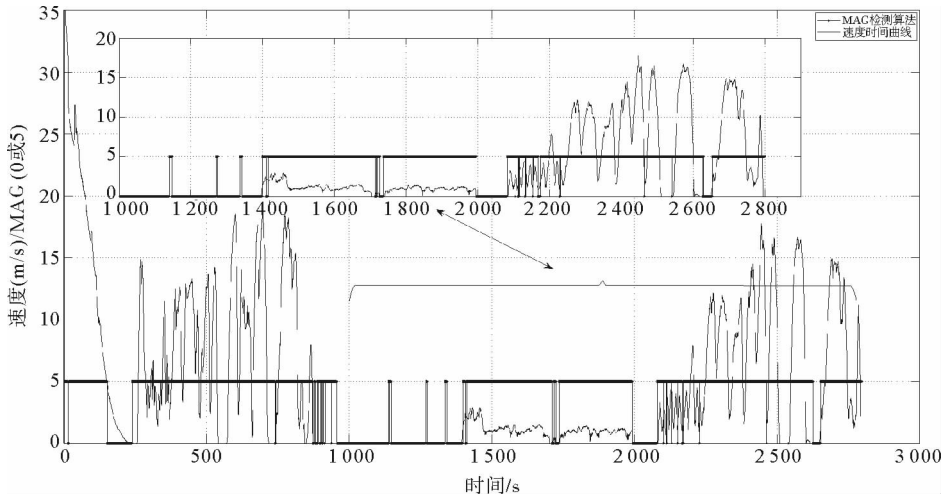


图 8 紧组合速度与 MAG 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 8 Tightly-coupled velocity curve compared with MAG detection of zero velocity line chart

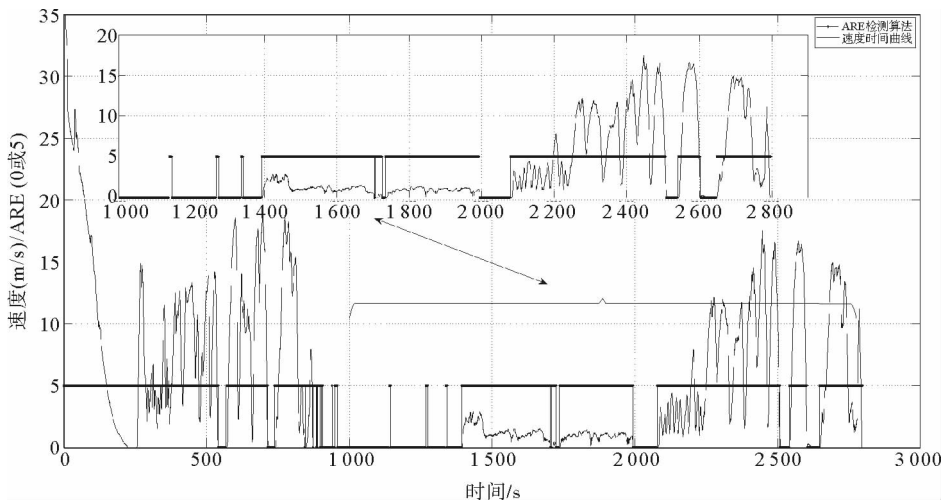


图 9 紧组合速度与 ARE 算法检测零速折线图结果对比

Fig. 9 Tightly-coupled velocity curve compared with ARE detection of zero velocity line chart

为惯导系统的四种检测算法的阈值和采样数设置。实验中放大了 1 000 s 到 2 800 s 的曲线图,相对来说, GLRT 算法和 ARE 算法检测精度较高,能够达到 96%以上,但 MV 和 MAG 算法检测精度较差,可能是由于它们主要依赖于加速度信息的缘故。

总的来说,Inertial+要比 LCI 惯导系统的检测精度低,应该是由于 Inertial+属于 MEMS 惯导,LCI 是光纤惯导系统,Inertial+的陀螺和加速度计精度本来就比 LCI 的低,LCI 惯导能更精确敏感到此时的角速率和加速度信息。

3 结束语

根据实测数据处理和上述讨论结果,可得出以下结论。

1) 实验中对两种惯导系统的四种检测算法的零速检测折线图与组合速度时间图像进行了对比,设置速度的阈值为 0.1 m/s。各曲线对比图说明零速检测折线图能基本反映载体的真实运动信息,检测算法比较合理,两曲线图的匹配度较高。

2) 实验中阈值的选取很重要,阈值选得越大,速度的误判率就越高;相反,漏判率就越高。阈值的选取可以参考统计时间图像,将某些时间的特殊运动情况作为条件,限制阈值的选取范围,更有利于阈值的选择。

3) 实验中,相同的惯导系统、采样数和阈值相同时, GLRT 和 ARE 算法绘制的曲线图基本相同。GLRT 和 ARE 算法要比 MV 和 MAG 算法检测精度高一些。由检测公式可以看出, MV 和 MAG 主要影响因素是加速度计, GLRT 受陀螺和加速度计信息的影响, ARE 仅受陀螺信息影响,因此可推断陀螺信号在检测中起主导作用。ARE 算法是 GLRT 算法 $\sigma_a^2/\sigma_w^2 \rightarrow \infty$ 时的特殊情况。

4) 不同精度的惯导系统使用相同检测算法情况下,检测精度随惯导系统的精度升高而提升。

参考文献:

[1]张天光,王秀萍,王丽霞. 捷联惯性导航技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007:1-3.

[2]高钟毓,王进,董景新,等. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. 中国惯性技术学报,1995,3(2):24-29.
GAO Zhongyu, WANG Jin, DONG Jingxin, et al. Several estimation methods for zero speed correction of inertial measurement system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1995, 3(2): 24-29.

[3]杨辉. 基于 MEMS 传感器的高精度行人导航算法研究[D]. 厦门:厦门大学,2014:27-28.

[4]JIMENEZ A R, SECO F, PRIETO C, et al. A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU[C]//IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, Budapest, Hungary, 2009:37-42.

[5]HARLE R, TAHERIAN S, PIAS M, et al. Towards real-time profiling of sprints using wearable pressure sensors[J]. Computer Communications, 2012, 35(6): 650-660.

[6]AUBECK F, ISERT C, GUSENBAUER D. Camera based step detection on mobile phones[C]//Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Guimarães, Portugal, 2011:1-7.

[7]NILSSON J O, SKOG I, HANDEL P, et al. Foot-mounted INS for everybody: An open source embedded foot-mounted INS [C]//Position Location & Navigation Symposium. Myrtle Beach, South Carolina, 2012:140-145.

[8]赵树杰,赵建勋. 信号检测与估计理论[M]. 北京:清华大学出版社,2005:65-74.

[9]KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing, Vol. II: Detection theory[M]. Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998:60-65.

[10]SKOG I, HANDEL P, NILSSON J O, et al. Zero-velocity detection: An algorithm evaluation[J]. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on Bionedical Engineering, 2010, 57(11): 2657-2666.

[11]SKOG I, NILSSON J O, HANDEL P. Evaluation of zero-velocity detectors for foot-mounted inertial navigation systems [C]//Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Guimarães, Portugal, 2010:1-6.

[12]NOVATEL. SPAN on OEM6 User Manual[EB/OL]. (2015-01-28) [2016-03-20] <http://www.novatel.com/support/search/items/Manual>.

[13]OXTS. Inertial+ User Manual[EB/OL]. (2012-09-28) [2016-03-20] <http://www.oxts.com/products/inertialplus/#tab4>.

表 3 Inertial+惯导系统各检测算法

Tab. 3 Detection algorithm settings of Inertial+ system

检测算法	W(Samples)	γ (threshold)
GLRT	500	1.5×10^7
ARE	500	1.5×10^7
MV	500	0.4×10^7
MAG	500	0.2×10^7