doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.001

农机 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合方法*

张　京[1]　陈　度[2]　王书茂[1]　禹振军[3]　伟利国[4]　贾　全[4]

(1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室，北京 100083；
3. 北京市农业机械试验鉴定推广站，北京 100079；4. 中国农业机械化科学研究院，北京 100083)

摘要：为解决农机自动导航系统在田间作业过程中因防风树林等对卫星信号产生遮挡与干扰，导致其难以准确获取航向信息等问题，采用惯性导航系统(INS)和全球导航卫星系统(GNSS)航向信息融合方法进行了试验与研究，结合自适应卡尔曼滤波算法构建了综合滤波模型，提出了一种以 GNSS 信号品质与航向角变化幅度信息为指导的 INS/GNSS 航向信息融合策略，通过仿真试验以及实际应用测试对航向信息融合效果进行了验证。试验结果表明：以双天线 GNSS 航向角测量值作为参考基准，在直线行驶过程中，融合航向数据的平均绝对误差为 -0.02°，标准差为 0.50°；在转向行驶过程中，融合航向数据的平均绝对误差为 0.62°，标准差为 2.42°；融合后的航向输出结果明显提升了单独使用 INS 或 GNSS 时航向数据的精度，且在滤除 GNSS 航向角测量噪声的同时提高了 GNSS 航向角解算值的更新速率。该航向角融合算法能够增强农业机械自动导航系统航向角测定的准确性，可为导航系统实际田间作业情况下的抗环境扰动能力提供服务。

关键词：农业机械　惯性导航系统　全球导航卫星系统　航向角　信息融合

中图分类号：TP274.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2015)S0-0001-07

Research of INS/GNSS Heading Information Fusion Method for Agricultural Machinery Automatic Navigation System

Zhang Jing[1]　Chen Du[2]　Wang Shumao[1]　Yu Zhenjun[3]　Wei Liguo[4]　Jia Quan[4]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Laboratory of Modern Agricultural Equipment Optimization Design*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Beijing Agricultural Machinery Experiment Appraisal Popularize Station*, *Beijing* 100079, *China*
4. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In the field operation of agricultural machinery automatic navigation system, the windbreak trees of field edge will have strong disturbance to the satellite signal. Because of the requirement of accuracy for agricultural machinery navigation and the general automatic navigation system has poor resistance to environmental interference, the algorithm of heading information fusion was studied based on the integrated navigation system of INS/GNSS. This algorithm adopted adaptive Kalman filter to reduced the noise with the measurement of heading data for single antenna GNSS and obtained the error estimation of heading data by using compensated Kalman filter. According to the quality of GNSS signal and the heading angle gradient, it could also reasonably allocate the weights of different fusion data by the calculation of federated filter. The results of simulation experiment and actual application test showed that: taking the heading measured value of double antenna GNSS as the reference data, the average absolute error of fusion heading data was -0.02° and the standard deviation was 0.50° in the process of linear driving. In the process of steering driving, the average absolute error of fusion heading data was

收稿日期：2015-10-28　修回日期：2015-11-12

*北京市科技计划资助项目(D151100003715001)、土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题资助项目(2014-SKL-01)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102303)

作者简介：张京，博士生，主要从事农业智能化检测与控制技术研究，E-mail：cathy64882584@163.com

通讯作者：陈度，工程师，博士，主要从事机电一体化及测控技术研究，E-mail：tchendu@cau.edu.cn

0.62° and the standard deviation was 2.42°. The accuracy of heading output after fusion had an obvious improvement when compared with using INS or GNSS separately. The noise of heading measured value of GNSS was filtered from the output of fusion heading and the update rate of GNSS calculated value was increased at the same time. The algorithm of heading information fusion could enhance the accuracy of the automatic navigation system for agricultural machinery and give full play to the advantages of the INS/GNSS integrated navigation system.

Key words: Agricultural machinery Inertial navigation system Global navigation satellite system Heading angle Information fusion

引言

在农业机械(简称农机)自动导航系统田间作业过程中,田边防风树林对卫星信号的遮挡干扰较强,因此如何提高自动导航系统航向信息的测量精度与可靠性是解决农机自动导航路径跟踪精度的关键问题之一[1]。由于农机自动导航实际应用精度与其他行业相比有更高的要求,虽然采用全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)代替 GPS 能够增强一定的抗环境扰动能力,但依然不能完全解决因环境因素变化而导致航向信息测量精度降低或定位失效等问题[2]。因此,基于多传感器信息融合技术的惯性导航系统(Inertial navigation system,INS)/GNSS 组合导航系统成为国内外自动导航系统的重点研究方向之一。Liu 等[3]研究了两步平滑卡尔曼滤波算法在 INS/GPS 组合导航系统中的应用,与标准卡尔曼滤波相比,该算法在 GPS 信号受到影响时具有更高的位置测量精度;Fakharian 等[4]综合应用惯性测量单元与 GPS 进行导航,并采用一种自适应卡尔曼滤波算法进行位置信息融合,得到了更准确的路径跟踪效果;周建军等[5]基于 GPS/DR(Dead reckoning)组合导航系统对模糊自适应卡尔曼滤波算法进行研究,并在改装农机上对该算法进行验证,与单独 GPS 相比具有更高的定位精度。但目前大部分的组合导航系统主要是针对位置以及速度信息进行融合,针对航向角测量的融合方法相对较少,且仿真试验研究较多,缺乏面向实际应用的研究[6]。另外,部分航向信息融合算法计算量较大,融合效率较低,难以直接应用于农业机械的实时导航控制过程中[7]。因此,深入研究农机自动导航技术中航向信息的高效融合方法,对于提升中国农机自动导航水平具有重要的理论意义与应用价值。

本文针对复杂农田环境下农业机械自动导航系统中航向角测量的鲁棒性较低、GNSS 信号不稳定以及 INS 误差易随时间累积增加等问题,在应用 INS/GNSS 组合导航系统的基础上,结合自适应卡尔曼滤波器构建综合滤波模型,提出一种以 GNSS 信号品质与航向角变化幅度信息为指导的航向信息融合策略,并根据仿真试验以及 INS/GNSS 组合导航系统的实测数据验证航向信息融合结果的准确性。

1 材料和方法

1.1 导航系统组成及信息融合策略

在 INS/GNSS 组合导航系统有关航向角信息的数据采集与融合中,GNSS 采用美国 Trimble 公司生产的 BD982 型双频双天线 GNSS 接收机设备,该设备同时支持北斗导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)、GPS、GLONASS 以及伽利略导航系统(Galileo satellite navigation system, GIOVE)等多种导航平台[8]。其中,双天线可分别将信息传递给处理器,对移动 RTK 基线进行解算,基线长 2 m 情况下航向角的测量精度为 0.09°,最高定位数据输出率可达 50 Hz。采用包含双天线功能的 GNSS,其主要目的是为航向角的测量提供一个有效的参考基准,从而验证 INS 与单天线 GNSS 进行融合计算后所得到的结果是否准确。INS 选用基于 MEMS(Micro-electro-mechanical system)技术的 ET-AHRS 型三维运动姿态测量模块,该模块同时包含陀螺仪、加速度计和电子罗盘等多个运动传感器,静态航向角测量精度约为 0.2°,最大数据输出率为 100 Hz。

本文选择 GNSS 与 INS 协同进行航向角测量的主要优势在于:当 GNSS 卫星覆盖情况良好、差分时间正常且 RTK 固定解精度满足要求时,可充分发挥 GNSS 的作用,限制 INS 随时间漂移的误差;若 GNSS 处于启动或定位失效后再次捕获等状态时,INS 可辅助其缩小搜索空间,降低计算量,实现航向角的快速获取;组合导航系统采用 GNSS 校正后的 INS 数据作为输出,该输出的数据率是 GNSS 单独工作时输出数据率的 2~5 倍[9]。

本文主要侧重于对 INS/GNSS 组合导航系统所得到的航向角数据进行融合,所运用的融合算法主要包括自适应卡尔曼滤波器和补偿卡尔曼滤波器,

并结合 GNSS 信号品质与航向角的变化幅度信息指导航向融合策略，其具体融合方法如图 1 所示。

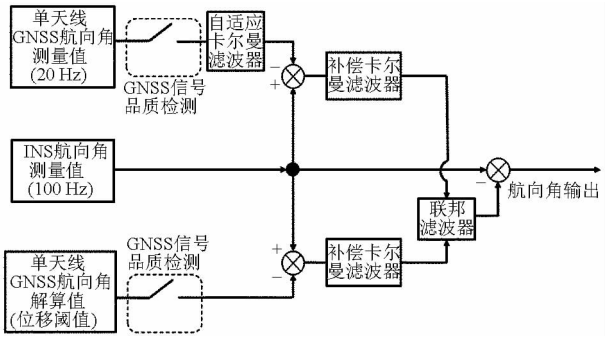

图 1　INS/GNSS 组合导航系统融合算法结构框图

Fig. 1　Block diagram of INS/GNSS integrated navigation system fusion algorithm

由图 1 可知，将 INS/GNSS 组合导航系统主要分为 3 部分，分别为 INS 航向角测量值、单天线 GNSS 航向角测量值和已给定位移阈值的单天线 GNSS 航向角解算值。其中，若目标达到所设定的位移阈值时，则根据上一时刻位置与当前位置在大地坐标系下的连线计算得到 GNSS 的航向角解算值，且位移阈值越大，所解算出的航向角就越精确，但相对航向的数据更新率就越低[10]。自适应卡尔曼滤波器主要应用于单天线 GNSS 航向角测量值的滤波过程，可根据航向的变化幅度自主调整新息序列，从而达到良好的滤波效果[11]。而补偿卡尔曼滤波器则主要用于融合不同的航向数据，输出误差估计值从而对 INS 航向角测量值进行校正。联邦滤波器综合利用 GNSS 信号品质以及航向角的变化幅度等指标，取全局误差估计值为 2 部分补偿卡尔曼滤波器输出值的加权和，即

$$X_{\mathrm{sum}} = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \tag{1}$$

其中　$\beta_1 + \beta_2 = 1$

式中　X_{sum}——全局误差估计值

X_1——单天线 GNSS 航向角测量值与 INS 航向数据的融合结果

X_2——单天线 GNSS 航向角解算值与 INS 航向数据的融合结果

β_1、β_2——可调系数

设 GNSS 信号品质相同时，令

$$\beta_1 = k\Delta\theta$$

式中　k——比例系数

$\Delta\theta$——航向角融合值的变化率

若航向角变化幅度较大，则 β_1 权重增大，反之则 β_2 权重增大。采用联邦滤波器输出的综合误差估计值对 INS 航向数据进行修正后即可得到该融合算法的航向角输出结果。另外，GNSS 信号品质检测主要包含 GNSS 卫星覆盖情况、与基站信号差分时间以及 RTK 固定解精度 3 方面[12]，只有当 3 方面都满足要求时，组合导航系统才会将 INS 与 GNSS 的信息进行融合，否则只会根据上一次误差估计值的结果进行修正。

1.2　自适应卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法是目前导航系统信息融合技术中应用最为广泛的一种，它的特点主要是能够根据状态方程的信息从有关的量测方程中提取最优估计值，从而与一般滤波方法产生本质的区别。本文采用自适应卡尔曼滤波算法对单天线 GNSS 的航向角测量值进行滤波，这是因为大部分农业机械在田间作业时的行走速度较低，导致 GNSS 直接得到的航向角测量值本身具有较大的随机噪声，难以应用于实际的导航控制任务当中。此外，当农业机械出现转弯等较大航向变化时，常规卡尔曼滤波器的信号跟踪效果不是十分理想，不能满足实时导航的需求，而自适应的卡尔曼滤波算法则能够有效地改善这种情况。

针对导航系统航向角的测量应用，自适应卡尔曼滤波算法在寻求信号最优平滑轨迹的同时还能够保证较强的突变信号跟踪能力[13]。对于线性离散系统模型，设 t_k 时刻的被估计状态 $\boldsymbol{X}_k$ 受系统噪声序列 $\boldsymbol{W}_{k-1}$ 驱动，其状态方程与量测方程为

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{X}_{k-1} + \boldsymbol{W}_{k-1} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{Z}_k = \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{V}_k \tag{3}$$

$$\mathrm{Cov}[\boldsymbol{W}_k, \boldsymbol{W}_j] = \boldsymbol{Q}_k\delta_{kj} \qquad \mathrm{Cov}[\boldsymbol{V}_k, \boldsymbol{V}_j] = \boldsymbol{R}_k\delta_{kj}$$

式中　$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$——$t_{k-1}$ 时刻至 t_k 时刻的状态转移矩阵

$\boldsymbol{H}_k$——量测阵

$\boldsymbol{Z}_k$——系统量测量序列

$\boldsymbol{W}_k$、$\boldsymbol{V}_k$——相互独立的高斯白噪声序列

$\boldsymbol{Q}_k$——系统噪声序列的对称非负定方差阵

$\boldsymbol{R}_k$——量测噪声序列的对称正定方差阵

δ_{kj}——Kronecker-δ 函数

根据以上方程，自适应卡尔曼滤波算法可描述为

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\hat{\boldsymbol{X}}_{k-1} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1} = \boldsymbol{\lambda}_k\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{k-1} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_k^{-1} \tag{6}$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}_k = \hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} + \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{d}_k \tag{7}$$

$$\boldsymbol{P}_k = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}_k)\boldsymbol{P}_{k|k-1} \tag{8}$$

在式(6)与式(7)中，设新息序列为 $\boldsymbol{d}_k$，新息序列方差阵[14]，即滤波器残差方差阵的理论估计值为 $\boldsymbol{M}_k$，则有

$$\boldsymbol{d}_k = \boldsymbol{Z}_k - \boldsymbol{H}_k\hat{\boldsymbol{X}}_{k|k-1} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{M}_k = \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_{k|k-1}\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_k \tag{10}$$

与标准卡尔曼滤波相比，该自适应卡尔曼滤波

算法在式(5)中加入了自适应遗忘因子 $\boldsymbol{\lambda}_k$,其目的在于减小滤波器中陈旧测量值的权重,并增大新测量值的权重,从而扼制滤波发散,同时使其具有较强的信号突变跟踪能力[15]。为了更好确定 $\boldsymbol{\lambda}_k$,令其为

$$\boldsymbol{\lambda}_k = \mathrm{diag}[\lambda_{1k}, \lambda_{2k}, \cdots, \lambda_{nk}] \tag{11}$$

其中

$$\lambda_{ik} = \begin{cases} E_k & (E_k > 1) \\ 1 & (E_k \leqslant 1) \end{cases} \tag{12}$$

$$E_k = \frac{\mathrm{Tr}[\alpha A_{rk} - \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{Q}_{k-1} \boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{R}_k]}{\mathrm{Tr}[\boldsymbol{H}_k \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \boldsymbol{P}_{k-1} \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}]} \tag{13}$$

式中 A_{rk}——该滤波器残差方差阵的实测估计值

A_{rk}的最佳估计可表示为

$$A_{rk} = \frac{1}{N} \sum_{i=i_0}^{k} \boldsymbol{d}_i \boldsymbol{d}_k^{\mathrm{T}} \quad (i_0 = k - N + 1) \tag{14}$$

式中 N——最新的残差向量数,可由先验知识来确定[16]

$\boldsymbol{d}_k \boldsymbol{d}_k^{\mathrm{T}}$——新息序列的平方和

可以看出,当信号状态发生突变时,滤波器残差方差阵的实测值 A_{rk}增大,从而导致 $\boldsymbol{\lambda}_k$也随之增加,使滤波器充分利用新测量值,并实现其自适应的变化能力。

此外,在实际应用过程中,自适应卡尔曼滤波器的调整速度往往不能满足要求,导致滤波输出不能及时跟上实际信号的变化,因此在式(13)中令 A_{rk}乘以加权系数 α,并根据实际残差与理论残差估计值的状态进行确定

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 & (\boldsymbol{d}_k \boldsymbol{d}_k^{\mathrm{T}} > \rho \mathrm{Tr}[\boldsymbol{M}_k]) \\ 1 & (\boldsymbol{d}_k \boldsymbol{d}_k^{\mathrm{T}} \leqslant \rho \mathrm{Tr}[\boldsymbol{M}_k]) \end{cases} \tag{15}$$

式中 α_0——由先验知识确定的参数

ρ——可调系数

若滤波器的实际残差超过理论值的 ρ 倍,则增加 $\boldsymbol{\lambda}_k$的变化幅度,使其更快适应当前信号变化,防止滤波发散,若没有超过理论值的 ρ 倍,则保持当前的工作状态。

1.3 补偿卡尔曼滤波器设计

补偿卡尔曼滤波器的设计理念主要是为了融合 INS 与 GNSS 的航向角测量值,充分发挥 2 种导航系统的组合优势,从而进一步提高航向数据的输出精度。在组合导航系统中,有关卡尔曼滤波器设计的方法主要有直接法与间接法。直接法直接以导航参数作为估计对象,计算量较大且各个状态量的数量级相差较多,一般适用于变化较为缓慢的数据信息融合技术,因此本文选用间接法对补偿卡尔曼滤波器进行设计。

补偿卡尔曼滤波器根据 INS/GNSS 组合导航系统的误差量建立状态方程,若设 ϕ 为 INS 输出航向角数据的估计值,则 $\delta\phi$ 为该估计值的误差,且可以得到

$$\delta\dot{\phi} = -\frac{1}{\tau_G}\delta\phi + \varepsilon \tag{16}$$

式中 ε——INS 的漂移

τ_G——滤波器时间常数

而 ε 又可被分解为低频、高频和随机常数 3 个分量[17]

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_b + \omega_\varepsilon \tag{17}$$

式中 ε_M、ε_b、ω_ε分别可用一阶马尔可夫过程、随机常数和白噪声近似描述[18],即

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_b = 0 \\ \dot{\varepsilon}_M = -\dfrac{1}{\tau_M}\varepsilon_M + \omega_M \end{cases} \tag{18}$$

式中 τ_M——相关时间 ω_M——驱动白噪声

ω_M 方差强度可以表示为

$$Q_{\omega_M} = \frac{2\sigma^2}{\tau_M} \tag{19}$$

式中 σ 与 τ_M的数值可根据 INS 的具体情况而定。

综合上述误差分析,选择组合导航系统航向角输出的状态向量为

$$\boldsymbol{X}_{ZH} = [\delta\phi \quad \varepsilon_b \quad \varepsilon_M]^{\mathrm{T}} \tag{20}$$

根据式(20)可建立补偿卡尔曼滤波器的状态方程为

$$\dot{\boldsymbol{X}}_{ZH} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{X}_{ZH} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{W} \tag{21}$$

其中

$$\boldsymbol{W} = [\omega_\varepsilon \quad \varepsilon_M]^{\mathrm{T}} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{\tau_G} & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dfrac{1}{\tau_M} \end{bmatrix} \tag{24}$$

通过判断给定航向角与偏航角状态,可以选择采用单天线 GNSS 直接输出的航向角或单天线 GNSS 根据位移阈值解算得到的航向角 2 种方式之一对 INS 的航向信息进行校正。将 INS 输出的航向数据与 GNSS 的相应航向数据相减形成的量测量为

$$Z = \phi - \phi_{GNSS} = \delta\phi - \delta\phi_{GNSS} + \boldsymbol{V} \tag{25}$$

式中 ϕ_{GNSS}——单天线 GNSS 测量的航向数据

$\delta\phi_{GNSS}$——单天线 GNSS 的测量误差

$\boldsymbol{V}$——系统量测噪声

因此量测方程为

$$\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{X}_{ZH} + \boldsymbol{V} \tag{26}$$

式中量测矩阵 $\boldsymbol{H}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{H}=[1\quad 0\quad 0] \tag{27}$$

当每次 GNSS 航向数据更新时，补偿卡尔曼滤波器即可得到一个估计值，采用该估计值对 INS 输出的航向数据进行修正，当 GNSS 航向数据未更新时，该滤波器维持上一次的估计值不变直到再次获得新的 GNSS 航向数据，通过这种方式在实现 INS 与 GNSS 信息相互融合的基础上还提高了导航系统航向数据的更新速率。

2　试验与结果分析

在上述计算方法的基础上，设计了相关验证试验，首先依据单天线 GNSS 航向角测量数据的输出方式构造了系统量测量，通过仿真试验对自适应卡尔曼滤波算法的滤波效果进行测试，并在此基础上结合导航系统的实际航向角测量结果，应用补偿卡尔曼滤波器进行信息融合效果试验，从而更加清晰明确地对 INS/GNSS 航向信息融合的结果进行分析。

2.1　自适应卡尔曼滤波器仿真试验

为了验证 1.2 节中自适应卡尔曼滤波算法的有效性，同时结合本文 INS/GNSS 组合导航系统航向信息融合算法的需求，设计了相应的仿真试验，根据单天线 GNSS 实际航向角测量值输出特点构造了系统量测量，具体仿真初始条件为：给定航向角由 90°开始增加，至 115°后保持不变；单天线 GNSS 量测噪声 $\boldsymbol{V}_G$ 均值为 0，方差为 2°；系统驱动噪声 $\boldsymbol{W}_G$ 为高斯白噪声，方差为 0.01°；转移矩阵 $\boldsymbol{\phi}_G=1$，量测矩阵 $\boldsymbol{H}_G=1$，估计误差方差阵 $\boldsymbol{P}_{G1}=1$，$\boldsymbol{X}_{G1}=90°$。另外，自适应卡尔曼滤波算法中，$\alpha_0=3$，$\rho=2$，$\boldsymbol{\lambda}_k$ 由计算确定。

该仿真试验时长 600 s，采样时间为 1 s，为了对比标准卡尔曼滤波与本文自适应卡尔曼滤波之间的差异，分别采用 2 种方法同时对单天线 GNSS 仿真航向角测量值进行滤波，仿真试验共进行 30 组，每组数据之间差异较小，说明算法具有较高稳定性，其中 1 组如图 2 所示。

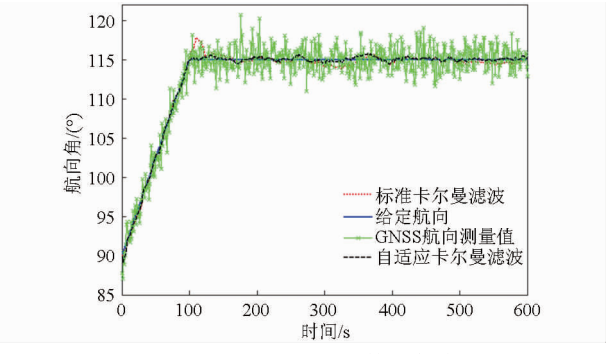

图 2　自适应卡尔曼滤波算法仿真结果

Fig. 2　Simulation results of adaptive Kalman filter algorithm

仿真试验结果表明：2 种滤波算法对于单天线 GNSS 航向角测量值中稳态随机干扰信号的滤波效果都较为理想，然而当 100 s 左右航向发生突变时，标准卡尔曼滤波则出现了较大的估计误差，同样情况下自适应卡尔曼滤波则具有较强的突变信号跟踪能力，能根据航向数据的变化幅度自适应调整 $\boldsymbol{\lambda}_k$ 大小，使滤波器在面对较大航向变化幅度时也能保证较高的精度。

2.2　INS/GNSS 航向信息融合效果试验

对 INS/GNSS 航向信息融合算法进行了实际应用测试，试验在北京市昌平区小王庄农机试验基地进行。补偿卡尔曼滤波器的初始状态为：取航向角估计误差 $\delta\phi=0$；随机常数 $\varepsilon_b=0.1(°)/s$；系统噪声 ω_ε 与 ω_M 的方差均为 0.01(°)/s；时间常数 $\tau_G=\tau_M=1$ s。单天线 GNSS 航向数据更新率为 20 Hz，INS 航向数据更新率为 100 Hz。令拖拉机以 6.4 km/h 的速度从 A 点至 B 点按照图 3 轨迹行驶，并同时采集航向数据。

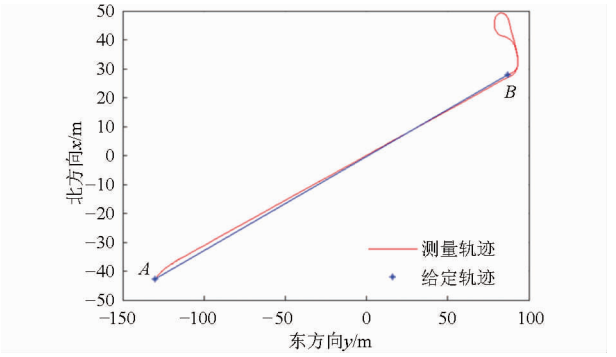

图 3　拖拉机行驶轨迹

Fig. 3　Driving trajectory of tractor

为了能够更加深入分析航向信息融合算法的实际应用效果，将 INS/GNSS 组合导航系统的实际航向角测量输出分为 4 部分：① 双天线 GNSS 航向角，将 GNSS 的 2 个天线分别安装于拖拉机的车头和车尾，且处于同一水平线上，使基线长 2 m，双天线联合对航向进行测量，为融合后的航向数据提供参考基准，精度可达 0.09°。② GNSS 航向角测量值，由单天线 GNSS 直接输出的航向角测量值。③ GNSS 航向角解算值，位移阈值为 2 m 时 GNSS 通过位置信息解算出的航向数据。④ INS 航向角，由三维运动姿态测量模块综合求解出的航向信息。此外，在该试验中，GNSS 的航向数据都是建立在已将 WGS-84 坐标系投影到大地坐标系下进行输出的[19]。令融合后的航向数据与以上 4 部分航向数据相互对比，从而判断航向信息融合算法的正确性。该试验共进行了 200 s 的航向数据采集，在直线行驶阶段采用 GNSS 航向角解算值进行融合计算，转向行驶阶段则采用 GNSS 航向角测量值进行融合，为了清

晰地体现各航向数据间的相互关系,图 4、图 5 分别取 50 ~ 140 s、155 ~ 175 s 的数据进行分析。

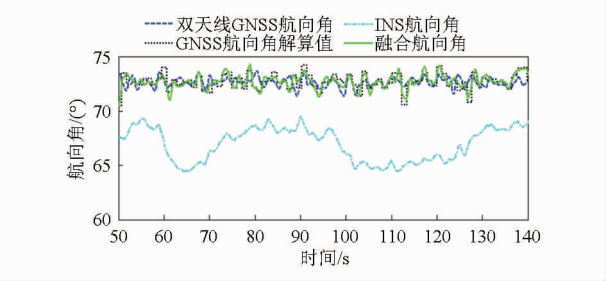

图 4 直线行驶条件下航向数据融合结果

Fig. 4 Fusion results of heading data in straight driving

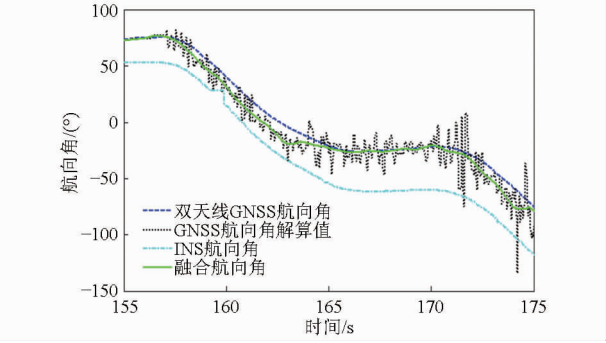

图 5 转向行驶条件下航向数据融合结果

Fig. 5 Fusion results of heading data in steering driving

由图 4 可知,虽然处于直线行驶状态下,但在实际操作过程中控制系统会不断对航向角进行调整[20],因此采用双天线 GNSS 输出的航向数据作为参照基准,分别计算其它航向数据与其的差值,从而得到各航向数据的误差。其中,在直线行驶条件下,各航向数据的误差如表 1 所示。

表 1 直线行驶条件下各航向数据误差

Tab. 1 Error of each heading data in straight driving

(°)

指标	INS 航向角	GNSS 航向角解算值	融合航向角
平均绝对误差	3.21	-0.01	-0.02
标准差	2.99	0.61	0.50

图 4 中,在直线行驶条件下,采用本文中的航向信息融合算法所得到的航向数据与双天线 GNSS 的航向数据基本吻合,且融合航向的数据更新率与 GNSS 航向角解算值的数据更新率相比有明显提升。结合表 1 可得,以双天线 GNSS 航向角作为基准,融合航向数据的平均绝对误差为 -0.02°,标准差为 0.50°,而单独使用 INS 测量航向角时,其平均绝对误差为 3.21°,标准差为 2.99°。该结果表明:本文中的航向信息融合算法提升了 GNSS 航向角解算值的数据更新速率,且同时提高了 INS 航向数据的精度,充分体现了 INS/GNSS 组合导航系统的优势。

由图 5 可知,在转向行驶条件下,由于 GNSS 航向角解算值可能出现较大误差,且航向变化幅度较大,因此联邦滤波器调整权值分配比例,使 GNSS 航向测量值的权重增加,所以图 5 中主要显示 GNSS 航向测量值的结果。可以看出,融合后的航向数据与双天线 GNSS 航向角较为相似,明显提高了 INS 航向数据的测量精度,且同时滤除了 GNSS 航向角测量值的噪声。

由表 2 可得,以双天线 GNSS 航向作为基准,在转向行驶条件下,融合航向数据的平均绝对误差为 0.62°,标准差为 2.42°,而 GNSS 航向角测量值的标准差为 4.22°。该结果表明:在转向行驶条件下,本文中的融合航向数据精度亦高于单独使用 INS 或 GNSS 时的航向数据精度,且该融合算法具有较强的航向变化适应能力。

表 2 转向行驶条件下各航向数据误差

Tab. 2 Error of each heading data in steering driving

(°)

指标	INS 航向角	GNSS 航向角测量值	融合航向角
平均绝对误差	3.58	0.63	0.62
标准差	10.64	4.22	2.42

本文中融合后航向数据的精度主要依赖于 GNSS 信号的品质以及农业机械的行驶方式,若发生 RTK 固定解精度不够或接收卫星个数少于 6 个等情况,则会对融合后的航向数据精度产生较大影响。

3 结论

(1)针对农业机械导航精度要求较高、一般自动导航系统抗环境干扰能力较差等问题,研究了基于 INS/GNSS 组合导航系统的航向信息融合算法,采用自适应卡尔曼滤波器减少了单天线 GNSS 航向测量数据的噪声,通过补偿卡尔曼滤波器得到航向数据误差估计值,并以 GNSS 信号品质与航向角变化幅度信息为指导,根据联邦滤波器对不同融合数据的权重进行合理分配,实现了 INS 与 GNSS 航向测量信息的相互融合功能。

(2)通过仿真试验以及 INS/GNSS 的实际应用试验,对该航向信息融合算法的正确性与融合效果进行了验证。试验结果表明:以双天线 GNSS 的航向角测量值作为参考基准,在直线行驶条件下,融合后航向数据的平均绝对误差为 -0.02°,标准差为 0.50°,在提高了 INS 航向测量数据精度的同时增加了 GNSS 航向角解算值的更新速率;在转向行驶过程中,融合航向数据的平均绝对误差为 0.62°,标准差为 2.42°,比 GNSS 航向角测量值的

标准差小 1 倍左右，且明显提高了 INS 航向测量数据的精度。该航向融合算法针对航向的变化具有自适应能力，且能够充分发挥 INS/GNSS 组合导航系统的优势。

参 考 文 献

1 胡静涛，高雷，白晓平，等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报，2015，31(10)：1－10.
Hu Jingtao, Gao Lei, Bai Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1－10. (in Chinese)

2 姬长英，周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报，2014，45(9)：44－54.
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44－54. (in Chinese)

3 Liu H, Nassar S, Naser E S. Two-filter smoothing for accurate INS/GPS land-vehicle navigation in urban centers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4256－4267.

4 Fakharian A, Thomas G, Mehrfam M. Adaptive Kalman filtering based navigation: an IMU/GPS integration approach[C]// 2011 International Conference on Networking, Sensing and Control, 2011: 181－185.

5 周建军，王秀，张睿，等. 农机车载 GPS 和 DR 组合导航系统定位方法[J]. 农业机械学报，2012，43(10)：262－265.
Zhou Jianjun, Wang Xiu, Zhang Rui, et al. GPS/DR integrated navigation positioning method for agriculture machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 262－265. (in Chinese)

6 陈威，郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题[J]. 农业工程学报，2013，29(22)：196－205.
Chen Wei, Guo Shupu. Current situation and existing problems of agricultural informatization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 196－205. (in Chinese)

7 English A, Ross P, Ball D, et al. Vision based guidance for robot navigation in agriculture[C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation(ICRA), 2014: 1693－1698.

8 Robati J, Navid H, Rezaei M, et al. Automatic guidance of an agricultural tractor along with the side shift control of the attached row crop cultivator[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2012, 2(1): 151－158.

9 李茗萱，张漫，孟庆宽，等. 基于扫描滤波的农机具视觉导航基准线快速检测方法[J]. 农业工程学报，2013，29(1)：41－47.
Li Mingxuan, Zhang Man, Meng Qingkuan, et al. Rapid detection of navigation baseline for farm machinery based on scan-filer algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 41－47. (in Chinese)

10 Samuel C, Tang L, Abplanalp P. GPS-guided modular design mobile robot platform for agriculture applications[C]// 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology, Wellington, 2013: 806－810.

11 高雷，胡静涛，白晓平，等. 面向精准农业应用的农机自动导航控制系统研究[C]//2010 广播技术与多媒体通信国际会议，2010：315－322.
Gao Lei, Hu Jingtao, Bai Xiaoping, et al. Agro-machinery automatic navigation control system study for precision agriculture applications[C]// 2010 International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication, Chongqing, China, 2010: 315－322. (in Chinese)

12 赵颖，陈兵旗，王书茂，等. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报，2006，37(4)：83－86.
Zhao Ying, Chen Bingqi, Wang Shumao, et al. Fast detection of furrows based on machine vision on autonomous mobile robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 83－86. (in Chinese)

13 蒋窍，李杰，刘俊，等. 基于单片机的 GPS/MEMS 陀螺仪航向角实时测量系统[J]. 传感技术学报，2011，24(6)：919－922.
Jiang Qiao, Li Jie, Liu Jun, et al. GPS and MEMS gyroscope real-time heading angle measurement system based on SCM[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(6): 919－922. (in Chinese)

14 卞鸿巍，金志华，王俊璞，等. 组合导航系统新息自适应卡尔曼滤波算法[J]. 上海交通大学学报，2006，40(6)：1000－1009.
Bian Hongwei, Jin Zhihua, Wang Junpu, et al. The innovation-based estimation adaptive Kalman filter algorithm for INS/GPS integrated navigation system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(6): 1000－1009. (in Chinese)

15 吴富梅，杨元喜. 一种两步自适应抗差 Kalman 滤波在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 测绘学报，2010，39(5)：522－533.
Wu Fumei, Yang Yuanxi. A new two-step adaptive robust Kalman filtering in GPS/INS integrated navigation system[J]. Acta Geodaettca, 2010, 39(5): 522－533. (in Chinese)

16 李文，李清东，李亮，等. 基于模糊自适应卡尔曼滤波的大气数据辅助姿态算法[J]. 航空学报，2015，36(4)：1267－1274.
Li Wen, Li Qingdong, Li Liang, et al. Air date assisted attitude algorithm based on fuzzy adaptive Kalman filter[J]. Acta Aeronautica, 2015, 36(4): 1267－1274. (in Chinese)

17 孙永荣，胡应东，刘建，等. 车载导航系统中航向信息融合技术研究[J]. 数据采集与处理，2010，25(2)：239－244.
Sun Yongrong, Hu Yingdong, Liu Jian, et al. Heading information fusion technology for vehicle navigation system[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2010, 25(2): 239－244. (in Chinese)

18 周建军，张漫，汪懋华，等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报，2009，40(4)：151－156.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151－156. (in Chinese)

19 Bell T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1－2): 53－66.

20 伟利国，张权，颜华，等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报，2011，42(7)：186－190.
Wei Liguo, Zhang Quan, Yan Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186－190. (in Chinese)