

# 基于卡尔曼滤波融合算法的播深检测装置设计

樊立萍, 马建军

(沈阳化工大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

**摘要:**针对免耕播种机工作时秸秆残茬影响播深检测有效性的问题,设计了一种采用了双路面阵雷达传感器和卡尔曼滤波融合算法的播种深度测量装置。面阵雷达利用渡越时间法测量播种深度,然后使用卡尔曼滤波融合算法消除两路传感器数据中的噪声与杂波,并将处理后数据进行融合。试验表明,在预设播深为 60 mm,播种机行驶速度分别为低速(4 km/h)、中速(6 km/h)、高速(8 km/h)三种速度时,传感器测量距离的最大偏差为 23 mm,34 mm,37 mm,经过滤波处理后误差为 4 mm,7 mm,13 mm,再经过卡尔曼滤波融合算法后能够在预设播深 60 mm 上下范围浮动,试验表明经过滤波融合后的检测数据比单个面阵雷达传感器更能准确地检测播种深度,且随着速度的增加波动范围也相应增大。原因可能与车速增长时播种机在不平整地面上的波动增大有关。

**关键词:**播深检测装置;免耕播种机;面阵雷达;卡尔曼滤波融合算法

中图分类号:TP335

文章编号:1000-0682(2024)04-0007-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.002

## Design on broadcast depth detection device based on Kalman filter fusion algorithm

FAN Liping, MA Jianjun

(Department of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Liaoning Shenyang 110142, China)

**Abstract:** A seeding depth measurement device using dual road array radar sensors and Kalman filtering fusion algorithm was designed to address the issue of straw residue affecting the effectiveness of seeding depth detection during the operation of a no-till planter. The surface array radar uses the transit time method to measure the sowing depth, and then uses the Kalman filter fusion algorithm to eliminate noise and clutter in the two-sensor data, and fuses the processed data. Experiments have shown that when the preset sowing depth is 60 mm and the driving speed of the seeder is low speed (4 km/h), medium speed (6 km/h), and high speed (8 km/h), the maximum deviation of the sensor measurement distance is 23 mm, 34 mm, and 37 mm. After filtering, the errors are 4 mm, 7 mm, and 13 mm. After being fused with the Kalman filtering algorithm, it can float within the range of the preset sowing depth of 60 mm. The experiment shows that the detection data after filtering fusion can more accurately detect the sowing depth than a single array radar sensor, and the fluctuation range also increases with the increase of speed. The reason may be related to the increased fluctuation of the seeder on uneven ground when the vehicle speed increases.

**Keywords:** broadcasting depth detection device; no-till planter; area array radar; Kalman filter fusion algorithm

## 0 引言

播种深度是农作物播种时一项重要的技术指标。以免耕播种机为例,在地表有大量秸秆残茬的环境作业时,致使地面平整度较差,因此播深稳定性容易受到较大影响<sup>[1]</sup>。但播深稳定性作为播种作业的一项关键指标,可以直接反应出免耕播种机的

收稿日期:2024-03-06

基金项目:辽宁省科学技术计划项目——保护性耕作农机装备研发(2022JH1/10400017)

第一作者:樊立萍(1965—),女,山东淄博人,工学博士,教授,主要从事复杂过程控制的研究。E-mail: flpsd@163.com

性能优劣。同时,播深的一致性能否得到有效保证,关系到精密播种的实现效果,播种深度是否适宜且深度一致性会影响到农作物幼苗生长情况以及粮食产量<sup>[2]</sup>。

播深检测起初多用手工测量,但手工测量耗时耗力、效率低下且不能连续测量。随着农业生产智能化和机械化的到来,各类传感器应用于播深检测。国内外对于播种深度检测的设计研究分为接触式和非接触式两大类,接触式测量是通过仿形机构间关系间接得到播种深度,非接触式测量是通过传感器测得播种深度。在目前主流的非接触式测量播深中,付彦涛等<sup>[3]</sup>通过采用拉线式位移传感器检测仿行轮与机架之间的相对位移,以解决播种深度测量的困难和即时性的问题;蒋啸虎等<sup>[4]</sup>设采用超声波传感器进行数据采集,用三角测距法对红外超声波传感器数据进行测量,最终得到耕深数据;Iqbal T 等<sup>[5]</sup>采用超声波传感器、微控制器设计了一款播深检测系统,系统读取高度差为参考值,将播深数据存储在 SD 卡中。目前播深检测装置通常采用单一传感器进行测量,容易受地表起伏、秸秆残茬、土块及传感器精度等因素,会使传感器在接收返回信号的过程中可能出现偏差,从而影响检测精度。倾角传感器则易受地形和拖拉机悬挂结构的影响,当几何关系发生变化时需要进行重新标定,通用性较弱。

为提高测量精度、减少外界环境干扰对播种深度的影响,该文采用面阵雷达传感器,设计了一款采用两路面阵雷达传感器播种机播深检测装置,该传感器具有高精度、高分辨率、不易受到自然光的干扰等优势。并使用卡尔曼滤波算法将面阵雷达传感器检测的数据进行滤波融合。

## 1 播深检测装置设计

### 1.1 播深检测传感器选定

传感器是测量数据的关键部件。近年来伴随着电子技术的蓬勃发展,如红外传感器、超声波传感器、面阵雷达传感器等快速发展。由于播种时土壤环境复杂,地表残茬覆盖致使超声波传感器、红外传感器在接收回波信号时存在误差,导致播深检测数据不准确,倾角传感器和编码器不便在其他机具上直接使用。该文播深检测装置采用基于 ToF(飞行时间)的 P8864 - SMD - B15 型面阵激光雷达传感器,它相较于超声波传感器和红外传感器有更高的精度和分辨率,不容易受到环境光的干扰,并且能够提供三维点云数据,对环境建模和障碍物检测有明

显的优势<sup>[6]</sup>。传感器参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数

参数	参数范围
准确度	$\pm 2 \text{ mm}$
室内测量范围	60 m
户外测量范围	35 m
尺寸	50 mm × 26 mm × 13 mm
重量	9 g
电压	DC 2.5 V ~ 3.3 V

P8864 - SMD - B15 型面阵激光雷达传感器工作原理如图 1 所示,微型测距模组的 ToF 传感器区域发射激光束,再进行反射和时间测量,然后生成  $N$  行  $\times N$  列高分辨率的三维点云地图。

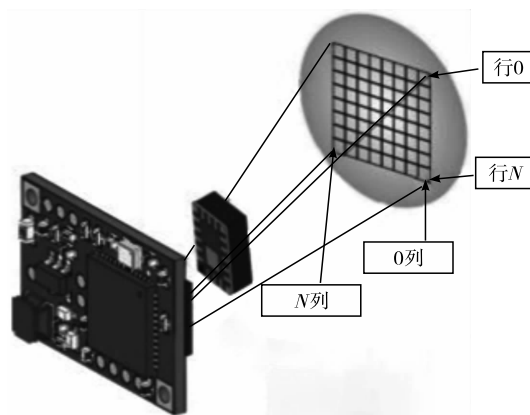


图 1 面阵激光雷达测距原理图

ToF 测距是一种常用的距离测量技术,有直接式脉冲调制和间接式连续波调制两种方式。该文采用直接式脉冲调制,通过发射激光窄脉冲向目标发送信号,并测量回波的时间间隔  $\Delta t$ 。传感器接收到回波后,利用时间数字转换器对脉冲时间间隔进行精确量化,乘以光速  $c$  即可得到目标与传感器之间的实际距离:

$$l = \frac{c \times \Delta t}{2} \quad (1)$$

### 1.2 播深检测原理

播种机播深大多通过调节限深轮的位置变化来控制播种深度,但在免耕地面会覆盖许多杂草和秸秆,在播种作业过程中,秸秆残茬和杂草等会对限深轮的高度产生一定影响,导致其调节的播种深度不准确。该文在限深轮中心轴上设置一块矩形踏板,并在播种机机体上安装面阵雷达传感器。通过监测面阵雷达传感器与矩形踏板之间的距离变化,可以间接获取播种深度变化值,从而有效排除杂草、秸秆等外部因素的干扰。限深轮上的面阵雷达传感器采用间接测量方式,通过测量传感器与矩形板之间距

离变化间接计算播种深度,其测量原理如图2所示。

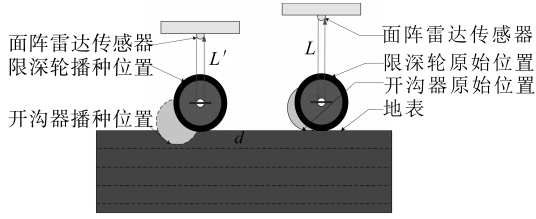


图2 播种深度测量原理示意图

面阵雷达传感器设置在播种机机架上,该机架与开沟器集成在一起。随着开沟器深入地下,面阵雷达传感器相应下降。限深轮始终紧贴地面运动,因此,面阵雷达传感器与限深轮上矩形板之间的距离变化反映了播种深度。图2中 $d$ 为播种的深度,即两次开沟器之间的距离,也即两次面阵雷达传感器下降的高度; $L$ 为耕深前面阵雷达传感器到矩形踏板之间的原始距离; $L'$ 为播种工作时面阵雷达传感器到矩形踏板之间的距离。根据上图之间的关系可以知道播种深度 $d$ 与 $L$ 和 $L'$ 之间的关系为:

$$d = L - L' \quad (2)$$

根据式(2)所示的关系式,便可以实时计算出播种深度的大小。

## 2 基于卡尔曼滤波的传感器数据融合算法

卡尔曼滤波算法是一种高效的递归滤波器,在每次迭代中仅利用最新的测量数据进行状态估计,能够处理不完全且带有噪声的测量数据,并精确地估计系统的状态,因此广泛应用于导航、目标跟踪和控制系统等领域<sup>[6]</sup>。图3为该文播深检测装置的算法流程图。

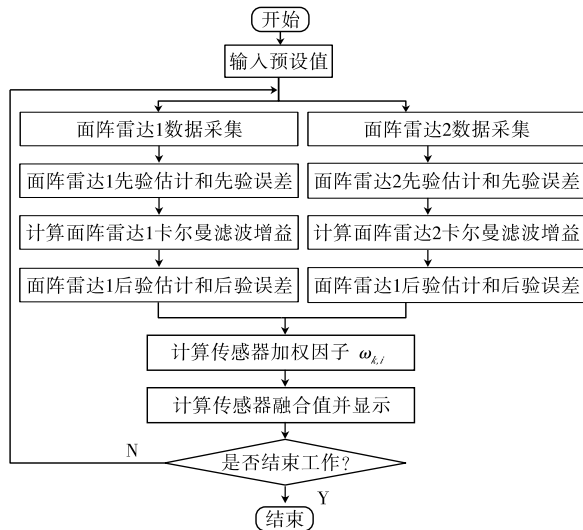


图3 基于卡尔曼滤波的双路面阵雷达数据融合算法流程图

由前面分析可知,传感器与矩形踏板之间的距离

是确保播深测量精度的重要参数,因此将这一距离设定为播种深度测量的状态量 $x$ ,则系统预测方程为:

$$\hat{x}_{k,i}^- = \mathbf{A}_i \hat{x}_{k-1,i} \quad (3)$$

式中: $\hat{x}_{k,i}^-$ 为播种深度检测装置在 $k$ 时刻的估计值; $\mathbf{A}_i$ 为状态转移矩阵,该文 $\mathbf{A}_i = [1]$ , $i=1$ 时表示面阵雷达传感器1, $i=2$ 时表示面阵雷达传感器2。

预测协方差为:

$$\mathbf{P}_{k,i}^- = \mathbf{A}_i \mathbf{P}_{k-1,i} \mathbf{A}_i^T + \mathbf{Q}_i \quad (4)$$

式中: $\mathbf{P}_{k,i}^-$ 为 $k$ 时刻预测协方差; $\mathbf{P}_{k-1,i}$ 为 $k-1$ 时刻系统状态协方差; $\mathbf{Q}_i$ 为系统过程噪声, $\mathbf{Q}_i$ 取0.01,完成系统预测后,可计算卡尔曼增益:

$$\mathbf{K}_{k,i} = \mathbf{P}_{k,i}^- \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_{k-1,i} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{K}_{k,i}$ 为卡尔曼增益值; $\mathbf{H}_i$ 为系统观测矩阵, $\mathbf{H}_i = [1]$ ;  $\mathbf{R}_i$ 为观测噪声方差,考虑到车速对测量偏差的影响, $\mathbf{R}_i$ 取值参考下表。

表2 不同速度下观测噪声方差 $\mathbf{R}$ 取值

速度	4 km/h	6 km/h	8 km/h
$\mathbf{R}$	64	121	225

因此,系统最优估计值为:

$$\hat{x}_{k,i} = \hat{x}_{k,i}^- + \mathbf{K}_{k,i} (z_{k,i} - \mathbf{H}_i \hat{x}_{k,i}^-) \quad (6)$$

式中: $\hat{x}_{k,i}$ 为系统在 $k$ 时刻的最优估计值; $z_{k,i}$ 为面阵雷达在 $k$ 时刻的测量值。

在得到系统估计值后,对系统协方差进行更新:

$$\mathbf{P}_{k,i} = (\mathbf{I}_i - \mathbf{K}_{k,i} \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_{k,i}^- \quad (7)$$

式中: $\mathbf{I}_i$ 为单位矩阵。

一般要求同一地块播种时保持播种深度一致,即在播种作业前提前预设播深 $d$ ,该滤波融合算法可计算面阵雷达数据与预设播深 $d$ 存在的偏差 $\delta_{k,i}$ ,即:

$$\delta_{k,i} = \hat{x}_{k,i} - d \quad (8)$$

通过计算偏差平方和确定两传感器的加权因子 $\omega_{k,i}$ ,即:

$$\omega_{k,1} = \frac{\delta_{k,2}^2}{\delta_{k,1}^2 + \delta_{k,2}^2} \quad (9)$$

$$\omega_{k,2} = \frac{\delta_{k,1}^2}{\delta_{k,1}^2 + \delta_{k,2}^2} \quad (10)$$

由此可得在 $k$ 时刻的播深融合值:

$$x_k = \hat{x}_{k,1} \omega_{k,1} + \hat{x}_{k,2} \omega_{k,2} \quad (11)$$

通过循环执行计算式(3)~(11)即可获得面阵雷达传感器在不同时刻的滤波结果与融合结果。

为体现滤波器的稳定性,假设滤波状态初值 $x_0$ 服从均值为预设播深 $d$ ,方差为 $P_{0,i}$ 的高斯分布,有 $x_0 \sim (d, P_{0,i})$ 。该文取 $P_{0,i} = 100$ 。

### 3 试验验证

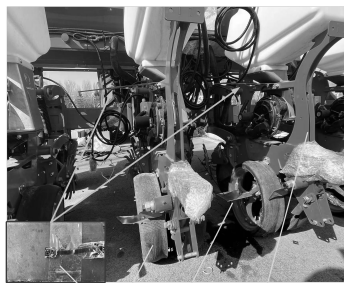
#### 3.1 试验平台

试验选用沈阳双兰机械制造有限公司生产的2BMJQ-4牵引免耕气吸精量播种机作为试验播种机,该款播种机具备一次性同步完成开沟作业、施肥操作、种子播种、土壤覆盖以及地面镇压等全套种植流程的能力。整机结构如图4所示。



图4 试验播种机实物图

如图5所示,在限深轮上的安装一个矩形踏板,正上方放置面阵雷达传感器用于测量垂直距离。面阵雷达户外测试距离最大为4.5 m,视野角 $32^\circ$ ,分辨率 $8 \times 8$  64像素,盲区3 cm,自然目标反射率90%。矩形踏板平滑漫反射,不会影响检测精度。面阵雷达距仿形踏板大于3 cm,不在盲区视野内。



1-面阵雷达; 2-限深轮;  
3-矩形踏板; 4-播种台架

图5 播深检测装置实物图

#### 3.2 试验方法

该试验使用免耕气吸精量播种机作为试验平台,以玉米为试验对象,根据国家标准中对精密播种机的玉米播种深度规定<sup>[14]</sup>,玉米播种深度在4~8 cm,故本试验预设播深为60 mm,在试验田选择3个测量区域,每个测量区域长度为10 m,并对测量区域内的地面进行修整,以避免区域内秸秆覆盖过厚影响试验结果。通过经验和查阅资料可知,悬挂式播种机的拖拉机在播种作业过程中的行驶速度为4~8 km/h,所以本次实验为了验证该播深检测装置在不同播种速度下均适用,分别设计了低速(4 km/h)、中速(6 km/h)、高速(8 km/h)三种速度下进行试验验证,并将采集到的数据发送至电脑上,使用数据处理软件对接收到的数据进行滤波与数据融合,实时记

录两路面阵雷达的实际测量值、滤波处理值以及双路面阵雷达数据融合值,并将处理结果和原始数据通过曲线图形式表示。现场数据采集图如图6所示。



图6 现场数据采集图

#### 3.3 试验结果

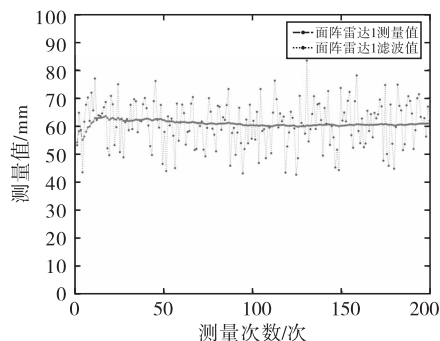


图7 4 km/h 传感器1数据处理结果

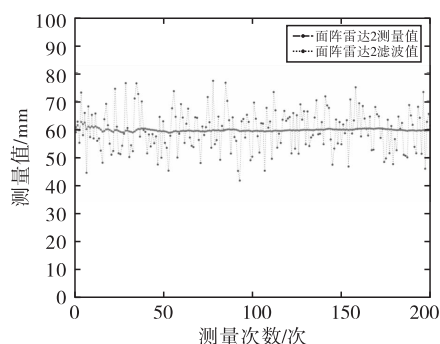


图8 4 km/h 传感器2数据处理结果

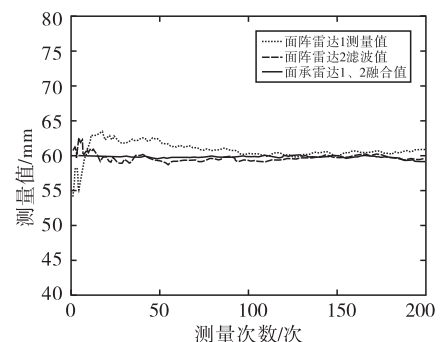


图9 4 km/h 传感器1,2数据融合结果

图7中的曲线展现了在4 km/h的播种速度下,面阵雷达传感器1的测量值表现出较大的波动,其最大值达到83 mm,最小值则为43 mm,而大部分的数据点都集中在50 mm至70 mm的区间内。然而,在经过卡尔曼滤波处理后,这些数据的波动范围得到了显著的缩减,稳定在了60 mm至65 mm的范围内。这表明滤波算法有效地降低了数据中的噪声和异常值。图8中的曲线则显示了面阵雷达传感器2在相同播种速度下的测量值波动情况,与面阵雷达传感器1相似,其测量值的波动范围也较大,但经过滤波处理后,其数据同样变得更加稳定。这表明在播种速度为4 km/h时,两种面阵雷达传感器的性能表现相近,相比其他类型传感器在稳定性方面都表现出显著优势。此外通过对比面阵雷达传感器1和传感器2的测量值及滤波后的数据,可以清晰地看到卡尔曼滤波算法在减小系统噪声方面的有效性。滤波后的数据不仅波动范围减小,而且更加接近真实值,这有助于提高播种精度和效率。

图9展示了两个面阵雷达传感器数值融合后的曲线,从图中可以明显观察到,融合后的数据曲线紧紧围绕着预设的目标播种深度60 mm,仅在个别部分出现微小的波动,这些波动都在可接受的范围内。这种稳定性表明,经过滤波和数值融合处理后的数据更加接近真实值,从而验证了所设计的播种深度测量系统在低速工作状态下的有效性。数值融合技术的应用不仅减小了单一传感器可能产生的误差,还增强了整体测量系统的鲁棒性。通过对比单一传感器的测量值与融合后的结果,可以清晰地看到融合数据在稳定性和准确性方面的显著提升。

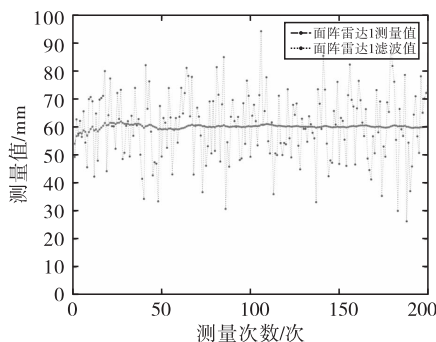


图10 6 km/h 传感器1 数据处理结果

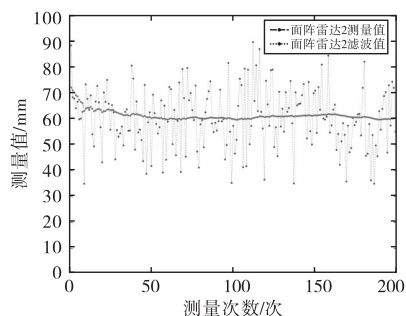


图11 6 km/h 传感器2 数据处理结果

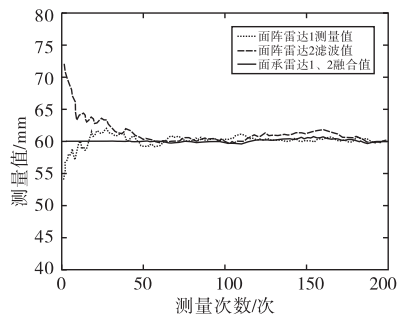


图12 6 km/h 传感器1、2 数据融合结果

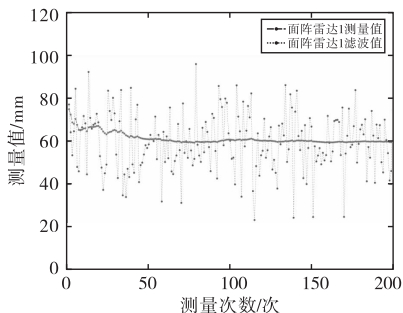


图13 8 km/h 传感器1 数据处理结果

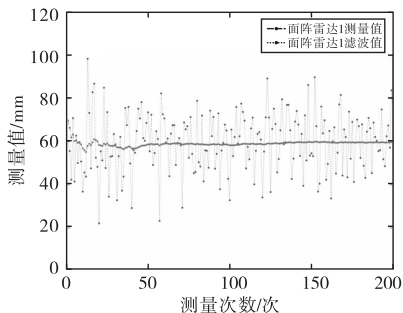


图14 8 km/h 传感器2 数据处理结果

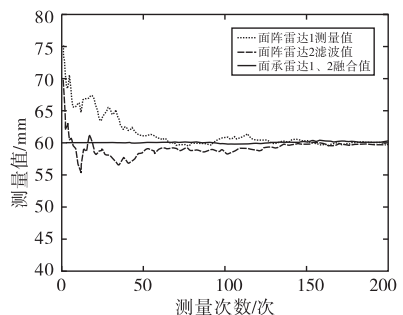


图15 8 km/h 传感器1、2 融合结果

观察图 10 至图 15 中展示的中速(6 km/h)和高速(8 km/h)下的播种深度数据曲线图,当播种机行驶速度为 6 km/h,传感器 1 的最大偏差为 34 mm,传感器 2 的最大偏差为 29 mm,经卡尔曼滤波后偏差为 7 mm。当播种机行驶速度为 8 km/h,传感器 1 的最大偏差为 37 mm,传感器 2 的最大偏差为 38 mm,经卡尔曼滤波后偏差为 13 mm。可以明显看到,随着车速的增加,面阵雷达传感器 1 和面阵雷达传感器 2 的测量值波动范围逐渐增大。经过卡尔曼滤波和数据融合处理之后,尽管速度提升,数据融合结果的波动范围相较于低速(4 km/h)时有所增大,但播种深度仍能维持在目标播种深度 60 mm 的上下小范围内波动。

通过对比分析低速(4 km/h)、中速(6 km/h)和高速(8 km/h)三种不同速度下的测量结果曲线图,可以明显看出,在低速(4 km/h)时,面阵雷达传感器的测量效果最佳,测量值最为稳定且接近目标播种深度。而随着速度的增加,测量结果逐渐降低,波动范围也相应增大。这一现象的原因可能与车速增快时播种机在不平整地面上的波动增大有关。当车速较快时,播种机在行驶过程中更容易受到地面不平整的影响,产生颠簸和振动。

#### 4 结语

(1)采用双路面阵雷达传感器检测播种机播种深度,并利用卡尔曼滤波融合算法将 2 个传感器的数据进行融合,能够解决车轮在不平整地面测量精度不准确问题。

(2)在低速(4 km/h)、中速(6 km/h)、高速(8 km/h)三种速度时,传感器测量距离的最大偏差为 23 mm,34 mm,37 mm,经过滤波处理后误差为 4 mm,7 mm,13 mm,再经过卡尔曼滤波融合算法后能够在预设播深 60 mm 上下范围浮动,且低速工作状态下准确性和有效性更高,滤波融合数据测速更佳,并准确反映播深的趋势变化情况。

(3)在不同速度下,该设计的播种深度检测装置和滤波融合算法均展现出了良好的测量效果。虽然速度的增加会带来一定的测量误差,但通过滤波和数据融合技术的运用,能够有效地减小这些误差,确保播种深度的准确性。

综上所述,面阵雷达传感器在稳定性和数据采集准确性方面优于其他类型传感器,而卡尔曼滤波算法则能够有效地提高面阵雷达传感器的数据质量。这些优势使得面阵雷达传感器在农业播种等领

域具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 陈栋泉,李国莹,李振佐,等. 基于 RecurDyn 仿真玉米育种精密播种单体的设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(03): 81-86.
- [2] Kimmelshue C L, Goggi S, Moore K J. Seed size, planting depth, and a perennial groundcover system effect on corn emergence and grain yield[J]. Agronomy, 2022, 12(2): 437.
- [3] 付彦涛,雷得超,金厚熙,等. 玉米免耕播种机播深实时监测系统设计与试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34(05): 109-116+120.
- [4] 蒋啸虎,佟金,马云海,等. 基于卡尔曼滤波融合算法的深松耕深检测装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(09): 53-60.
- [5] Iqbal T, Ghaffar A M, Ur Rehman U, et al. Development of real time seed depth control system for seeders[J]. Environmental Sciences Proceedings, 2022, 23(1): 7.
- [6] 司可. 面阵激光雷达信号处理技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2021.
- [7] 鲍光锐,郑敏毅,张农,等. 基于卡尔曼滤波算法的车身高度观测[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(02): 44-48.
- [8] 杜俊峰,郁汉琪,刘义亭,等. 基于扩展卡尔曼滤波的传感器融合 SLAM 研究[J]. 无线互联科技, 2023, 20(21): 133-137.
- [9] 傅振东,王强,陈骁驰,等. 基于事件的卡尔曼滤波算法及其在移动小车室外导航中的应用研究[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(12): 86-92+134.
- [10] 李杰,张洛维,王晓燕,等. 基于视锥距离和自适应权重卡尔曼滤波的多传感器融合算法研究[J]. 中国公路学报,2024,37(3):194-203.
- [11] 王超,刘小强,王立新. 基坑钢支撑应变的温度效应消除算法[J]. 电子设计工程,2022,30(2):174-179.
- [12] FARAG W. Kalman - filter - based sensor fusion applied to road - objects detection and tracking for autonomous vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2021, 235(7): 1125-1138.
- [13] MA H, YAN L, XIA Y, et al. Kalman filtering and information fusion[M]. Springer, 2020.
- [14] 刘中漱. 玉米精密播种机农作技术要点[J]. 现代化农业, 2020(04): 62-63.
- [15] 罗丽莹. 玉米精密播种机导种管设计与试验研究[D]. 长春:吉林农业大学, 2022.
- [16] 杨硕,王秀,武广伟,等. 玉米精密播种机播量监测系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(05): 37-44.