

Интеллектуальная навигация беспилотной агротехники

Е. Старовойтов к. т. н.¹, Е. Скиба²

УДК 621.37 | ВАК 2.2.11

Повышение эффективности сельскохозяйственного производства связано с внедрением робототехнических и беспилотных систем, к которым относится разработка беспилотной агротехники (машинно-тракторных агрегатов – МТА). К настоящему времени пока не достигнут уровень полной автономности, при которой уже не требуется контроль и периодическое вмешательство оператора в процесс управления МТА. Проведен анализ существующих технологий интеллектуальной навигации, позволяющих обеспечить полную автономность беспилотной агротехники.

НАВИГАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В АГРОТЕХНИКЕ

За последние годы созданы образцы агротехники, способные функционировать в автономном режиме или при минимальном участии оператора [1].

Предложенные отечественными разработчиками решения опираются на использование приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), инерциальных блоков, технического зрения и лазерных локационных систем (лидаров) [2, 3].

ОАО «МТЗ» в 2022 году представил прототип беспилотного трактора BELARUS-A3523i с гибридной силовой установкой. Для навигации используются приемник ГНСС, два комплекта стереотелевизионной системы и радаров (для переднего и заднего обзора), а также лидар кругового обзора с дальностью измерений 20 м, совместно обеспечивающие погрешность позиционирования в пределах 2,5...10,0 см. Связь с оператором осуществляется по радиоканалу GSM (5G) [4]. Однако представленный МТА не обладает полной автономностью: выход на стартовую точку, выдачу задания и контроль за его выполнением осуществляет оператор.

Использование в качестве основного датчика приемника ГНСС, который может работать только при наличии сигнала навигационных спутников, ограничивает автономность беспилотной агротехники. При слабом сигнале или его исчезновении выполняется автоматическая остановка МТА, а для продолжения работы необходимо вмешательство оператора, находящегося в кабине, либо

осуществляющего дистанционное управление с использованием радиолинии.

Приемник ГНСС, работающий в режиме дифференциальных поправок, позволяет аппаратно реализовать систему параллельного вождения, обеспечивающую точность поддержания траектории движения МТА в 0,2...0,4 м. Для управления используется подруливающее устройство, при этом остается необходимость присутствия человека, за которым остаются функции настройки и контроля. Такие системы широко применяются в современной агротехнике [5]. Для получения дифференциальных поправок приемник должен находиться в зоне действия контрольно-корректирующих станций ГНСС.

Автономная навигация подвижных объектов обеспечивается с помощью инерциальных датчиков, в качестве которых широко используются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Однако в настоящее время БИНС даже высокого класса точности без коррекции от ГНСС не могут обеспечить в течение продолжительного времени погрешность позиционирования в пределах 0,2...0,4 м. При этом, с увеличением класса точности БИНС возрастает ее стоимость, приближаясь и сравниваясь со стоимостью МТА (рис. 1).

Для определения координат беспилотного МТА на поле может использоваться индукционный метод навигации. Привязка координат к местности осуществляется посредством подземных токоведущих проводов, обеспечивающих погрешность поддержания траектории МТА около $\pm 0,1$ м [6].

Недостаток данного подхода заключается в необходимости укладки токоведущих проводов на глубину до 1 м посредством специального плуга или кабелеукладчика, то есть для прокладки маршрута автономного МТА должна быть проведена предварительная подготовка поля обычным трактором с навесным оборудованием. Кроме

¹ АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

² АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.



Рис. 1. Стоимость БИНС с разной скоростью накопления ошибки (погрешностью определения координат на плоскости)

того, при обрыве линии или отказе генератора переменного тока навигация становится невозможной.

Особенность применения МТА состоит в эксплуатации, как правило, на открытых пространствах большой площади, где уже есть, либо могут быть специально внесены объекты, которые можно использовать в качестве навигационных ориентиров.

Относительные координаты наблюдателя на плоскости можно определить по дальностям до двух ориентиров D_1, D_2

$$\begin{cases} x = \frac{D_1^2 + b_p^2 - D_2^2}{2 \cdot b_p} \\ y = \sqrt{D_1^2 - \frac{D_1^2 + b_p^2 - D_2^2}{2 \cdot b_p}} \end{cases}, \quad (1)$$

где b_p – базовое расстояние между ориентирами.

Если первый ориентир находится в начале системы относительных координат, а второй ориентир разнесен с ним по оси x на известное расстояние b_p , то

относительные координаты наблюдателя могут быть вычислены следующим образом

$$\begin{cases} x = \frac{b_p \cdot \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} \\ y = x \cdot \tan \alpha \end{cases}, \quad (2)$$

где α – угол между первым ориентиром и b_p ; β – угол между вторым ориентиром и b_p .

Для навигации по ориентирам при условии их видимости могут использоваться телекамеры. Определение дальности до ориентира с помощью телекамеры обычно выполняется двумя методами (табл. 1).

Принцип измерений дальности с использованием монокулярного метода и стереотелевизионной системы показаны на рис. 2.

Самый простой в реализации монокулярный (угломерный) метод с использованием одной телекамеры. Погрешность измерений дальности связана с ошибкой измерения размеров объекта и угловым разрешением телекамеры

$$\Delta D = \frac{l + \Delta l}{\tan(\Omega)} - \frac{l}{\tan(\Omega + \frac{\omega}{2n})}, \quad (3)$$

где l – линейный размер объекта; Δl – ошибка измерения размеров объекта; Ω – угловой размер объекта; ω – поле зрения объектива; n – количество элементов изображения (пикселей) в строке фотоприемника.

Характеристики стереотелевизионной системы зависят от длины стереобазы b_d , обеспечивающей параллельность оптических осей обеих телекамер. Погрешность измерения дальности равна

$$\Delta D = \frac{f \cdot (b_d + \Delta b_d)}{\Delta \Omega} - \frac{b_d \cdot f}{\Delta \Omega + \frac{\omega}{2n}}, \quad (4)$$

где Δb_d – погрешность определения длины стереобазы (расстояния между объективами); $\Delta \Omega$ – линейный

Таблица 1. Методы измерения дальности с использованием телекамер

Метод измерения дальности	Линейные размеры объекта	Наличие базы с постоянными геометрическими характеристиками	Источники погрешности
Монокулярный (одна телекамера)	Должны быть известны	Не требуется	<ul style="list-style-type: none"> Дискретность фотоприемника; ошибки определения линейных размеров объекта
Стереобаза (две телекамеры)	Могут быть неизвестны	Обязательна	<ul style="list-style-type: none"> Дискретность фотоприемника; нестабильность базы между телекамерами

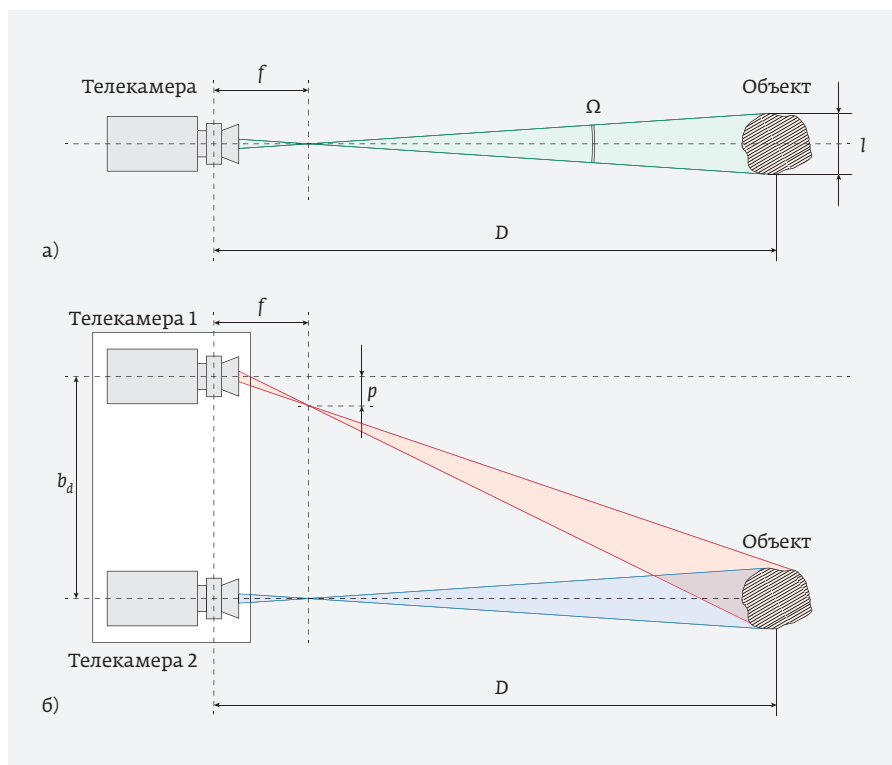


Рис. 2. Схемы монокулярной (а) и стереотелевизионной системы (б)

постоянной величиной независимо от ракурса наблюдения, а видимый угловой размер изменяется пропорционально дальности [7].

Одним из таких объектов, часто встречающихся в сельской местности, является водонапорная башня (рис. 3). Водонапорная башня типовой конструкции при наблюдении с любого ракурса будет обладать геометрическим инвариантом (рис. 4).

Погрешности измерения дальности монокулярной и стереотелевизионной системой на расстояниях до 2000 м показаны на рис. 5. Исходные данные $l=2,5$ м; $\Delta l=0,1$ м; $\omega=40^\circ$ (монокулярная система); $\omega=15^\circ$ (стереотелевизионная система); $b_d=2$ м; $\Delta b_d=2$ мм; $f=500$ мм; $n=1920$. Из рисунка видно, что погрешности измерений в обоих случаях возрастают с увеличением расстояния. Из выражения (1) следует, что на итоговую погрешность определения координат будет дополнительно оказывать влияние положение МТА относительно ориентиров, поэтому данный подход не обеспечивает требуемую точность позиционирования.

параллакс изображений объекта (диспаратность); f – фокусное расстояние объективов телекамер.

Если измерения выполняются монокулярной системой, то в качестве ориентиров наилучшим образом подходят те объекты, в конструкции которых имеется так называемый геометрический инвариант, например окружность, наибольший поперечный размер которой всегда будет



Рис. 3. Водонапорная башня

но ориентиров, поэтому данный подход не обеспечивает требуемую точность позиционирования.

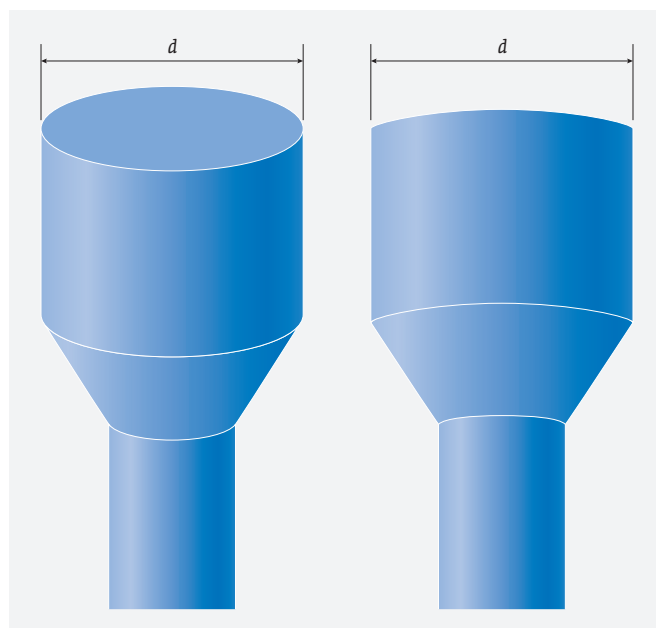


Рис. 4. Геометрический инвариант в конструкции водонапорной башни

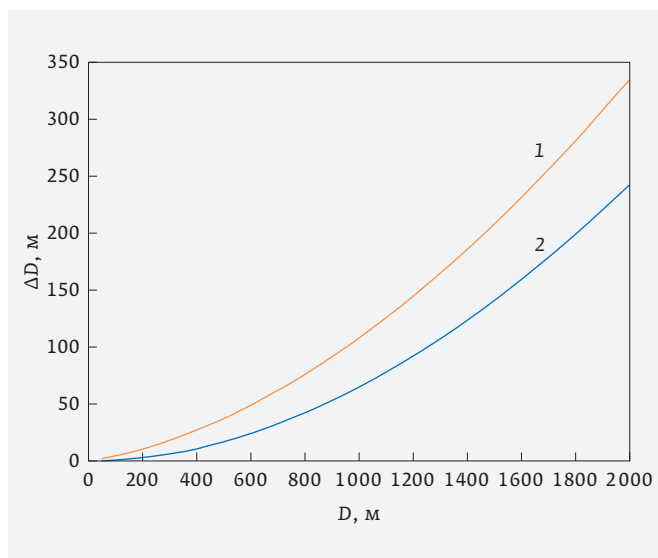


Рис. 5. Погрешности измерения дальности монокулярной (1) и стереотелевизионной (2) системами на расстояниях до 2000 м

Погрешность измерений монокулярной системой в первую очередь будет ограничена разрешением телекамеры. Но на практике возможности телекамеры ограничены чувствительностью и динамическим диапазоном фотоприемника: ориентир не будет различаться в условиях недостаточной освещенности и при наличии яркого фона. Независимость от внешней световой обстановки может быть обеспечена путем использования монохроматических высоконаправленных источников излучения – лазеров.

В системах автоматизированного управления строительными-дорожными машинами с помощью лазерного луча создается стабилизированная в пространстве опорная плоскость с заданным уклоном, относительно которой поддерживается положение рабочих органов в копирном режиме (рис. 6). Оптическая система установленного на треноге лазерного излучателя формирует диаграмму направленности 360° в азимутальной плоскости и $0,1^\circ$ в угломерной. Поле зрения фотоприемного устройства, закрепленного на рабочем органе машины, в азимутальной плоскости также составляет 360° . Погрешность планировки поверхности составляет не более ± 5 см на дальностях до 500 м, при этом в зоне действия одного излучателя может работать группа численностью до 10 единиц техники [8].

В реальных условиях недостатками систем на базе лазерного канала будут ограниченная дальность, помехи от солнечной засветки, зависимость от метеоусловий и необходимость прямой видимости лазерного излучателя, ограниченная рельефом местности. Кроме того, в массово

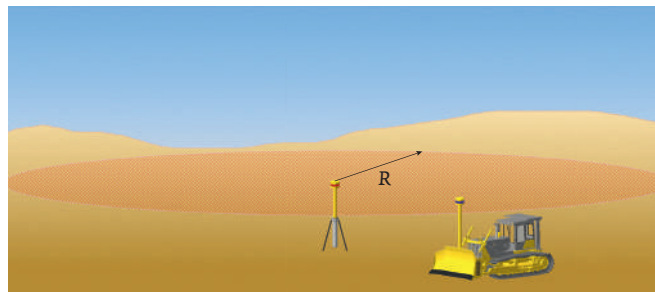


Рис. 6. Система автоматизированного управления отвалом бульдозера с помощью лазерного нивелира

выпускаемой аппаратуре для работы в полевых условиях затруднительно обеспечить погрешность направления лазерного луча не более 10 угловых секунд [6].

Хорошо заметные на рис. 3 воздушные линии электропередач (ВЛЭП) также могут быть использованы для навигации. Опоры ВЛЭП неподвижны, их координаты могут быть определены с высокой точностью, провода создают низкочастотное электрическое поле, а конструкция ориентирована определенным образом. МТА при перемещении по полю может неоднократно пересекать ВЛЭП под разными углами (рис. 7).

Нелинейная зависимость наводимого электрического поля от расстояния позволяет обнаруживать место пересечения ВЛЭП с автодорогой посредством датчика простой конструкции. Заранее известный маршрут транспортного средства и координаты его пересечения с ВЛЭП позволяют проводить в них коррекцию одометра с погрешностью менее 3 м [9].



Рис. 7. Воздушные линии электропередач над сельскохозяйственным полем

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО АВТОТРАНСПОРТА И ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

Проблемы автономной навигации агротехники и беспилотного автотранспорта (БАТ) в городе имеют много общего, но при этом условия эксплуатации этих двух видов машин различаются (табл. 2).

Для БАТ в городе принципиальной проблемой является непрерывная навигация в условиях периодической потери сигнала ГНСС, которая решается с помощью наличия оборудованных трасс и элементов городской инфраструктуры.

Относительная навигация без привязки к глобальным координатам может быть реализована с применением алгоритмов SLAM (*simultaneous localization and mapping* – метод одновременной локализации и построения карты, широко используемый в навигации мобильных роботов).

Исходные данные для алгоритмов SLAM формируются в основном посредством лидаров [10], при этом возможна навигация БАТ в среде с небольшим количеством характерных ориентиров, например, в туннеле [11]. Этот подход не может быть применен только в условиях недостаточной информативности внешней среды, имеющей однородные протяженные участки (например, водной поверхности).

Полноценной альтернативой ГНСС являются локальные системы навигации (ЛСН), развертывание которых подразумевает установку радионавигационных опорных станций (РОС), в зоне действия которых создается навигационное поле.

Сравнительные характеристики различных типов навигационных систем представлены в табл. 3.

Использование ЛСН будет особенно эффективно в сельской местности: РОС постоянно находятся в прямой видимости из-за отсутствия высотной застройки и экранирующих сооружений.

Доступность сигнала ЛСН обеспечивает непрерывную навигацию, независимо от наличия сигнала ГНСС.

В этой связи представляет интерес разрабатываемая АО «НИИМА «Прогресс» комплексированная навигационная система услуг навигации (КОНСУЛ) на основе ЛСН, в которой используются СБИС собственной разработки (K5200MX014 и K1917BC024) [12].

НАВИГАЦИОННАЯ АППАРАТУРА БЕСПИЛОТНОГО МТА

Примерный состав навигационной аппаратуры беспилотного МТА большей частью аналогичен используемому в БАТ (табл. 4).

Для автономной навигации целесообразно в состав аппаратуры МТА добавить цифровой компас (магнетометр). Основными источниками навигационной информации, независимыми от погодных условий и времени суток, являются приемники ГНСС, ЛСН и магнетометр. Эти средства обеспечивают требуемую точность позиционирования МТА 0,2...0,4 м, а остальные датчики играют вспомогательную роль.

Для обеспечения требований различных потребителей в ЛСН КОНСУЛ предусмотрены два метода определения местоположения [12].

Таблица 2. Условия эксплуатации беспилотного МТА и БАТ в городе

Параметры	Беспилотный МТА	БАТ
Скорость движения, км/ч	≤20	60...130
Особенности трассы	Однообразный ландшафт	Дороги с покрытием, разметкой, знаками, специально оборудованной инфраструктурой
Взаимодействие с другими транспортными средствами	Ограничено	Движение в плотном потоке транспорта
Наличие пешеходов	Маловероятно	Возможно появление на проезжей части в любой момент времени
Внезапно появляющиеся препятствия	Могут быть скрытые в растительности предметы	Возможно резкое изменение траектории двигающихся попутно или во встречном направлении транспортных средств
Наличие в прямой видимости хорошо наблюдаемых с большой дальности ориентиров	Возможно	Ограничено городской застройкой
Движение в экранированных сооружениях	Не предусмотрено	Маршрут может проходить под мостами, в плотной застройке, через тоннели

Таблица 3. Сравнительные характеристики ГНСС и ЛСН

Навигационная система	ГЛОНАСС, GPS, BeiDou, Galileo	Starlink	Locata	КОНСУЛ
Тип	ГНСС	Система космической связи	ЛСН	ЛСН
Режим работы	Беззапросный	Беззапросный	Беззапросный	Запросный / беззапросный
Диапазон рабочих частот, МГц	1 176,0 ... 1 602,0	11 325	2 400	350 ... 370
Ширина канала, МГц	4,092 ... 20,46	500	20,46	5/10/20
Точность позиционирования, м	3...6 (0,2...0,5)*	33,5 ... 7,7	0,03 ... 0,05	1 ... 5**
Уровень сигнала, дБм	-125 ... -131	-95 ... -101	-60 ... -105	-87
Площадь покрытия	Глобальная	Глобальная	3370 км ²	100 км ²

* В режиме дифференциальных поправок.

** В беззапросном режиме.

Таблица 4. Примерный состав навигационной аппаратуры беспилотного МТА

Датчики	Назначение		Дальность измерений
	БАТ	Беспилотный МТА	
Телекамеры (монокулярные)	Распознавание сигналов светофоров, дорожной разметки, обнаружение подвижных объектов, препятствий, круговой обзор	Круговой обзор, обнаружение препятствий, контроль за навесным оборудованием	200 м
Телекамеры (стереосистема)	-	Измерение дальности до препятствий	200 м
Радар	Определение координат объектов в выделенном секторе пространства, измерение скорости других транспортных средств	Обнаружение препятствий в растительности	250 м
Лидар	Обнаружение препятствий, определение координат объектов, круговой обзор, построение 3D-модели окружающей обстановки	Обнаружение препятствий, круговой обзор	60 м
Инерциальный блок	Определение углового положения, направления движения	Определение углового положения, направления движения	-
Цифровой компас (магнетометр)	-	Определение магнитного курса	-
Ультразвуковой датчик	Измерение дальности до края дорожного полотна	-	10 м
Приемник ЛСН	-	Определение географических координат	-
Приемник ГНСС	Определение географических координат	Определение географических координат	-

В беззапросном режиме РОС синхронизируются между собой для излучения радиосигнала в строго определенный момент времени. Дальность между навигационным приемником и РОС определяется как

$$D = \Delta t \cdot c, \quad (5)$$

где Δt – задержка между импульсом метки времени и приходом радиосигнала; c – скорость света в вакууме.

Погрешность измерений будет равна

$$\Delta D = c \cdot (\Delta t_{\text{изм}} + \Delta t_{\text{схр}}), \quad (6)$$

где $\Delta t_{\text{изм}}$ – ошибка измерения времени прихода радиосигнала; $\Delta t_{\text{схр}}$ – ошибка синхронизации РОС.

В запросном режиме дальность вычисляется по выражению

$$D = \frac{c \cdot (\Delta t - \Delta t_{\text{аз}})}{2}, \quad (7)$$

где $\Delta t_{\text{аз}}$ – аппаратная задержка при излучении навигационного радиосигнала.

Погрешность измерений составляет

$$\Delta D = \sqrt{\Delta D_{\text{зап}}^2 + \Delta D_{\text{отв}}^2} = \sqrt{(c \cdot \Delta t_{\text{изм}})^2 + (c \cdot \Delta t_{\text{схр}})^2} = \sqrt{2} \cdot c \cdot \Delta t_{\text{изм}}. \quad (8)$$

В аппаратуре АО «НИИМА «Прогресс» используется генератор опорной частоты ГК360М-ТС (АО «Морион»), обеспечивающий стабильность $\sim 10^{-11}$ с. Если результирующая ошибка измерения времени прихода радиосигнала $\Delta t_{\text{изм}} = 10^{-10}$ с, то для получения погрешности позиционирования МТА беззапросным методом $\Delta D = 0,3$ м ошибка синхронизации РОС должна быть $\Delta t_{\text{схр}} < 10^{-9}$ с.

Измерения запросным методом обеспечивают $\Delta D = 4,2 \cdot 10^{-2}$ м, что позволяет его применять для позиционирования беспилотного МТА при выполнении сельхозработ.

Построение ЛСН планируется на основе сети технологической радиосвязи LTE. Стандартные схемы, используемые для синхронизации базовых станций в сетях LTE, обеспечивают возможность определения местоположения с точностью 3...5 м.

Увеличение точности позиционирования за счет применения высокостабильных рубидиевых и цезиевых стандартов частоты (до значений $\sim 10^{-13}$ с) значительно увеличивает затраты на создание и развертывание сети.

В системе КОНСУЛ использованы методы искусственного интеллекта, обеспечивающие применение фазовых методов обработки сигналов, которые позволяют достигнуть субметрового уровня точности, достаточного для автономной навигации беспилотного МТА.

Навигационный приемник имеет собственный вычислитель на базе высокопроизводительного

нейропроцессорного модуля отечественного производства и операционную систему реального времени, позволяющую реализовать нейронные сети. Таким образом осуществляется исполнение моделей искусственного интеллекта и программного обеспечения, позволяющего обучать или исполнять эти модели с использованием собственного вычислителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шевченко А. В., Мещеряков Р. В., Мигачев А. Н.** Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агро-техника // Проблемы управления. 2019. № 5. С. 3–18. DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2019.5.1>
2. **Козюков А. В., Михеев Н. В.** Применение системы Cognitive Agro Pilot при работе зерноуборочных комбайнов // Наука и Образование. 2020. Т. 3. № 4. С. 58.
3. **Валиев А. Р., Бинело М., Зиганшин Б. Г., Сабиров Р. Ф., Шафигуллин Г. Т., Галиуллин И. Г.** Беспилотный трактор // Вестник НЦБЖД. 2021. № 4(50). С. 69–75.
4. Автономный BELARUS в действии – МТЗ. URL: <https://xn-80aumfdhd.xn-90ais/articles/avtonomnyj-belarus-v-dejstvii/>
5. **Левин А. А.** Основные критерии и задачи применения GPS оборудования в сельском хозяйстве // Сурский вестник. 2021. № 1(13). С. 52–55. DOI: [10.36461/2619-1202_2021_13_01_010](https://doi.org/10.36461/2619-1202_2021_13_01_010).
6. **Калужный А. Т.** Разработка теории индукционной сельскохозяйственной навигации. Диссертация доктора технических наук. Новосибирск. 2017. 294 с.
7. **Бачевский С. В.** Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорций в матричных телевизионных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2010. Вып. 1. С. 57–66.
8. **Забегалов Г. В., Ронинсон Э. Г.** Бульдозеры, скреперы, грейдеры: Учебник для ПТУ / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 1991. 334 с.
9. **Игаева М. А., Хабаров А. В.** Исследование возможности использования поля воздушных линий электропередач для целей навигации // Датчики и системы. 2011. № 5. С. 51–53.
10. **Wang Q., Zhang Jun, Liu Yu., Zhang X.** Point Cloud Registration Algorithm Based on Combination of NDT and ICP. Computer Engineering and Applications, 2020, no. 56(7), pp. 88–95. DOI: [10.3778/j.issn.1002-8331.1904-0174](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1904-0174).
11. **Kim K., Im Ju., Jee G.** Tunnel Facility-based Vehicle Localization in Highway Tunnel using 3D LIDAR. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, iss. 10, October 2022, pp. 17575–17583. DOI: [10.1109/TITS.2022.3160235](https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3160235).
12. **Корнеев И. Л., Кузнецов А. С., Королев В. С.** Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ» // НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск. 2021. 7с. Т. 14 (107). С. 57–59.

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ
МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2023»**

**14-20 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

www.rusarmyexpo.ru