

УДК 004:629.33:621.396.663
DOI 10.17513/snt.39888

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПЕЛЕНГАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОРИЕНТАЦИИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ЗАКРЫТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УЧАСТКЕ

Худоногов Д.Ю., Никитенко М.С., Кизилов С.А.

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук», Кемерово,
e-mail: admolv@gmail.com, ltd.mseng@gmail.com, sergkizilov@gmail.com

В статье рассмотрен вариант применения метода радиопеленгации в задачах движения автономных транспортных средств (АТС) по заданной траектории на закрытых технологических участках, в частности в качестве дополнения к работе алгоритмов позиционирования АТС в условиях потери управляющей системой на основе машинного зрения пространственной привязки к маршруту. Проведены исследования и моделирование видов модуляции сигналов с целью определения направления движения объектов с минимальными отклонениями. По результатам моделирования для модуляций BPSK и QPSK определены коэффициенты ошибок модуляции, вектор ошибки, отношения сигнал/шум. В лабораторных условиях выполнены исследования азимутов углов прихода сигнала стационарного передающего устройства с применением алгоритма MUSIK, по результатам которых определен вид модуляции с наиболее точными характеристиками для решения задачи ориентации подвижных объектов методом пеленгации. В практической реализации разработаны схема движения АТС на основе результатов проведенных исследований, а также аппаратно-программное обеспечение управления физической моделью АТС на основе прототипа системы ориентации подвижных объектов методом пеленгации сигнала и аппаратным модулем автоматического управления положением рулевых колес АТС в зависимости от пеленгационного положения (рельефа).

Ключевые слова: автономный транспорт, автономное транспортное средство, радиопеленгация, лабораторный макет ориентации подвижных объектов методом пеленгации сигнала, модуляции, машинное зрение, ориентация подвижных объектов, траектория движения

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р (Соглашение от 28.09.2022 №075-15-2022-1199).

DIRECTION FINDING METHODS APPLICATION FOR AUTONOMOUS VEHICLES ORIENTATION IN CLOSED TECHNOLOGICAL AREA

Khudonogov D.Yu., Nikitenko M.S., Kizilov S.A.

The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the RAS, Kemerovo,
e-mail: admolv@gmail.com, ltd.mseng@gmail.com, sergkizilov@gmail.com

The article considers radio direction finding methods application for autonomous vehicle (AV) movement by defined route in closed technological area especially as additive method to AV positioning algorithms in case of leading route machine vision-based control system detouring. Researches and modelling of signal modulation are carried out for determining object moving direction with minimum defects. As a result of modelling, modulation defect coefficients, error vector, signal and noise correlation for BPSK and QPSK modulation were determined. Transmitter azimuth signal angles applying MUSIK algorithm were researched in laboratory conditions. As a result, modulation type with the most precise parameters for moving objects orientation with direction finding methods was determined. As practical realization the AV route plan was developed based on researches results. Also real AV model control hardware was developed based on moving objects orientation system prototype with signal direction finding method and AV wheel automated control hardware module depending on boresight (terrain).

Keywords: autonomous vehicle, autonomous vehicle radio detection finding, moving objects with direction finding method laboratory model, modulation, machine vision, moving objects orientation, moving route

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a comprehensive scientific and technical program of a full innovation cycle “Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and mining of mineral resources, ensuring industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials with a consistent reduction in the environmental load on the environment and risks to the lives of the population,” approved by Order of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 No. 1144-r (Agreement dated September 28, 2022 No. 075-15-2022-1199).

Технологии управления автономными транспортными средствами (АТС) активно развиваются в задачах горнодобывающей отрасли. Инженерные решения, методы, способы и подходы реализации управления наиболее часто базируются на применении систем машинного зрения, аппаратных средств определения препятствий, спутниковой навигации, искусственного интеллекта и построении карт маршрутов [1–3].

В публикациях [4, 5] авторы предлагают перспективное решение в задачах управления АТС, которое основывается на подсветке траектории движения лазерными световыми маркерами. Такой подход может быть дополнен применением радиопеленгации как способа определения направления движения на источник стационарного радиосигнала в условиях, препятствующих работе алгоритмам машинного зрения. В качестве такого источника может выступать контрольный пост (радиомаяк), определяющий в том числе и место остановки АТС, выполнение маневра в траектории движения и дальнейшей пеленгацией на следующий радиомаяк.

Цель работы состоит в определении вида модуляции сигналов с наилучшими точностными характеристиками при применении радиопеленгации в задаче организации движения АТС в качестве дополнения к работе алгоритмов позиционирования АТС в условиях потери управляющей системой на основе машинного зрения пространственной привязки к маршруту.

Материалы и методы исследования

В Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН) был апробирован способ радиопеленгации для ориентации подвижных объектов относительно стационарного источника радиосигнала. Реализация такого способа проводилась в несколько этапов, включая исследования видов модуляции сигналов,

постановку эксперимента на лабораторном макете ориентации подвижных объектов методом пеленгации сигнала и проектирование схемы движения АТС на основе полученных экспериментальных данных точностных характеристик исследуемых видов модуляции для пеленгации.

Рассматривались три вида модуляции: амплитудная, которая имеет наименьшую сложность реализации; квадратурная фазовая (QPSK) и бинарная фазовая манипуляция (BPSK) – как наиболее помехоустойчивые [6, с. 472].

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам моделирования в среде Simulink (табл. 1) для модуляций BPSK и QPSK были определены: коэффициент ошибок модуляции MER (Modulation Error Ratio); вектор ошибки EVM (Error Vector Magnitude); отношения сигнал/шум SNR (Signal to Noise Ratio).

На рисунке 1 представлены результаты моделирования сигнальных созвездий при разных значениях отношения сигнал/шум.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что с увеличением отношения сигнал/шум вектор ошибки стремится к минимальному значению, а коэффициент ошибок модуляции QPSK и BPSK принимает сопоставимо равные значения. Таким образом, на шаге моделирования рассматриваемых видов модуляций подтверждаются ожидаемые качественные характеристики выбранных модуляций для задач пеленгации.

Экспериментальные исследования ориентации объекта на стационарный источник сигнала проводились на лабораторном макете, структурная схема которого представлена на рисунке 2. Определение направления на источник сигнала реализовано на базе алгоритма MUSIC (Multiple Signal Classification). Такое решение в задаче пеленгации обусловлено возможностью алгоритма определить угловые направления прихода сигналов [7–9].

Таблица 1

Результаты моделирования

SNR, дБ	MER, дБ		EVM, %	
	BPSK	QPSK	BPSK	QPSK
0	0,7	7,4	92	43
10	11	13	28	22
20	20	23	9	6
30	30	33	2	2
40	40	43	0,9	0,6

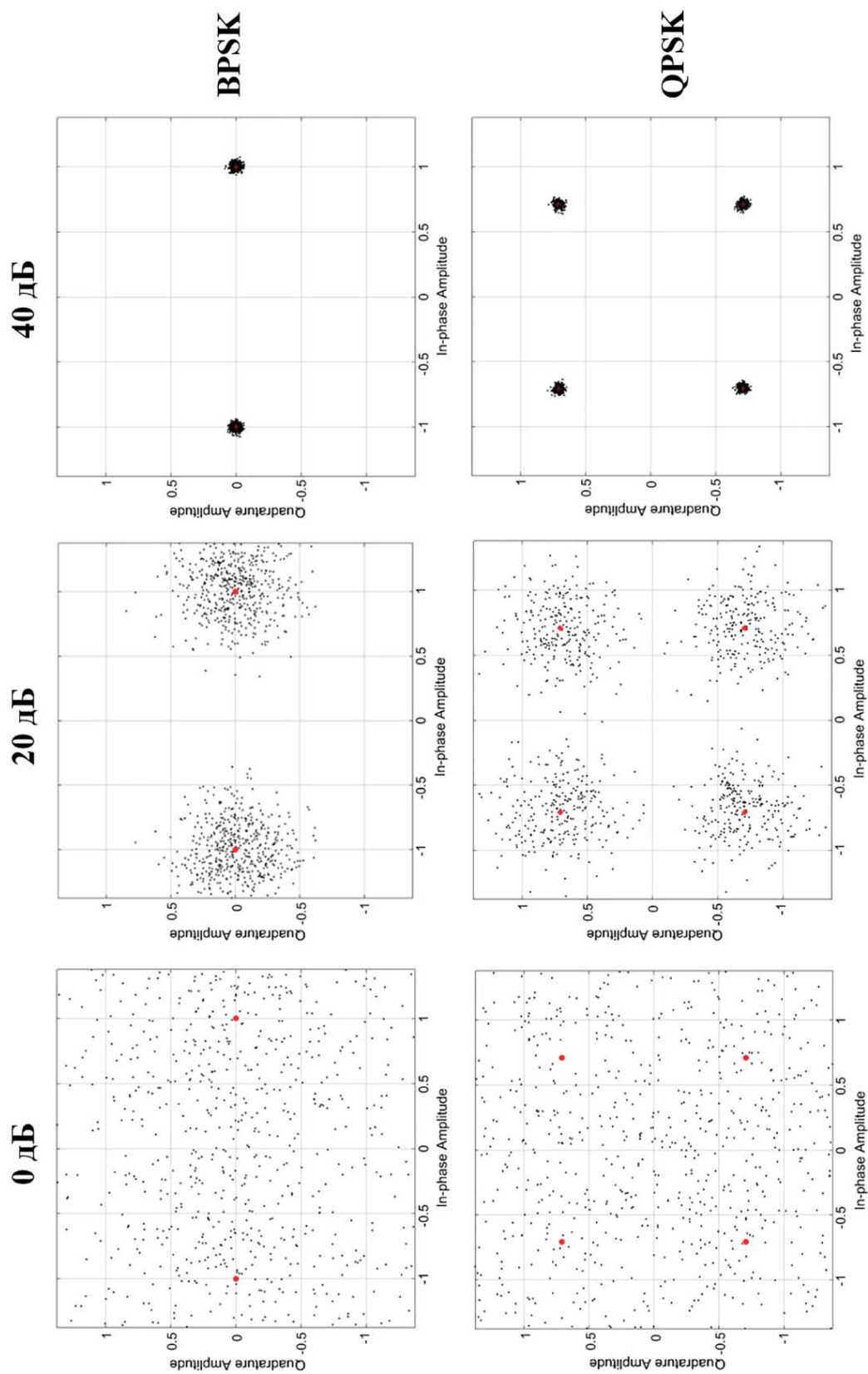


Рис. 1. Сигнальные созвездия для значений соотношений сигнал/шум 0; 20 и 30 Дб

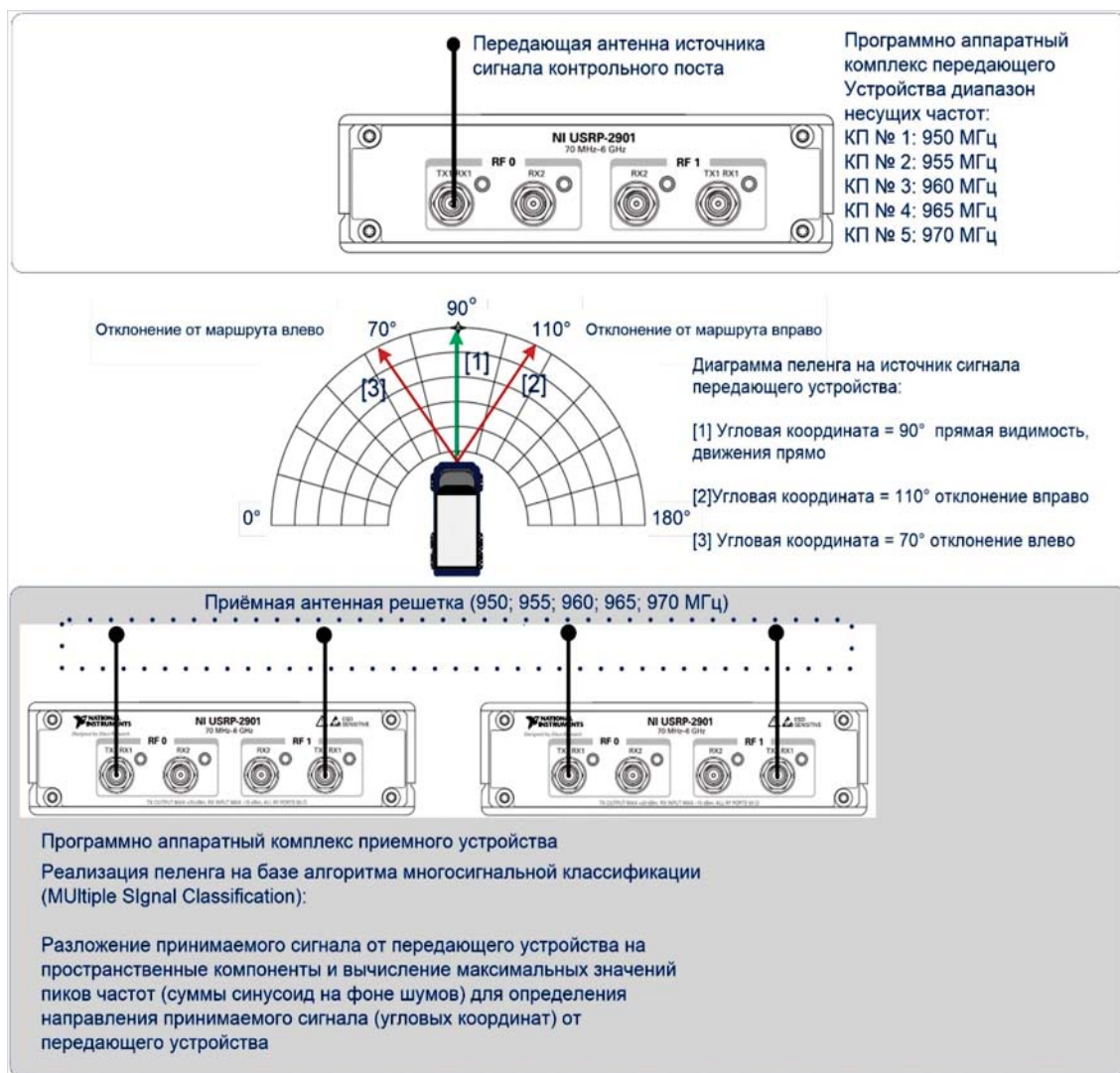


Рис. 2. Обобщенная структурная схема лабораторного макета ориентации подвижных объектов методом пеленгации сигнала

Аппаратное обеспечение лабораторного макета включает в свой состав передающее и приемное устройства на базе программно определяемой радиосистемы NI USRP 2901. Функциональные возможности передающего устройства позволяют выполнить генерацию сигналов в заданном диапазоне частот (950–970 МГц) амплитудной модуляции, квадратурной фазовой и бинарной фазовой манипуляции.

Приемное устройство обеспечивает демодуляцию сигнала заданных видов модуляции и при помощи алгоритма MUSIC определяет азимут угла ориентации на источник сигнала. Программная реализация алгоритма выполнена в среде LabVIEW 2021.

Цель экспериментального исследования заключалась в поиске вида модуляции, которая позволяет определить направление

движения объекта (приемное устройство) на стационарный источник сигнала (передающее устройство) с минимальными отклонениями азимута угла прихода сигнала при условиях прямой ориентации объекта на источник излучения сигнала.

Лабораторные исследования выполнялись на базе лабораторного прототипа системы ориентации подвижных объектов методом пеленгации сигнала по следующей методике.

1. Установка приемного устройства в прямой видимости на передающее устройство.

2. Измерение точностных характеристик азимута отклонения угла прихода сигнала при использовании:

- амплитудной модуляции;
- фазовой манипуляции;
- квадратурной фазовой манипуляции.

Во время проведения эксперимента наблюдалось периодическое отклонение азимута угла в пределах от 35° до 40° для амплитудной модуляции и от 10° до 15° при генерации квадратурной фазовой манипуляции. Расстояние от приемного устройства до передающего устройства стационарного источника сигнала варьировалось от 1 до 20 м, при этом точностные характеристики азимута угла отклонения для бинарной фазовой манипуляции изменялись в пределах отклонений 5° .

Результаты экспериментальных исследований показали, что применение бинарной фазовой манипуляции обеспечивает наиболее точностные характеристики для решения задачи ориентации подвижных объектов методом пеленгации на базе алгоритма MUSIC.

Дальнейшая реализация позволила перейти к проектированию схемы движения АТС на основе вышеизложенных результатов экспериментов.

Пример маршрута движения АТС на закрытом технологическом участке приводится на рисунке 3.

Контрольные точки для участков совершения маневра, а именно определение направления дальнейшего движения, дополнены радиочастотной меткой (RFID), по мере приближения к которой на расстоянии заданной дистанции АТС выполнит остановку, в автоматическом режиме переключит приемный тракт на несущую частоту следующего радиомаяка (РМ) и продолжит движение с учетом пеленга на очередной контрольный пост РМ.

Порядок выполняемых действий АТС на участках совершения маневра представлен фрагментом на рисунке 4.

Завершением исследований стала аппаратно-программная реализация управления физической моделью АТС на основе лабораторного прототипа системы ориентации подвижных объектов методом пеленгации сигнала и аппаратным модулем автоматического управления положением рулевых колес АТС в зависимости от пеленгационного положения (рельефа). Внешний вид панели управления продемонстрирован на рисунке 5.

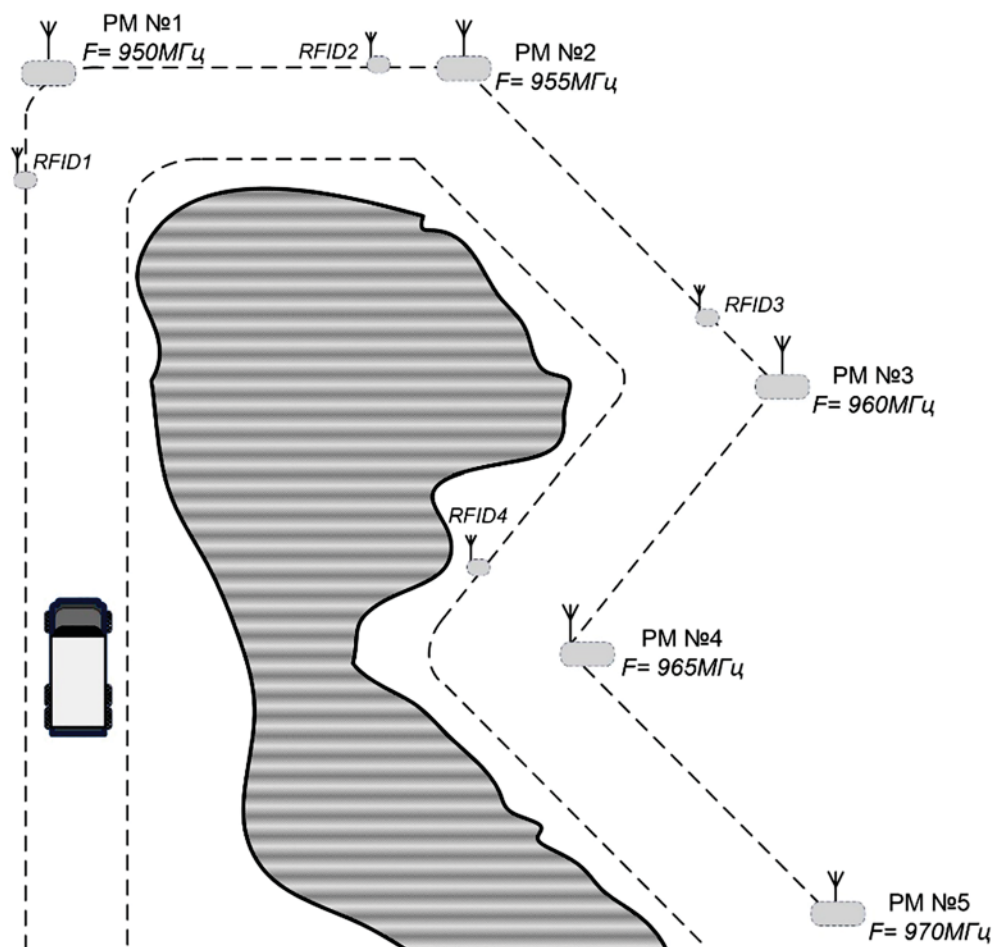


Рис. 3. Схема маршрута АТС на закрытом технологическом участке на основе пеленгации

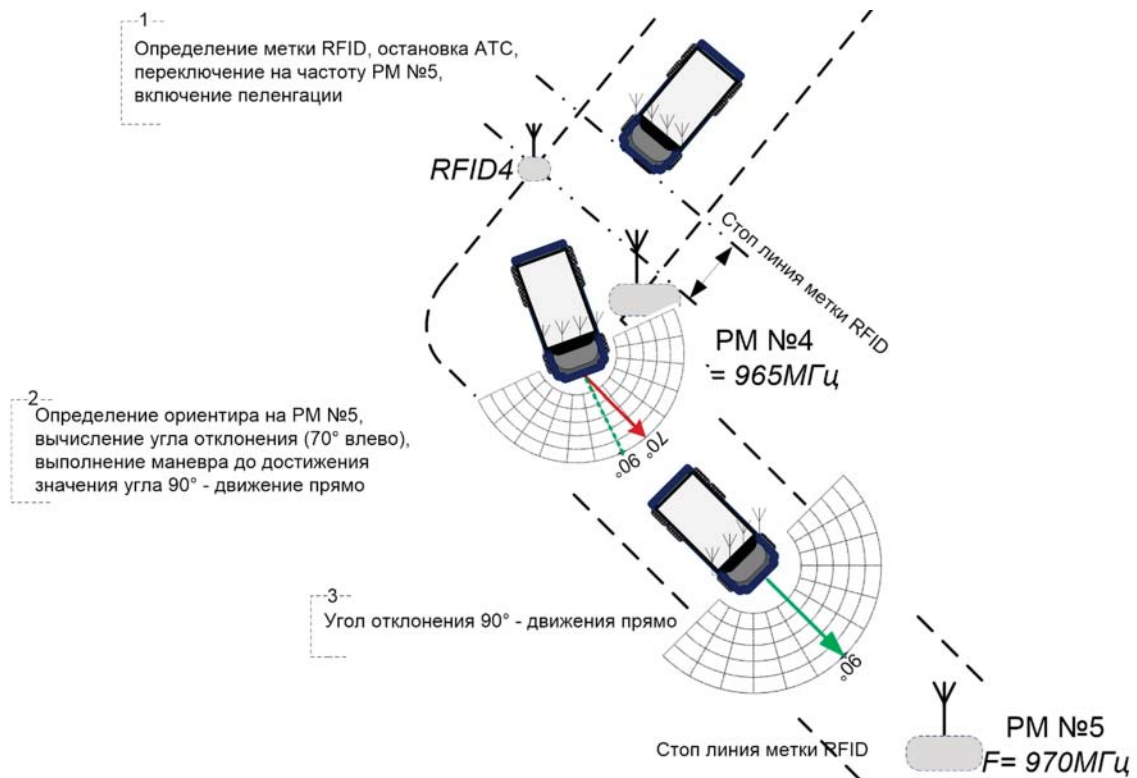


Рис. 4. Фрагмент выполнения маневра АТС (поворот влево):
1 – Определение метки RFID и переключение приемного тракта на несущую частоту радиомаяка РМ № 5; 2 – Вычисление азимута угла на источник радиосигнала и на его основе выполнение маневра АТС до получения азимута угла прямой видимости на источник сигнала (90°); 3 – Прямолинейное движение АТС в направлении радиометки

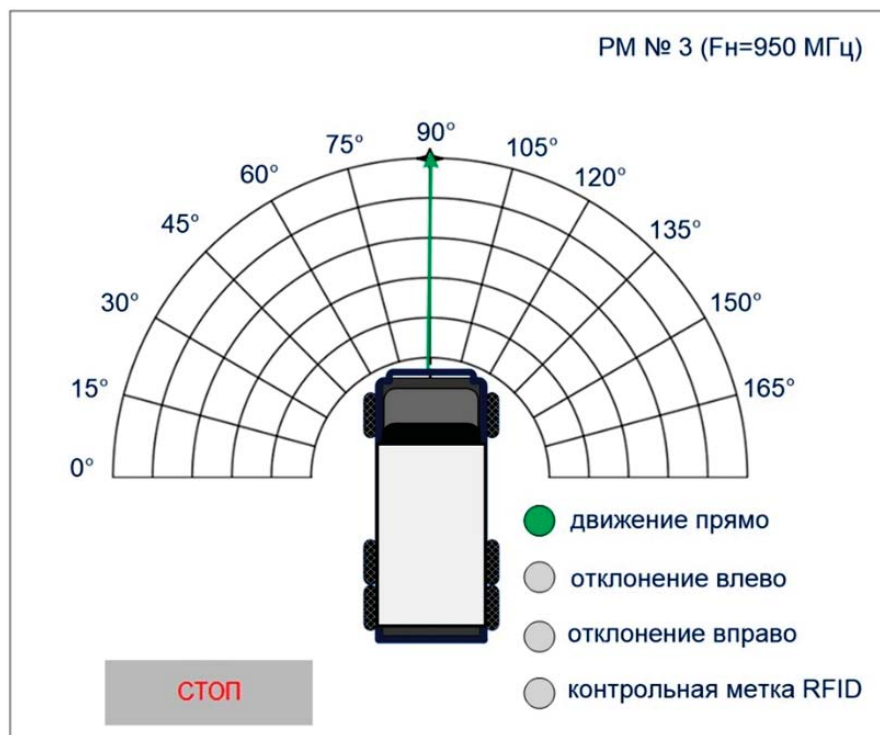


Рис. 5. Внешний вид программной панели управления движением АТС

После обработки сигнала на лицевую панель выводится текущее положение ориентации относительно РМ, в случаях отклонения от траектории движения влево или вправо выполняется коррекция положением угла колес АТС до достижения значения азимута угла направления, равного 90°.

Заключение

Предложенный способ, апробация которого была выполнена в лабораторных условиях, показал работоспособность предлагаемых решений, дальнейшая реализация и исследования которых позволят улучшить движение автономных транспортных средств по заданной траектории на закрытых технологических участках. В совокупности с алгоритмами машинного зрения радиопеленгация обеспечивает дополнительный функциональный сервис в маневренности АТС, особенно в условиях ограничения работы методов машинного зрения (в условиях потери зоны визуального контакта со световым маркером), а также способствует решению задачи удержания на траектории с минимальным подруливанием, тем самым позволяет более качественно выполнять движение АТС.

Список литературы

1. Клебанов Д.А. Применение автономной и дистанционно-управляемой техники на открытых горных работах // Горная промышленность. 2020. № 6. С. 14-18.
2. Реута Н.С., Нанеташвили Р.Г., Жумашев Н.Г., Сулейменов Е.А., Емашкина Т.С. Анализ современных систем ориентирования в пространстве // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2017. Т. 1. С. 151-153.
3. Гусев С.И., Елифанов В.В. Система функционирования беспилотного автотранспортного средства // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2019. № 4(88). С. 63-67.
4. Никитенко М.С., Кизилов С.А., Худоногов Д.Ю. Анализ подходов к управлению автономными транспортными средствами // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 12-2. С. 278-283.
5. Кизилов С.А., Никитенко М.С. Концепция применения технологий компьютерного зрения для управления автономным транспортом // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2020. № 6. С. 235-238.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
7. Грибов Г.С. Алгоритмы пеленгования с помощью кольцевой фазированной антенной решетки // СПБНТОРЭС: Труды ежегодной НТК. 2021. № 1(76). С. 61-64.
8. Молодцов В., Куреев А. Экспериментальное исследование применимости алгоритма MUSIC для определения направления прихода сигнала // Информационные технологии и системы 2019 (ИТиС 2019): сборник трудов 43-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН. 2019. С. 123-129.
9. Сухов И.А., Акимов В.П. Применение алгоритма MUSIC в пеленгаторах с кольцевыми антенными решетками из направленных элементов // Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 5(157) С. 45-49.