

# Фазированная антенная решетка с широким сектором сканирования для систем связи V2I

Т. Э. Сайфуллин<sup>1</sup>, Е. П. Грахова<sup>2</sup>, А. А. Ишмияров<sup>3</sup>

*Уфимский университет науки и технологий*

*E-mail:* <sup>1</sup> saifullin.talgat00@mail.ru, <sup>2</sup> grakhova.ep@ugatu.su, <sup>3</sup> ishmiyarov.aa@ugatu.su

**Аннотация.** Работа направлена на исследование в области передачи данных между транспортными средствами и радиоузлами на объектах дорожной инфраструктуры в рамках концепции «подключенный автомобиль». В статье представлены результаты измерений прототипа фазированной антенной решетки с управляемой диаграммой направленности в секторе сканирования до 90°. Были изготовлены и измерены прототипы микрополоскового излучателя и линейной антенной решетки, а также собрана установка формирования луча диаграммы направленности. В ходе эксперимента в безэховой камере была подтверждена возможность перестройки главного лепестка фазированной антенной решетки, имеющего ширину 8°, в рамках 10 секторов. Рабочая полоса частот антенного устройства составляет 5619–5857 МГц и совпадает с диапазоном, предназначенным для телематических устройств на транспорте России.

**Ключевые слова:** V2X; V2I; ИТС; микрополосковая патч-антенна; фазированная антенная решетка; управление лучом

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стремительное развитие транспортной индустрии, обусловленное внедрением автономных транспортных средств, в сочетании с растущей популярностью концепции «Интернета вещей», требует усовершенствования и развития существующих технологий связи, для обеспечения надежности и высокоскоростной передачи данных между участниками дорожного движения в интеллектуальных транспортных системах. Концепция «подключенный» автомобиль является инновационной системой беспроводной связи, позволяющей транспортному средству обмениваться данными с другими объектами дорожного движения [1]. Понятие «подключенного» транспорта тесно связано с семейством технологий V2X (Vehicle-to-Everything) [2], которое подразумевает сценарии взаимодействия с дорожной инфраструктурой (V2I), другими транспортными средствами (V2V) и другими различными системами и сетями, способными предоставлять полезную информацию. Это взаимодействие осуществляется с помощью устройств, расположенных на борту автомобиля, которые имеют доступ к данным систем транспортного средства [3]. Развитие концепции «подключенных» автомобилей является важным аспектом для повышения безопасности, эффективности, логистики и комфорта транспорта. Масштабное внедрение сетей 5G будет играть ключевую роль, обеспечивая поддержку большой плотности подключенных устройств, сверхнизкую задержку и высокоскоростную передачу данных, которые необходимы для функционирования связи в реальном времени [4].

При этом область применения технологии управления лучом диаграммы направленности антенн с развитием сетей нового поколения продолжает расширяться. Она основана на использовании матрицы излучателей фазовое распределение, между которыми регулируется для направления максимума полезного излучения в требуемую область [5]. Помимо задач локации, данная технология может быть применима для создания узконаправленных высокоскоростных каналов беспроводной связи к подвижным абонентам.

В ходе исследования был осуществлен аналитический обзор существующих антенных устройств с широким сектором сканирования главного лепестка в горизонтальной плоскости. Так, в работе [6] представлена многолучевая антенная решетка с широкоугольным сканированием, использующая матрицу Батлера для формирования диаграммы направленности. Близкое расположение элементов решетки обеспечивает высокую взаимную связь и высокую перекрестную поляризацию при широких углах сканирования, однако, эта модель предполагает только четыре положения направления луча: минус 87°, минус 20°, 20° и 87°, что не позволяет охватить каждый сектор перекрестка дороги. В статье [7] представлена новая конструкция антенны, которая объединяет концепцию фазирования с возможностью выполнения адаптивного формирования луча при приеме. Устанавливаемые на транспортном средстве антенны обеспечивают всенаправленную диаграмму направленности, чтобы охватывать все углы вокруг движущейся платформы, что было продемонстрировано с использованием матриц и схем фазирования в круговом режиме, но рабочая частота антенны 1,88 ГГц, что делает не применимой данную разработку в ИТС на территории РФ. В другой статье [8] предложена пассивная блочная сотовая антенна (BCA) с реконфигурацией диаграммы направленности и поляризации. Предлагаемая модель требует только фазовращателей и аттенуаторов для управления распределением тока в структуре антенны без использования активных компонентов внутри структуры антенны. Благодаря его двумерной симметрии могут быть получены различные типы поляризации в зависимости от конфигурации активации порта. Разработанная антенна для диапазона 28 ГГц обеспечивает быструю почти круговую настройку луча, но имеет произвольную ширину лепестков, что является не допустимым для перестройки луча по секторам. В исследовании [9] представлена конфигурация интеллектуальной антенны ММО с инновационной технологией формирования луча с использованием нескольких нелинейных конфигураций дипольных решеток. Коэффициенты фазовой задержки передатчика оптимизированы для создания единого луча, направленного на конкретную цель, за счет включения

многочисленных фазовращателей для достижения максимальной направленности. Эта конфигурация также значительно увеличивает коэффициент усиления антенны ММО при низкой стоимости и простоте эксплуатации.

В интеллектуальных транспортных системах также широко применяются алгоритмы машинного обучения (МО) для улучшения управления движением на дорогах, повышения безопасности и оптимизации транспортных систем. Алгоритмы МО доказали свою ценность в анализе огромных массивов данных, поступающих из различных источников, таких как датчики, камеры и подключенные транспортные средства, что позволяет получать важную информацию и принимать решения в режиме реального времени. В статье [10] МО применяется для моделирования и оптимизации антенных устройств, также в работе [11] демонстрируется механическая спиральная фазированная антенная решетка, в которой механически вращающийся элемент управляет направлением микроволнового луча на основе машинного зрения. Предлагается стратегия компьютерного зрения для быстрой настройки фазы и калибровки антенного элемента.

В предыдущем исследовании по развитию V2X технологии в Российской Федерации авторы предложили конфигурацию восьмиэлементной антенной решетки, способной формировать узкий направленный луч [12]. Однако, на следующих этапах испытаний, было решено переработать геометрию разработанной модели, а также уменьшить размеры излучателя в составе антенной решетки, для достижения большего сектора сканирования и минимизировать уровень боковых лепестков (УБЛ). Технические требования при этом остались неизменными: полосу рабочих частот разрабатываемых устройств необходимо было привести в соответствие с диапазоном 5725–5875 МГц, установленным Госкомитетом РФ по радиочастотам для телематических устройств на транспорте [13] и Правилами МСЭ [14]. Геометрический размер ФАР был ограничен стандартными размерами дорожной инфраструктуры [15]. Чтобы обеспечить точную фокусировку радиолуча в направлении движущихся транспортных средств крайне важно было сформировать узкий главный лепесток диаграммы направленности с шириной лепестка до 9°.

В статье представлены результаты дальнейшей работы по реализации адаптивной антенной системы в сценарии взаимодействия транспортных средств с интеллектуальной инфраструктурой (V2I). В частности, проведены измерения прототипов излучателя и антенной решетки, а также элементов схемы формирования луча диаграммы направленности ФАР, а именно планарной схемы деления сигнала и планарных управляемых фазовращателей. Далее, в статье представлена экспериментальная верификация возможности управления главным максимумом ФАР, продемонстрировано наведение радиолуча по десяти выбранным секторам в области сканирования до 90°. Кроме того, был апробирован интеллектуальный алгоритм адаптивного управления радиоканалом на основе топологии дорог в зоне обслуживания, скорости и плотности движения транспортных средств, сохраняя при этом совместимость с предложенными конфигурациями ФАР [16].

## II. ПРОТОТИП ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ФОРМЕ РОМБА И ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

### A. Микрополосковый Излучатель

Для снижения габаритных размеров ФАР и уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности было принято решение рассмотреть новый вариант формы излучателя в виде ромба, характеризующегося меньшей шириной излучающей поверхности. Имитационное моделирование излучателя осуществлялась в среде CST Studio Suite с дальнейшей верификацией результатов в среде Ansys HFSS. В качестве материала подложки был выбран стеклотекстолит F4BM255 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,55$ . Толщина медного слоя составила 0,035 мм. Питание излучателя осуществляется посредством микрополоскового фидера, имеющего ступень уширение вблизи разъема для улучшения характеристик согласования. Габаритные размеры 32,21 мм × 52,50 мм Излучатель согласован на сопротивление 50 Ом. На основании разработанной модели на производстве ООО «Резонит» были изготовлены прототипы излучателя в количестве 6 штук (рис. 1) и измерены основные технические характеристики. В табл. I представлены размеры прототипа.

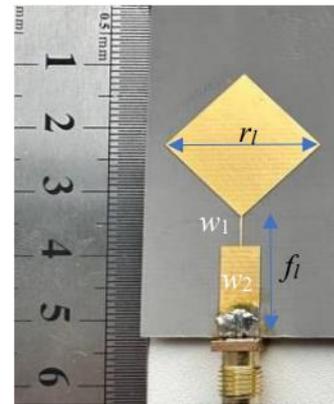


Рис. 1. Прототип излучателя в форме ромба

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Измерение	Параметр	Значение, мм
f1	Длина фидера	20,10
w1	Ширина фидера 1	0,32
w2	Ширина фидера 2	5,58
r1	Ширина излучающего элемента	22,31
h	Толщина подложки	1,524
t	Толщина металлизации	0,035

Результаты измерения обратных потерь (S11) и КСВН с помощью Fieldfox N9917A для прототипа излучателя представлены на рис. 2–3. Рабочая полоса излучателя составляет 272 МГц (от 5685 до 5957 МГц) с резонансом на частоте 5818 МГц. КСВН не превышает значения 2,0 во всем диапазоне рабочих частот.

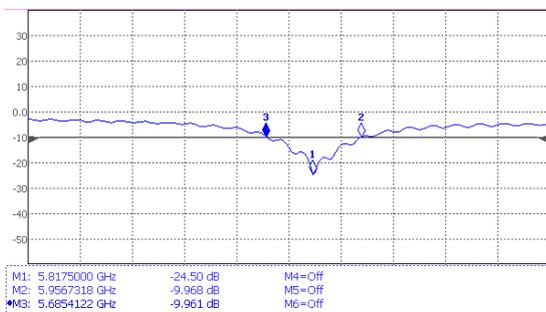


Рис. 2. Обратные потери ( $S_{11}$ ) прототипа излучателя

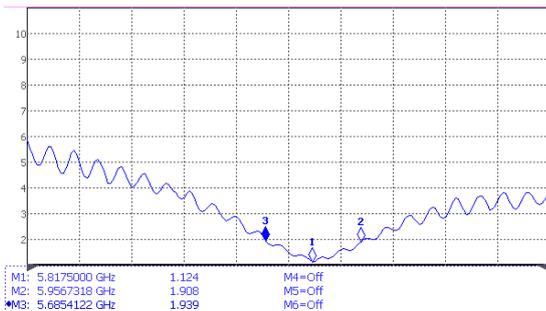


Рис. 3. КСВН прототипа излучателя

### В. Линейная 16-элементная антенная решетка

Далее, на основе излучателя в форме ромба была разработана линейная 16-элементная антенная решетка. Прототип АР изготовлен в ООО «Резонит». В качестве подложки использован тот же материал, что и для элементарного излучателя – стеклотекстолит F4BM255 с аналогичными характеристиками. В качестве финишного покрытия так же было применено иммерсионное золото. Габаритные размеры прототипа 16-элементной линейной антенной решетки (рис.4) составили 448,0 мм × 52,5 мм, шаг между центрами портов излучающих элементов – 28 мм. Прототип был оснащен разъемами типа SMA, после чего на спектроанализаторе Fieldfox N9917A были измерены обратные потери (рис. 5).

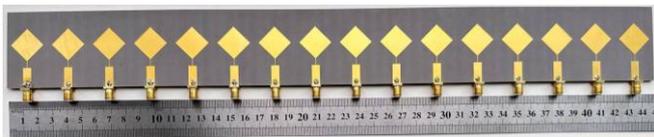


Рис. 4. Прототип линейной 16-элементной АР

Согласно результатам измерения обратных потерь, рабочая полоса составила 239 МГц, резонансная частота антенной решетки 5735 МГц. Значения КСВН для излучателей на резонансной частоте не превышают 1,15. Антенная решетка согласована на сопротивление 50 Ом. Взаимное влияние элементов решетки в среднем не превышает -22 дБ.

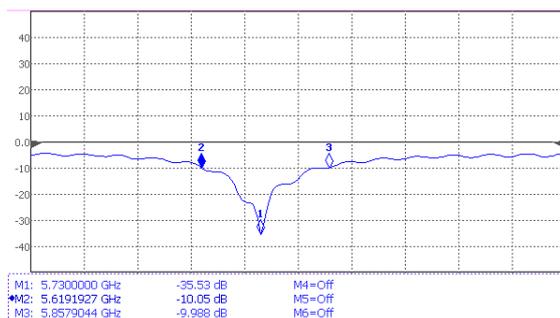


Рис. 5. Обратные потери ( $S_{11}$ ) прототипа АР

Для изготовленного прототипа антенной решетки предварительно было проведено измерение диаграммы направленности (ДН) в безэховой камере на базе ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». ДН решетки имеет ярко выраженный главный лепесток с шириной луча 8 градусов по уровню -3 дБ на резонансной частоте (рис. 6).

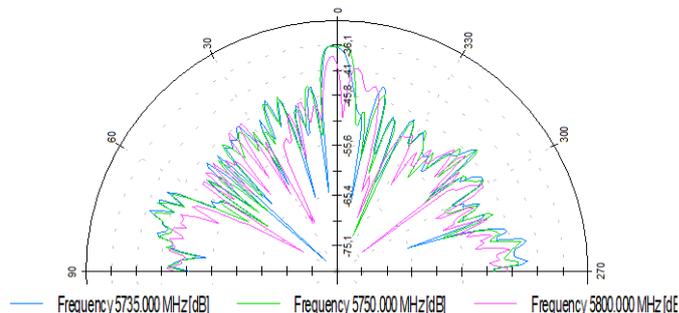


Рис. 6. Диаграмма направленности АР в горизонтальной плоскости, в нормальном режиме излучения

Таким образом, полученные результаты измерений прототипа антенной решетки полностью удовлетворяют поставленным требованиям с точки зрения частотного регулирования, габаритных размеров и ширины главного лепестка. Следующим этапом исследования станет экспериментальная апробация возможности управления главным максимумом ФАР и направления радиолуча в выбранные сектора.

## III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧОМ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

### А. Лабораторная установка ФАР

Для апробации возможности управления диаграммой направленности в секторе до 90° была собрана лабораторная установка ФАР. На рис. 7 представлена схема конфигурация ФАР, включающая в себя два блока: сегмент формирования диаграммы направленности и линейную антенную решетку, рассмотренную выше.

В соответствии со схемой, сигнал от генератора СВЧ-диапазона R&S SMR20 (на резонансных частотах антенных решеток и двух дополнительных значений из рабочего диапазона) подается на каскад из двух усилителей Mini-Circuits ZX60-6013E-S+ с коэффициентом усиления 15 дБ (на частоте 5800 МГц) для компенсации потерь мощности сигнала на элементах диаграммообразующей схемы. Далее он поступает на планарную схему деления 1×16, с помощью ВЧ-кабелей, подключенных к индивидуальному управляемому планарному фазовращателю, который на основе решения алгоритмов машинного обучения с помощью микроконтроллера осуществляет управление фазовым сдвигом и перестройкой положения главного максимума ФАР. Далее с выходного порта фазовращателей через ВЧ-кабель сигнал подается на входные порты излучающих элементов антенной решетки. Распределение фазы на входах излучателя определяется решением алгоритма МО, отслеживающего положение автомобиля в секторе обслуживания. Алгоритм способен из сообщения запроса и существующих данных о секторе дорожного перекрестка определить точное местоположение «подключенного» автомобиля и сформировать битовую последовательность для управления фазовращателями и установления выделенного радиоканала, по направлению к

транспортному средству, посредством адаптивной антенной системой. Подробнее о работе интеллектуального алгоритма описано в статье [16].

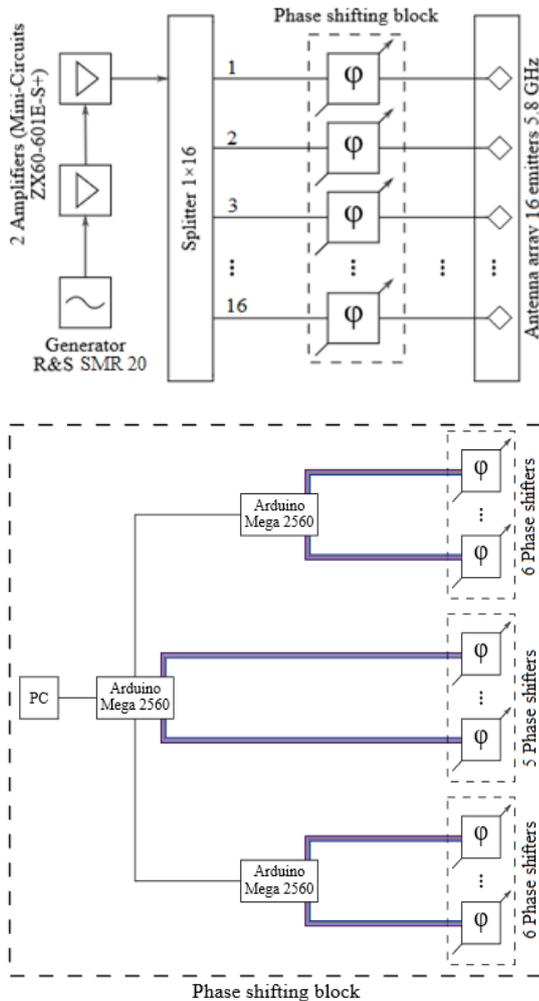


Рис. 7. Схема конфигурации ФАР

Решение алгоритма МО реализуют микроконтроллеры Arduino Mega 2560 на процессоре ATmega 2560. Для обеспечения достаточной нагрузочной способности системы управления использовано три МК, соединенных между собой по протоколу (I2C): один МК выступает в роли ведущего, два других – ведомыми. Использование протокола I2C позволило синхронизировать МК между собой и обеспечило их использование в схеме как единого модуля управления. Подключение было реализовано следующим образом: МК подключались к выводам 10 В и 0 В (заземлению) лабораторного блока питания; заземление всех фазовращателей производилось от того же контура. Между ведущим и ведомыми МК были проведены линии последовательного тактового вывода (SCL) и последовательного вывода данных (SDA); управляющие входы фазовращателей были подключены к цифровым выходам микроконтроллеров. Программирование микроконтроллеров осуществлялось в среде разработки Arduino IDE на языке программирования Arduino Wiring, основанном на C++. Фотография установки в безэховой камере Уральского федерального университета представлена на рис. 8.

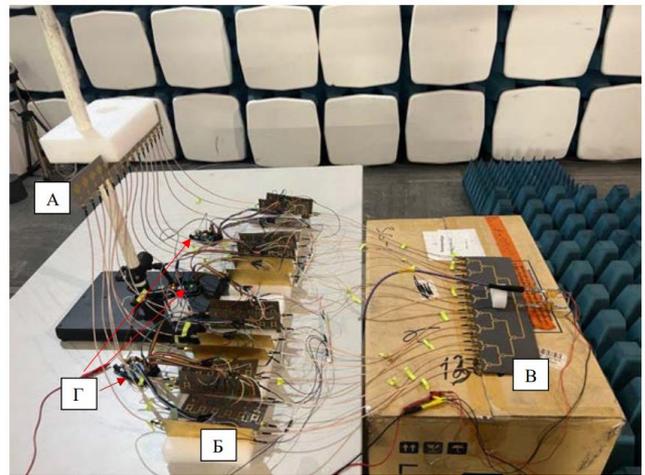


Рис. 8. Установки лабораторного макета ФАР в безэховой камере Уральского федерального университета

### В. Результаты эксперимента

Как уже было упомянуто, испытания проводились на базе Уральского федерального университета в безэховой камере 2-го класса Rainford EMC3. Были получены результаты десяти итераций измерения ДН в наклонном режиме излучения. Для каждого сектора осуществлялась перепрошивка модуля интеллектуального управления для создания требуемого фазового распределения, и фиксировалось положение главного максимума, факт его попадания в целевой сектор. В табл. II проведена оценка ширины и положения главного максимума, а также сравнение с образом результата.

ТАБЛИЦА II. ЦЕЛЕВОЕ И ИЗМЕРЕННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДЛЯ СЕКТОРОВ

Номер сектора	Целевое значение	Измеренное значение
1	-40,5	-44
2	-31,5	-34
3	-22,5	-20
4	-13,5	-13
5	-4,5	-2
6	4,5	1
7	13,5	15
8	22,5	21
9	31,5	31
10	40,5	44

На рис. 9–10 представлены диаграммы направленности ФАР для 10 секторов положения главного лепестка. Результаты измерений подтвердили возможность управления лучом ФАР и направления главного максимума в определенные сектора с помощью разработанной схемы формирования луча и блока фазовой настройки. Однако в некоторых секторах наблюдались отклонения в целевом направлении главного лепестка и высокие значения боковых лепестков. Это особенно актуально для секторов, близких к нормальному направлению ФАР. Еще одной особенностью стало то, что габариты безэховой камеры не позволяют оценить излучение антенны в дальней зоне. Тем не менее, полученные результаты позволяют провести корреляцию между целевой и измеренной формой ДН, что достаточно для апробации предложенных решений.

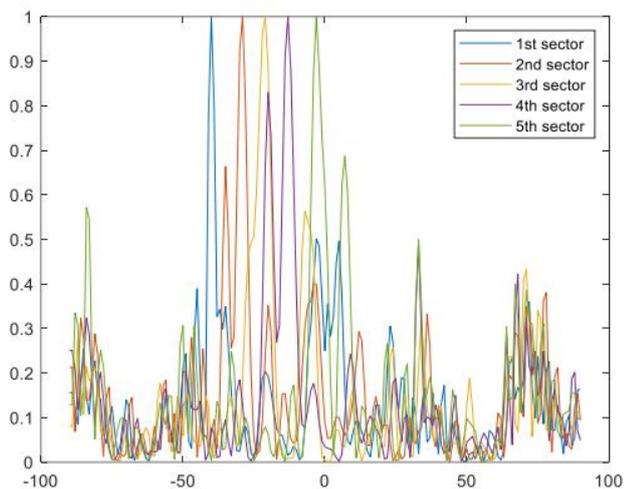


Рис. 9. Диаграмма направленности ФАР в ближней зоне в горизонтальной плоскости для секторов 1–5

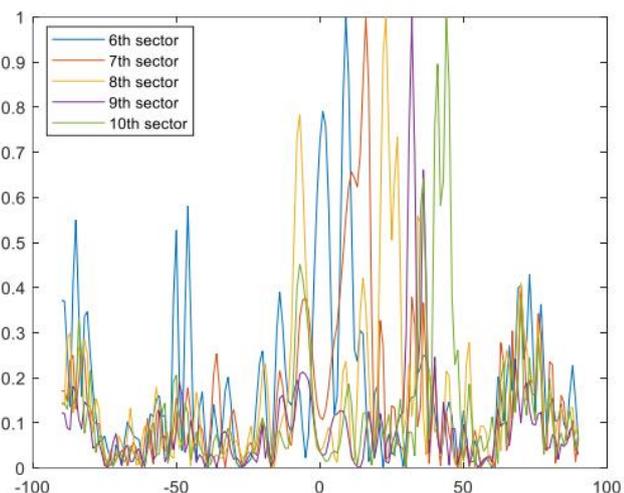


Рис. 10. Диаграмма направленности ФАР в ближней зоне в горизонтальной плоскости для секторов 6–10

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы было проведено исследование по управлению лучом диаграммы направленности фазированной антенной решетки для интеллектуальных транспортных систем. Были разработаны и измерены прототипы излучателя и антенной решетки, а также собрана установка формирования диаграммы направленности, включающая планарный делитель и блок фазовой настройки, управляемый микроконтроллером Arduino Mega 2560, реализующим решения алгоритмов машинного обучения. В ходе эксперимента, в безэховой камере, была подтверждена возможность управления главным лепестком ФАР шириной  $8^\circ$  в рамках десяти секторов. Рабочая полоса частот фазированной антенной решетки составляет 5619–5857 МГц и совпадает с диапазоном, предназначенным для телематических устройств на транспорте России. Разработанный прототип адаптивной антенной системы может быть применен для создания надежного управляемого радиоканала с транспортными средствами на дорогах общественного пользования, а также в различных приложениях V2X.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Состояние и перспективы развития рынка подключенных транспортных средств в России и мире. Аналитический отчет 2023. <https://files.fm/f/9xvs8eqdn>.
- [2] Сектор стандартизации электросвязи МСЭ-Т X. 1372. Серия X: Сети передачи данных, взаимосвязь открытых систем и безопасность. Издание 1.0, 26.03.2020 года. <http://handle.itu.int/11.1002/1000/14091>.
- [3] Designing C-V2X Communication Systems: Key Engineering Considerations and Best Practices. <https://www.wevolver.com/article/c-v2>.
- [4] [https://habr.com/ru/companies/qualcomm\\_russia/articles/454130/](https://habr.com/ru/companies/qualcomm_russia/articles/454130/)
- [5] <https://www.networkworld.com/article/967954/beamforming-explained-how-it-makes-wireless-communication-faster.html>
- [6] M. Kamran Ishfaq et al., "Compact Wide-Angle Scanning Multibeam Antenna Array for V2X Communications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 11, pp. 2141-2145, Nov. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2021.3100349.
- [7] K.E. Kolodziej, P. Dufilie, D. Bragdon, W.F. Moulder and B.T. Perry, "Vehicle-Mounted Antenna with Full-Duplex and Beamforming Capabilities," in *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, Denver, CO, USA, pp. 776-777, 2022, doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886653.
- [8] J. Park, M. Choo, S. Jung, D. Choi, J. Choi, and W. Hong, "A Software-Programmable Directivity, Beamsteering, and Polarization Reconfigurable Block Cell Antenna Concept for Millimeter-Wave 5G Phased- Array Architectures," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, pp. 146-154, 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3008642.
- [9] K. Pirapaharan, W.H. Sasinda, C. Prabhashana, S.P. Pramuka Medaranga, P. Ratnamahilan, P. Hoole, and X. Fernando, "A New Generation of Fast and Low-Memory Smart Digital/Geometrical Beamforming MIMO Antenna," in *Electronics*, vol. 12, no. 7, 2023, doi: 10.3390/electronics12071733.
- [10] M. Reza Ghaderi and N. Amiri, "Application of Machine Learning Techniques in Phased Array Antenna Synthesis: A Comprehensive Mini Review", *JCM*, pp. 629-642, Oct. 2023, doi: 10.12720/jcm.18.10.629-642.
- [11] Guo, S. Qiu, T. Ni, B. Wang and Q. Liu, "Fast Phase Recognition of Mechanical Helical Phased Array Antenna Element Based on Line-Scan Machine Vision," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023, doi: 10.36227/tehrxiv.23653386.v1.
- [12] E. Saifullin, E.P. Grakhova, A.A. Ishmiyarov and D.A. Letavin, "The Prototype of the Eight-element Antenna Array for V2I Communication Systems," *2023 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 52-55, doi: 10.1109/ADMInC59462.2023.10335471
- [13] Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации от 18 сентября 2019 года №1203-47.
- [14] Регламент МСЭ от 27 ноября 2015.
- [15] Технические средства организации дорожного движения. Знаки дорожные. Общие технические требования. ГОСТ Р 52290 — 2004. [https://idn500.ru/upload/iblock/da3/gost\\_52290\\_2004\\_znaki\\_dorozhnye.pdf](https://idn500.ru/upload/iblock/da3/gost_52290_2004_znaki_dorozhnye.pdf)
- [16] E. Lopukhova, A. Abdunagimov, G. Voronkov, R. Kutluyarov, and E. Grakhova, "Universal Learning Approach of an Intelligent Algorithm for Non-GNSS Assisted Beamsteering in V2I Systems," in *Information*, vol. 14, no. 2: 86, 2022, doi: 10.3390/info14020086