

ПРОТОТИП АНТЕННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Т. Э. Сайфуллин¹, Е. П. Грахова²

¹saifullin.talgat00@mail.ru, ²grakhova.ep@ugatu.su

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В статье представлены результаты проектирования микрополосковых излучателей для фазированной антенной решетки, обладающей широкой перестройкой луча диаграммы направленности, для приложений V2X. Было предложено две модели элементарного излучателя: на подложке Rogers 4350B с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=6,66$ и оптимизированная модель на подложке ФАФ-4Д $\epsilon=2,7$. Излучающий элемент имеет форму половины восьмиугольника. Такая конструкция обеспечивает хорошее согласование в полосе частот 5,725–5,875 ГГц, выделенной для телематических устройств на транспорте. Предлагаемые прототипы излучателя удовлетворяют требованиям по коэффициенту отражения –10 дБ (S11) на центральной частоте 5,81 ГГц с глубиной резонанса до минус 45 дБ. Коэффициент усиления излучателей достигает 4,47 дБи.

Ключевые слова: V2X, V2I, ITS, микрополосковая технология, патч-антенны.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из самых существенных проблем транспортного сектора является растущее число погибших и пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях. Интеллектуальные транспортные сети (ИТС) и семейство технологий V2X (Vehicle-to-Everything) созданы с целью повысить безопасность на дорогах и способны стать основой для реализации усовершенствованной системы помощи водителю и системы автономного управления для транспортных средств [1]. V2X – технологии связи, позволяющие транспортным средствам взаимодействовать со всеми участниками дорожного движения и «подключенными» объектами дорожной инфраструктуры. В настоящее время разработаны сценарии взаимодействия между транспортными средствами (V2V), автомобилями и пешеходами (V2P), автомобилями и сетями (V2N), автомобилями и инфраструктурой, например зданиями и светофорами (V2I).

В связи с тем, что система V2X напрямую связана с безопасностью человека, к ней предъявляются повышенные требования: высокая надежность соединения, высокая скорость передачи данных, сверхмалая задержка, поддержка большой плотности подключенных устройств. Одной из ключевых технологий, в перспективе способной реализовывать большинство выдвигаемых требований, является управление лучом диаграммы направленности антенн (beamsteering). Данная технология нашла широкое применение в системах связи стандарта 5G, а также видится одной из важнейших для развертывания сетей 6G. Управление лучом реализуется на основе многоэлементных фазированных антенных решеток (ФАР) путем изменения фазы сигналов, питающих элементы решетки. Направление луча диаграммы направленности (ДН) динамически рассчитывается интеллектуальным контроллером по мере перемещения транспортного средства, эффективно отслеживая пользователя.

ИЗВЕСТНЫЕ ТИПЫ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ V2X

В настоящее время активно разрабатываются различные варианты конфигураций антенных устройств для систем V2X на основе микрополосковой технологии. Так, в работе [2] представлена планарная антенна LTE / 5G-MIMO с рабочим диапазоном частот до 6 ГГц, интегрированная с ФАР для приложений V2X. Предлагаемая антенна демонстрирует высокий уровень развязки элементов системы без каких-либо развязывающих структур за счет использования компоновки многоконтурных антенн на основе анализа распределения тока в плоскости заземления. В статьях [3-4] представлены ФАР с перестраиваемой между тремя состояниями ДН. Путем включения и выключения паразитных элементов через PIN-диоды, выполняющие функцию управляемых переключателей, удалось получить в общей сложности три различных режима вещания: один всенаправленный луч для широкополосной передачи и два узконаправленных луча в прямом и обратном направлениях движения автомобиля. В работе [5] представлена конструкция 6-элементной антенной решетки для различных диапазонов частот 58–60 ГГц, 65–68 ГГц, 72–77 ГГц. Всенаправленная ДН была получена путем покрытия линии питания кремнием толщиной 1 мм, который ограничивал нежелательное паразитное излучение. В работах [6-7] представлены системы на основе ФАР, работающие на частоте 5,9 ГГц и имеющие широкий угол сканирования благодаря использованию закороченных полуэллиптических элементов. В работе [8] показана антенна для V2X, состоящая из двух прямых полос и одной волнообразной линии, реализованной на однослойной печатной плате FR4. Извилистая линия может возбуждать токи, противоположные по фазе токам в прямых полосах, что приводит к тому, что антенна излучает в основном в азимутальной плоскости. Реализовано усиление 5,8 дБи в полосе частот 5,7–6 ГГц при использовании конфигурации решетки 1x2. Похожая конфигурация была использована в работе [9]. За счет использования двухпортовой широкополосной антенны MIMO авторам удалось реализовать коэффициент усиления 2,26 дБи в полосе 4,85–7,32 ГГц. Также для проектирования систем V2X является популярным диапазон 28 ГГц. Так, в работах [10–11] представлены антенны для данного диапазона с приложением в системах V2X.

Однако в соответствии с решением Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) РФ, для телематических устройств на транспорте была выделена полоса частот диапазоном 5,725–5,875 ГГц [12], что не соответствует некоторым зарубежным стандартизированным диапазонам. К тому же вышеперечисленные устройства демонстрируют несущественные возможности управления беспроводным каналом. Таким образом, стоит актуальная задача разработки антенного устройства для систем V2X, соответствующего российским стандартам, а также обладающего широким диапазоном перестройки луча ДН.

Для реализации ФАР необходимо сформулировать требования к её элементарному излучателю. Рабочая полоса частот излучателя должна находиться в диапазоне 5,725–5,875 ГГц. Размер ФАР не должен превышать габаритов стандартных объектов дорожной инфраструктуры, что накладывает ограничения на размер излучателя. ДН излучателя должна быть максимально ненаправленной, с большой шириной главного лепестка для минимизации уровня боковых лепестков (УБЛ). Для ДН ФАР необходимо, чтобы ширина главного лепестка была достаточно узкой ($\leq 9^\circ$) для наиболее точного слежения за автомобилем, движущегося с максимальной разрешенной скоростью.

Рис. 1 иллюстрирует концепцию реализации системы управления лучом ДН антенной решетки для случая V2I. Размещение ФАР предполагается на объектах дорожной инфраструктуры и рамочных дорожных конструкциях. Для кругового обзора 360 градусов подразумевается установка четырех ФАР, осуществляющих сканирование в секторе по 90 градусов каждый.

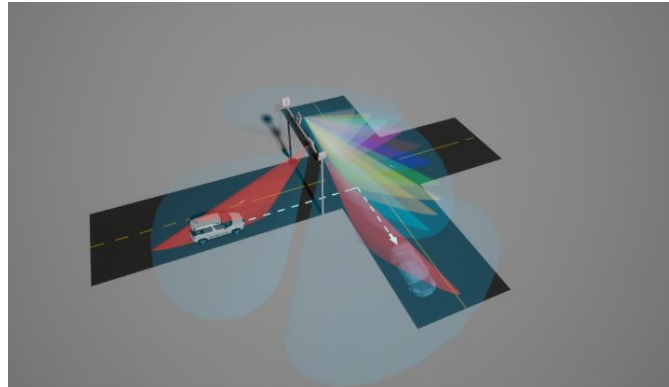


Рис. 1. Концепция реализации системы управления лучом ФАР для V2X

ПРОТОТИП АНТЕННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Имитационное исследование и оптимизация формы устройства осуществлялись в среде моделирования Ansys HFSS. Была выбрана микрополосковая технология, поскольку она имеет ряд преимуществ. Во-первых, она позволяет реализовать низкопрофильные малогабаритные антенны, во-вторых, данная технология подходит для СВЧ диапазона. Было проведено несколько предварительных циклов моделирования для выбора общей формы излучателя, наилучшие характеристики были показаны излучателями с формами половины правильного восьмиугольника, разрезанного по линии, проходящей через его центр и параллельной его стороне.

Изначально в качестве подложки был выбран материал Rogers 4350B с толщиной диэлектрика 1,524 мм и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3,66$. Толщина медного слоя металлизации составляла 0,018 мм. Питание излучателя осуществляется с помощью микрополоскового фидера длиной 19,45 мм и шириной 2,82 мм. Плоскость заземления располагается на обратной стороне подложки и совпадает с ней по площади. Внешний вид и размеры первой версии излучателя приведены на рис 2.

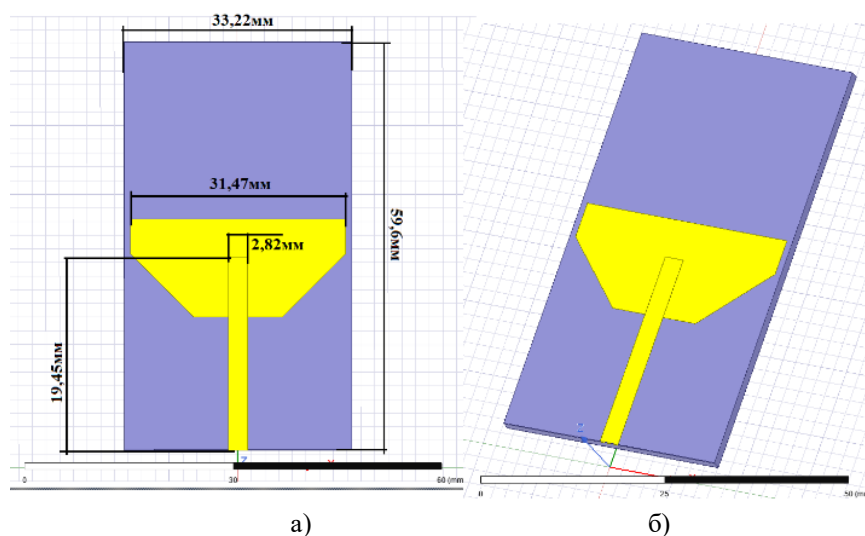


Рис. 2. Имитационная модель первой версии микрополоскового излучателя V2X: а) вид спереди; б) изометрия

Согласно полученным результатам, рабочая полоса первой версии излучателя составила 220 МГц (5,93–5,71 ГГц) с резонансом на частоте 5,82 ГГц (рис. 3).

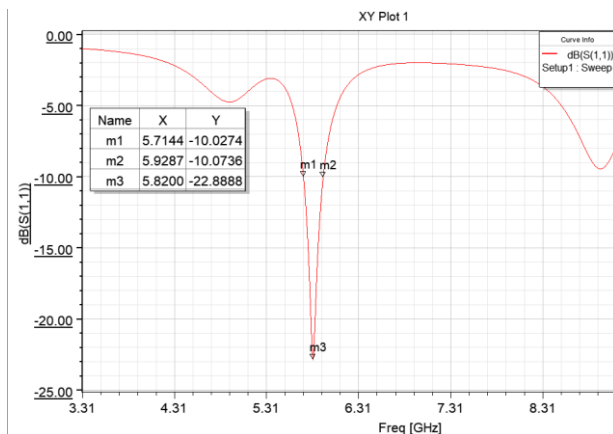


Рис. 3. Обратные потери первой версии излучателя

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) представлен на рис.4 и изменяется в диапазоне 1.92–1.04 в пределах рабочей полосы антенны.

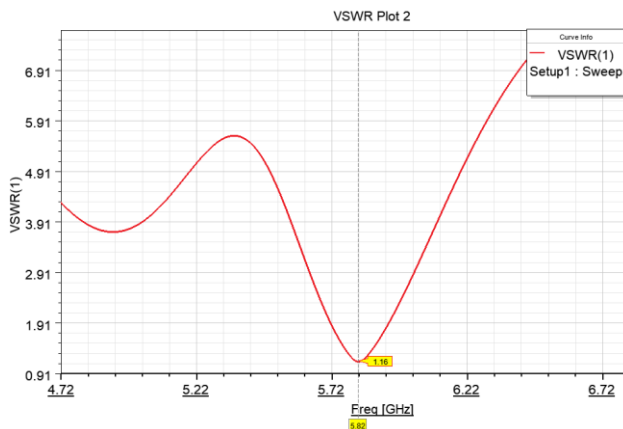


Рис. 4. КСВН первой версии излучателя

ДН излучателя в горизонтальной плоскости имеет ширину главного максимума 115 градусов по уровню -3 дБ с усилением 3,1 дБи.

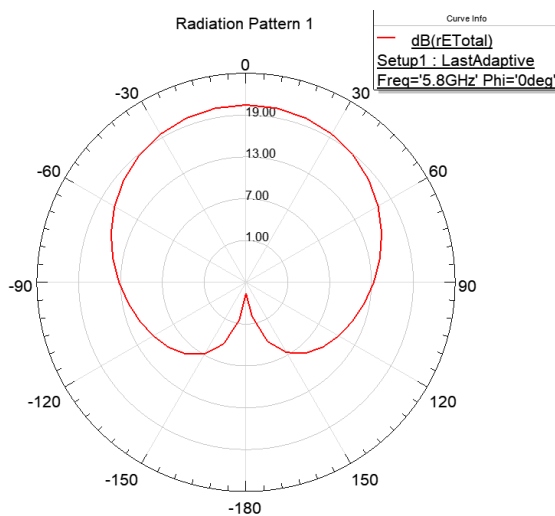


Рис. 5. ДН излучателя на частоте 5,8 ГГц

На основе разработанного излучателя была составлена линейная ФАР для сектора сканирования 90 градусов. Антенная решетка состоит из 14 элементов, центры которых отстоят друг от друга на расстояние 31,47 мм, а получившиеся при этом наложения элементов были электрически изолированы друг от друга на 0,15 мм. Габариты ФАР составляют 444,3 мм x 59,6 мм, что не превышает размеров дорожных знаков, таким образом ее можно использовать для размещения на стандартных дорожных конструкциях. Поворот главного максимума ДН на 90 градусов достигается путем подачи равноамплитудного сигнала с набегом фазы в 160 градусов на элементы ФАР. На рис. 6 представлены ДН ФАР в случае максимального отклонения главного максимума. Коэффициент усиления ФАР составляет 14,6 дБи, а ширина луча равна 8,33 градуса. Уровень боковых лепестков для данной реализации ФАР существенен, однако может быть снижен за счет неравноамплитудного возбуждения элементов решетки, или же их неэквидистантного расположения.

Полученные результаты разработки антенного устройства для систем ИТС полностью удовлетворяют поставленным требованиям для реализации высокоскоростных и надежных каналов связи между транспортным средством и базовой станцией в системах V2X. Однако в связи с уходом зарубежных компаний с российского рынка, а также прекращением поставок сырья и материалов для производства печатных плат и увеличением стоимости ввозных компонентов, требуется оптимизировать исходную модель излучателя с учетом технических возможностей российских платформ, путем замены импортного стеклотекстолита Rogers 4350В на отечественный аналог ФАФ-4Д.

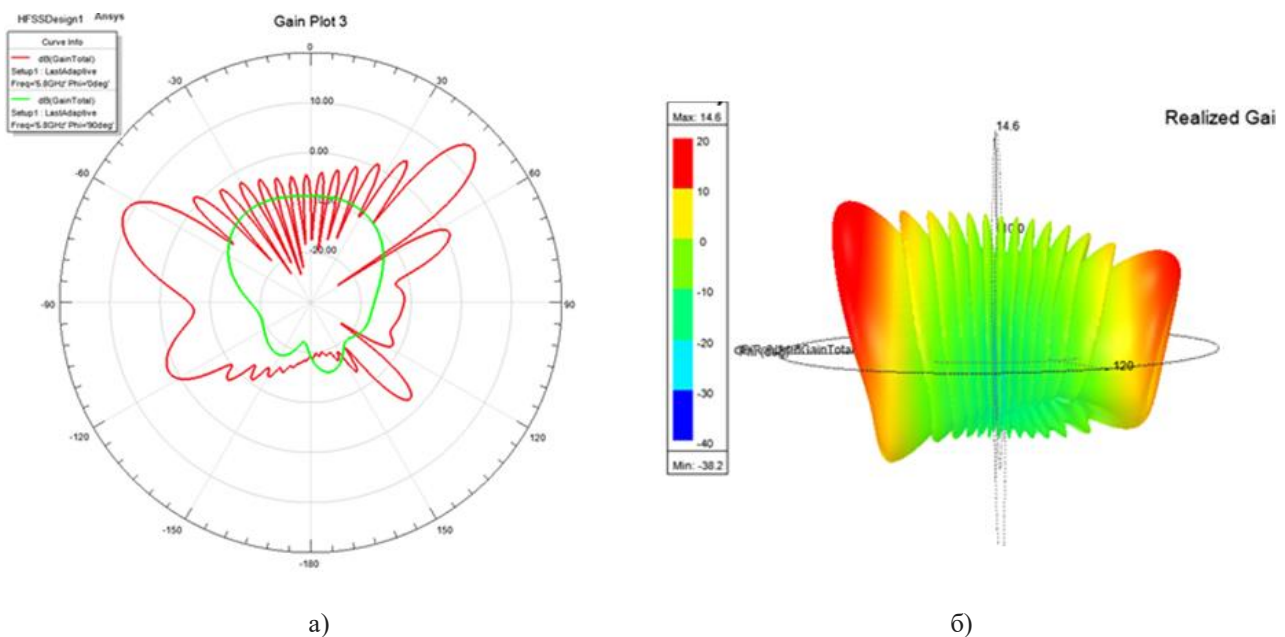


Рис. 6. Диаграммы направленности ФАР:

а) в горизонтальной плоскости – зеленая линия, в вертикальной плоскости – красная линия; б) 3D модель

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ V2X НА ПОДЛОЖКЕ ФАФ-4Д

В ходе эксперимента первым делом был поведен анализ стеклотекстолитов российских образцов, аналогичных по характеристикам стеклотекстолиту Rogers 4350В. Наилучшим решением стало использование в качестве подложки излучателя ФАФ-4Д с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,7$. Преимуществами использования данного стеклотекстолита являются:

- невысокая цена;
- хорошие диэлектрические свойства;
- высокая устойчивость к воздействию неблагоприятных климатических условий;
- хорошая гигроскопичность.

Имитационное моделирование поведения излучателя было проведено в программной среде CST Studio Suite. За основу был взят исходный прототип излучателя в форме половины восьмиугольника. Изменив материал подложки на ФАФ-4Д, была проведена оптимизация параметров, геометрических форм и размеров излучателя. В качестве целевой функции было выбрано значение коэффициента S_{11} в полосе частот 5,725–5,875 ГГц на уровне ниже минус 10 дБ. Переменными оптимизации выступали параметры, приведенные в табл. 1. Также в таблице приведены оптимальные значения этих параметров.

Таблица 1

Параметры оптимизации	Описание	Итоговое значение
fl	Длина фидера	16,3 мм
h	Толщина подложки	1,5 мм
t	Толщина металлизации	0,018 мм
w	Ширина фидера	2,2 мм
sw	Ширина подложки	37,49 мм
sl	Длина подложки	61,31 мм
k ₁	Коэф. ширины антенны	1,1
k ₂	Коэф. длины антенны	0,5
la	Длина волны	32,6 мм

После оптимизации были получены наилучшие значения, удовлетворяющие целевой функции. Получившийся в результате прототип элемента ФАР представлен на рис. 7.

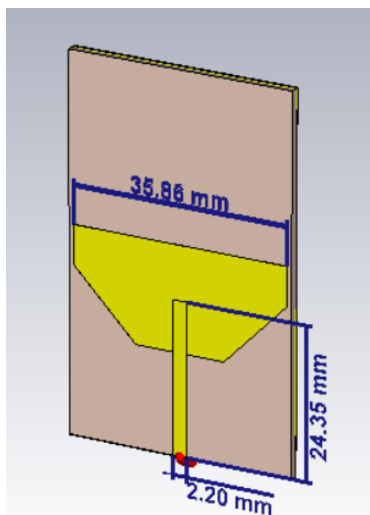


Рис. 7. Имитационная модель прототипа микрополоскового излучателя на подложке ФАФ-4Д

Питание осуществляется с помощью микрополоскового фидера шириной 2,2 мм. Плоскость заземления размещается на обратной стороне подложки и совпадает с ней по площади. Толщина подложки 1,5 мм. Медный слой металлизации составляет 18 мкм. Габаритные размеры излучателя оптимизированы под эффективную длину волны сигнала в диэлектрике – la и составляют 61,31 мм x 37,49 мм. Излучатель согласован на сопротивление 50 Ом.

График зависимости обратных потерь от частоты представлен на рис. 8. Из него следует, что ширина рабочей полосы антенны по уровню минус 10 дБ составляет 200 МГц (от 5,717 до 5,913 ГГц). Резонанс достигается на частоте 5,812 ГГц, глубина – минус 44 дБ.

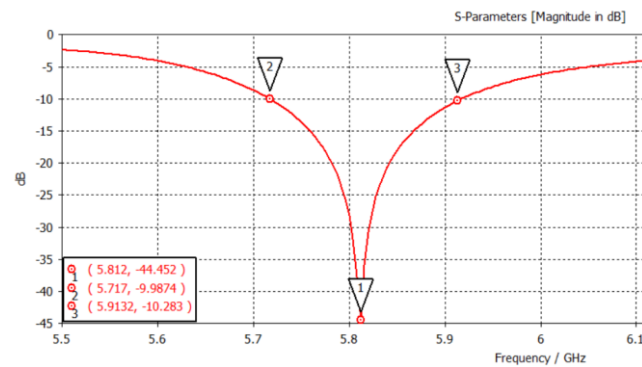


Рис. 8. Обратные потери (S_{11}) прототипа

На рис. 9 показан график зависимости КСВН от частоты, который в рабочей полосе изменяется в пределах от 1,01 до 1,91.

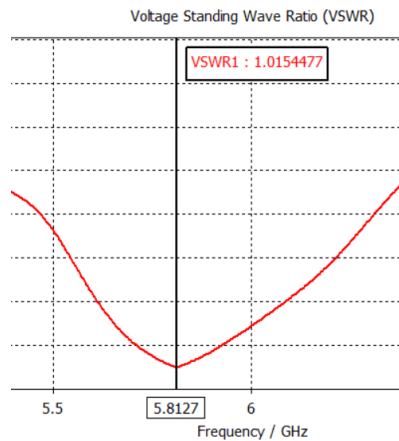


Рис. 9. КСВН

Рис.10 демонстрирует ДН антенны на частоте 5,81 ГГц. В горизонтальной плоскости антенна имеет главный лепесток шириной 128 градусов и коэффициент усиления 4,47 дБи.

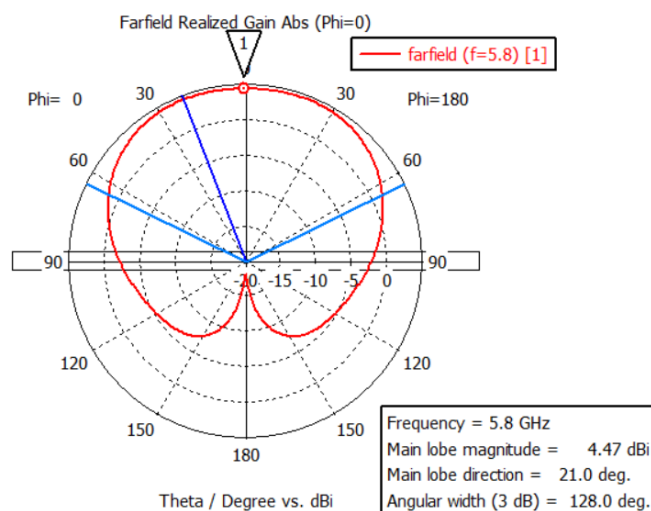


Рис. 10. ДН прототипа на частоте 5,81 ГГц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты проектирования микрополосковых излучателей для фазированных антенных решеток, обладающих широкой перестройкой луча диаграммы направленности, для приложений V2X. Были предложены два прототипа элементарных излучателей на основе подложки Rogers 4350B и оптимизированная модель на подложке ФАФ-4Д. Диапазон рабочих частот в обоих случаях соответствует диапазону, выделенному в РФ для телематических устройств на транспорте: 5725 – 5875 МГц. Полученные характеристики оптимизированной модели имеют хорошую корреляцию с первоначальным прототипом и полностью удовлетворяют поставленным требованиям по ширине главного лепестка и коэффициенту усиления. Таким образом, полученные результаты разработки антенных устройств для приложений ИТС полностью удовлетворяют поставленным в работе задачам и могут быть использованы для реализации высокоскоростных и надежных каналов связи между транспортным средством и базовой станцией в системах V2X.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ishmiyarov A. A. et.al. Microstrip Emitter Design for Application in V2X Beamsteering Systems, 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2022. Pp. 279-284, doi: 10.1109/EDM55285.2022.9855024.
2. Ko M., Lee H., and Choi J. Planar LTE/sub-6 GHz 5G MIMO antenna integrated with mmWave 5G beamforming phased array antennas for V2X applications// IET Microwaves, Antennas and Propagation. Vol. 14. No. 11. 2020, doi: 10.1049/iet-map.2019.0849.
3. Rongas D. K., Paraskevopoulos A. S., Marantis L. D., and Kanatas A. G. An integrated shark-fin reconfigurable antenna for V2X communications// Progress In Electromagnetics Research C. Vol. 100. 2020. doi: 10.2528/pierc19112005.
4. Duraj D., Rzymowski M., Nyka K., and Kulas L. ESPAR Antenna for V2X Applications in 802.11p Frequency Band. 2019.
5. Roy P., Vishwakarma R. K., Jain A., and Singh R. Multiband millimeter wave antenna array for 5G communication. 2016. doi: 10.1109/ICETESES.2016.7581361.
6. Kim. J. W., Kim S., Cho H., Ahn B. K., Kim J. W., and Yu J. W. Wide-angle scanning phased-array system using arc-shortened half elliptic elements// Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2021. doi: 10.1080/09205071.2021.1962739.
7. Kamranishfaq M. et al. Compact Wide-Angle Scanning Multibeam Antenna Array for V2X Communications// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2021. doi: 10.1109/LAWP.2021.3100349.
8. Chen C., Gan H., Peng H. L., Peng C., Xu G. H., and Mao J. F. High Performance V2X Antennas Designed in Integrated Shark-fin Environment. 2020. doi: 10.1109/ICMMT49418.2020.9386534.
9. Kulkarni. J., Sim C. Y. D., and Deshpande V. Low-Profile, Compact, Two Port MIMO Antenna Conforming Wi-Fi-5/Wi-Fi-6/V2X/DSRC/INSAT-C for Wireless Industrial Applications. 2020. doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342514.
10. Nasr. A., Sarabandi K., and Takla M. Multi-beam Dual-Polarized Windshield Antenna with Wide Elevation Coverage for 5G V2X Applications. 2020. doi: 10.1109/IEEECONF35879.2020.9329767.
11. Hasturkogblu S. and Lindenmeier S. An Automotive Antenna Set at 26.5 GHz for 5G-Mobile Communication. 2018. doi: 10.1109/ICMIM.2018.8443487.
12. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации от 18 сентября 2019 г. №1203-47.

ОБ АВТОРАХ

САЙФУЛЛИН Талгат Эдуардович магистрант. каф. ТС. Дипл. бакалавр (УГАТУ, 2022).

ГРАХОВА Елизавета Павловна, зав. НИЛ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники», доцент каф. ТС. Дипл. инженер (УГАТУ, 2012). К-т техн. наук по сист., сетям и уст-вам телеком. (УГАТУ, 2016). Иссл. в обл. интег. фотоники и сист. Интернета вещей.

METADATA

Title: The prototype of an antenna emitter for application in the intelligent transportation systems.

Authors: I. A. Schepotyev¹, G. S. Voronkov²

Affiliation: Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹saifullin.talgat00@mail.ru, ²grakhova.ep@ugatu.su.

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (28), pp. 114-122, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This article presents the results of designing microstrip detectors for phased array antennas with a wide beam adjustment of the radiation pattern for V2X applications. Two models of elementary emitters based on a Rogers 4350B substrate with a

dielectric constant of $\epsilon=6.66$ and an optimized model on a FAF-4D substrate $\epsilon=2.7$ were proposed. The radiating element of the antennas consists of half an octagon. This design ensures good matching in the 5.725–5.875 GHz frequency band allocated for telematics devices in transport. The proposed antenna prototypes meet the requirements for a reflection coefficient of -10 dB (S_{11}) at a central frequency of 5.81 GHz with a resonance depth of up to minus 45 dB. The gain of single emitters reaches 4.47 dBi.

Key words: V2X, V2I, ITS, microstrip technology, patch antennas.

About authors:

SAYFULLIN, Talgat Eduardovich, is a master's student. kaf. TS. Bachelor's degree (UGATU, 2022).

GRAKHOVA, Elizaveta Pavlovna, head of the Research Lab. "Sensing systems based on the integrated photonics devices", ass. Prof. of the Dep. Telecom. Systems. Dipl. engineer (USATU, 2012). Cand. of Tech. Sc. in telecom. systems, networks and devices (USATU, 2016). Research in the integrated photonics and Internet of things syst.