

Проектирование и технология радиоэлектронных средств

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-39-48>

Особенности конструкции антенных решеток автомобильных радаров, построенных на основе передающих и приемных многоэлементных модулей

А. А. Кузин, А. В. Мякинков, С. А. Шабалин✉

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

✉shabalin.semyon@yandex.ru

Аннотация

Введение. В современных автомобилях в качестве основных сенсоров систем помощи водителю, обнаруживающих объекты при любых погодных условиях, применяют радары. Одним из самых распространенных типов антенн является антенная решетка (АР). Коэффициент взаимной связи между соседними каналами АР оказывает значительное влияние на формируемую диаграмму направленности (ДН). Данный аспект важно учитывать для достижения заданных значений коэффициента усиления и уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН. В статье проанализировано влияние предлагаемых конструктивных решений на основные параметры спроектированной АР автомобильного радара, в частности на уровень коэффициента взаимной связи между каналами, УБЛ ДН.

Цель работы. Реализация оптимального подхода к построению топологии АР с точки зрения уменьшения уровня взаимного влияния соседних каналов решетки и получения ДН антенны с заданными характеристиками.

Методы и материалы. Для достижения требуемых параметров разработанной топологии АР методом конечных элементов (finite element method – FEM) рассчитаны и спроектированы копланарные и микрополосковые линии и модели экранов.

Результаты. Проведено электродинамическое моделирование АР миллиметрового диапазона. Показано влияние на ДН АР копланарных линий передачи. Исследованы особенности применения экранирующих элементов в структуре АР. В результате сравнительного анализа материалов определены параметры подложки для достижения лучшего уровня развязки между соседними каналами антенны.

Заключение. Применение копланарных линий передачи позволяет значительно уменьшить УБЛ ДН в угломестной плоскости. В случае использования делителей мощности при формировании модулей АР (подрешеток) вместо копланарных линий целесообразно использование микрополосковых конструкций, закрытых специальными экранирующими поверхностями. В этом случае возможно формирование заданного амплитудно-фазового распределения по апертуре.

Ключевые слова: антенная решетка, копланарная линия, экранирование, взаимная развязка каналов, диаграмма направленности, микрополосковая линия

Для цитирования: Кузин А. А., Мякинков А. В., Шабалин С. А. Особенности конструкции антенных решеток автомобильных радаров, построенных на основе передающих и приемных многоэлементных модулей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 39–48. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-39-48

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-11-2019-053 от 20 ноября 2019 года (Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218), проект "Создание отечественного высокотехнологичного производства систем безопасности автотранспорта на основе блока управления и интеллектуальных датчиков, включающих миллиметровые радары диапазона 76...77 ГГц".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.03.2021; принята к публикации после рецензирования 25.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021



Design Features of Antenna Arrays of Automotive Radars Based on Transmitting and Receiving Multi-Element Modules

Andrey A. Kuzin, Aleksandr V. Miakinkov, Semen A. Shabalin✉

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

✉ shabalin.semyon@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern vehicles are equipped with radars, which serve as the main sensors of driver assistance systems detecting objects in all weather conditions. Antenna arrays (AA) are the most common type of radar antennas. The coefficient of mutual coupling between adjacent antenna channels has a significant effect on the formed radiation pattern (RP) of an AA. This aspect is important for achieving the required values of gain and side-lobe level (SLL). This article analyses the effect of the proposed design solutions on the main parameters of an automotive radar AA, in particular, on the mutual coupling coefficient between the channels and the SLL of the DP.

Aim. To develop an optimal approach to constructing an AA topology in terms of reducing the level of mutual influence of adjacent array channels and obtaining a DP with specified characteristics.

Materials and methods. To achieve the required parameters of the designed AA topology, the coplanar and microstrip lines were calculated using the finite element method and shield models.

Results. An electrodynamic modeling of a millimetre-wave AA was carried out. The effect of coplanar transmission lines on the RP was shown. The features of applying shielding elements in the AA structure were investigated. Antenna patterns were obtained for both an AA designed based on coplanar transmission lines and that based on the use of shields. The conducted comparative analysis determined the parameters of the substrate optimal for achieving a better level of decoupling between adjacent antenna channels. The values of AA RP obtained during modeling were presented.

Conclusion. The use of coplanar transmission lines can significantly reduce the SLL of the DP in the elevation plane. When implementing the module structure of an array (using of sub-arrays), the power dividers are realized. In this case, instead of coplanar lines, it is advisable to use specific microstrip constructions covered with shielding surfaces. In this case, the formation of a given amplitude-phase distribution over aperture is possible. A comparative analysis of the AA topologies with different substrates was carried out with the purpose of achieving improved decoupling. The obtained values of the coefficient of mutual influence of adjacent array channels correspond to those of modern AA of automotive radars. The methods of reducing the parasitic radiation of transmission lines were considered. The AA RP obtained via electrodynamic modeling were presented. The use of a thin substrate with a higher dielectric constant makes it possible to improve the AA characteristics.

Keywords: antenna array, coplanar line, shielding, mutual decoupling of channels, radiation pattern, microstrip line

For citation: Kuzin A. A., Miakinkov A. V., Shabalin S. A. Design Features of Antenna Arrays of Automotive Radars Based on Transmitting and Receiving Multi-Element Modules. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 39–48. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-39-48

Acknowledgements: The paper was prepared in the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev and supported by the Agreement No. 075-11-2019-053 dated 20.11.2019 (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 No. 218), project "Creation of a domestic high-tech production of vehicle security systems based on a control mechanism and intelligent sensors, including millimetre radars in the 76...77 GHz range".

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 30.03.2021; accepted 25.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. В последние годы все более популярной и широко используемой становится разработка и реализация систем помощи водителю (ADAS). Такие системы контролируют слепые зоны, движение по полосам, скоростной режим, что делает процесс управления автомобилем более безопасным. В настоящее время в качестве основных сенсоров систем помощи водителю используются радары. Это объясняется тем, что их характеристики в наименьшей степени зависят от погодных условий и времени суток. Одним из основных узлов, во многом определяющих характеристики автомобильных радаров, является антенная система, которая, как правило, реализуется в виде фазированной антенной решетки (АР).

Для увеличения дальности обнаружения объектов необходимо повышать коэффициент усиления, который определяется в конечном итоге площадью суммарной апертуры передающей и приемной частей решетки и коэффициентом "заполнения" апертуры элементами решетки [1]. Одновременно с увеличением суммарной апертуры АР (передающей и приемной) повышается разрешающая способность по угловой координате. Вместе с тем важным требованием, определяющим конкурентоспособность радара, является его цена, которая растет практически пропорционально числу передающих и приемных каналов.

Известны два способа уменьшения числа физических каналов приема и передачи при сохранении суммарной апертуры. Один из них связан с использованием популярной в настоящее время технологии ММО (multiple input – multiple output) [2–4]. Такой подход предполагает использование разреженной АР передатчика или приемника, в которой расстояние между соседними элементами превышает половину длины волны в 2 и более раза. При этом в диаграмме направленности (ДН) разреженной решетки возникают интерференционные максимумы. В результирующей ДН приемно-передающей антенны эти максимумы устраняются за счет излучения и последующей совместной обработки ортогональных сигналов, количество которых должно соответствовать отношению расстояния между элементами разреженной решетки к половине длины волны. При этом на основе операции свертки структур передающей и приемной решеток реализуется формирование виртуальной решетки, для чего структура одной АР должна "заполнять" промежутки между элементами другой, так что результирующая виртуальная

решетка становится "заполненной". В итоге разрешающая способность ММО-решетки по угловой координате определяется суммой двух расстояний: между крайними элементами передающей и приемной решеток. Коэффициент усиления при этом уменьшается по сравнению с антенной, апертура которой полностью заполнена элементами, расположенными на расстоянии в половину длины волны, пропорционально уменьшению коэффициента заполнения.

Другой подход связан с использованием подрешеток, представляющих собой многоэлементные модули. Такие модули могут состоять, например, из двух или более столбцов, объединенных по выходу или по входу сумматорами (делителями) мощности, реализованными на микрополосковых линиях [1, 5]. В этом случае удается сохранить коэффициент усиления и разрешающую способность, и в то же время при работе в узком секторе углов в дальней зоне интерференционные максимумы ДН приемника подавляются при умножении на ДН передатчика [1, 5]. При этом, как показано в [1], максимизировать угловое разрешение можно за счет размещения части приемных подрешеток на краях апертуры.

В настоящей статье рассмотрена разработка конструкции АР диапазона 76...77 ГГц для автомобильного радара, построенной на основе передающих и приемных многоканальных модулей. Проанализированы конструктивные решения, делающие возможным минимизацию взаимного влияния каналов решетки друг на друга, чем обеспечивается наиболее точное соответствие ДН спроектированной АР результатам теоретического расчета для случая полностью развязанных приемных каналов. Указанный аспект важно учитывать для достижения значений коэффициента усиления и уровня боковых лепестков (УБЛ), близких к определяющимся количеством элементов решетки и выбранным весовым окном соответственно. Кроме того, для снижения УБЛ в вертикальной плоскости необходимо минимизировать переотражения сигналов в линиях, соединяющих столбцы АР с приемно-передающими модулями. В настоящей статье проанализировано влияние предложенных конструктивных решений на основные параметры спроектированной АР автомобильного радара – уровень развязки между каналами и УБЛ ДН в обеих плоскостях.

Методы исследования. Топология АР построена по результатам теоретического анализа, выполненного на основе теории обнаружения и разрешения сигналов, а также теории пространственно-временной обработки сигналов в АР. Результаты этих расчетов описаны в [1].

Электромагнитное моделирование выполнено в пакете САПР ADS (Advanced Design System) методом конечных элементов [6] с использованием постобработки результатов моделирования.

Результаты исследований. В качестве типа элемента АР выбрана структура, получившая в литературе название "патч" [7] – прямоугольный печатный элемент. Теоретическая и экспериментальная оценка и компенсация фазовых набегов в направляющих структурах СВЧ-модулей позволяет формировать соответствующую ДН в азимутальной плоскости [1, 8]. Требования к ДН в угломестной плоскости заключаются в обеспечении низкого УБЛ для уменьшения уровня помех от переотражений от поверхности земли. В качестве весовой функции в столбцах проектируемой АР применяется амплитудное распределение Чебышева. Процесс проектирования столбца решетки с заданным распределением состоит в изменении размеров патчей и линий, соединяющих их друг с другом [9–11].

На рис. 1 показана топология одного столбца проектируемой АР. Приведенная структура запитывается со стороны крайнего элемента, а соседние элементы столбца (излучатели) *1* соединяются микрополосковыми линиями *2*. Длина и ширина

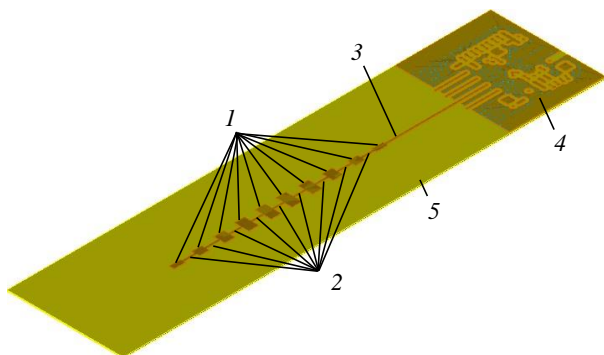


Рис. 1. Топология столбца АР с направляющей структурой, соединяющей его с приемно-передающим модулем: *1* – элементы АР; *2* – микрополосковые линии; *3* – направляющая структура; *4* – микросхема приемно-передающего модуля; *5* – подложка

Fig. 1. Topology of the column of an antenna array with a guiding structure connecting it to a transceiver:

1 – antenna array elements; *2* – microstrip lines; *3* – guide structure; *4* – the chip of the transceiver module; *5* – substrate

излучателей и соединительных линий подбираются из условий согласования и заданного амплитудного распределения [9]. Также на рис. 1 схематично показана направляющая структура *3*, соединяющая столбец АР с микросхемой передающего (приемного) интегрального модуля *4*.

Важным аспектом является способ построения направляющей структуры. Она может быть выполнена по технологии микрополосковых линий передачи, аналогично линиям связи между элементами антенны. В этом случае направляющая структура соединяет столбец АР с копланарной линией, которая в свою очередь соединена с микросхемой интегрального модуля *4*. Согласование импедансов элементов антенны и контакта микросхемы позволяет получить высокий уровень направленности структуры. Однако при распространении волны от источника возникают паразитные излучения линии передачи в плоскости, проходящей через направляющую структуру *3* и перпендикулярную подложке *5* (рис. 1). Эти излучения приводят к изменению заданного амплитудно-фазового распределения, как следствие, к искажению формы ДН антенны. В частности, происходит увеличение УБЛ ДН в близких к 90° направлениях, основной лепесток ДН становится не ортогональным плоскости антенны и искажается форма луча. Указанный эффект проиллюстрирован на рис. 2, где кривой *1* показан результат теоретического расчета ДН при реализации амплитудного распределения Чебышева, а кривой *2* – результат моделирования ДН получившейся конструкции в САПР.

Значительно меньшими, по сравнению с микрополосковыми линиями, потерями на излучение обладают копланарные линии. Благодаря их кон-

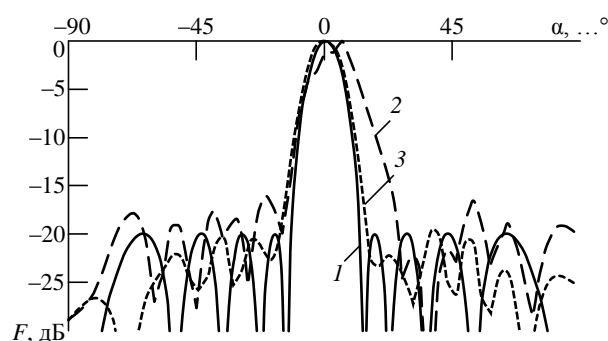


Рис. 2. Нормированная ДН столбца АР: *1* – теоретическая с распределением Чебышева; *2* – смоделированная; *3* – при использовании копланарных линий

Fig. 2. Normalized RP of one column: *1* – theoretical with Chebyshev distribution; *2* – simulated; *3* – obtained using of coplanar lines

струкции поле практически полностью концентрируется в подложке и уровень паразитного излучения значительно снижается. При использовании для передачи сигнала от передающего модуля в антенну копланарной линии параметры ДН значительно улучшаются – УБЛ соответствует заданному амплитудному распределению, а максимум ДН формируется строго в направлении нормали к плоскости антенны (рис. 2, 3).

Если конструктивными элементами антенны являются одиночные столбцы, использование копланарных линий практически решает проблему потерь, связанных с паразитным излучением линий передачи, и, следовательно, искажений ДН. Однако при использовании подрешеток, состоящих из нескольких столбцов, появляется необходимость построения делителей мощности [12]. Причем при количестве столбцов в структуре, большем двух, конструкции делителей могут иметь более одного яруса (рис. 3). Необходимость большого количества делителей существенно усложняет согласование элементов решетки с приемо-передающей микросхемой при проектировании копланарной линии передачи. Кроме того, участки линии с делителями мощности так же, как

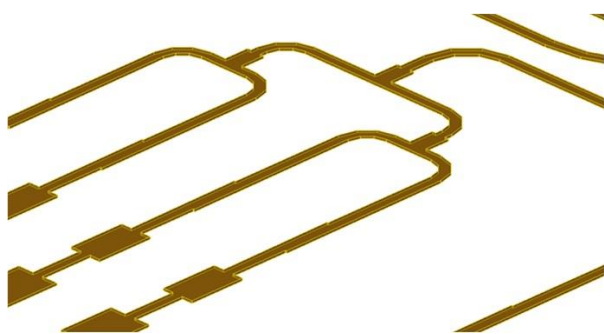


Рис. 3. Структура делителей мощности
 Fig. 3. Structure of the power divider

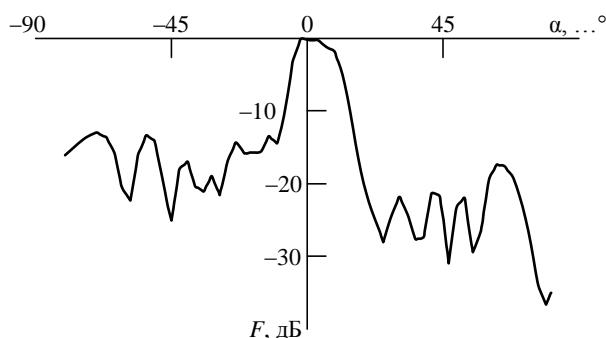


Рис. 4. Нормированная ДН в угломестной плоскости подрешетки AP, состоящей из 4 столбцов
 Fig. 4. Normalized RP in the elevation plane of an antenna subarray consisting of 4 columns

и микрополосковые линии, формируют паразитное излучение, что приводит к искажению ДН. На рис. 4 показана ДН в угломестной плоскости подрешетки, состоящей из четырех столбцов, объединенных микрополосковыми сумматорами. Видно, что по сравнению с ДН одиночного столбца имеет место искажение основного лепестка и значительное увеличение УБЛ.

Возможным способом уменьшения влияния паразитного излучения линий при наличии делителей мощности является применение экранов [13]. Экран представляет собой короб из материала с высокой проводимостью (меди, латуни), формирующий электрическую стенку для электромагнитного поля (рис. 5). Для достижения максимального эффекта экран закрывает все микросхемы и передающие линии со всеми делителями мощности вплоть до границ конструкции столбцов антенной решетки. Исключая паразитные излучения линий связи, экран обеспечивает снижение УБЛ ДН в вертикальной плоскости и повышение коэффициента усиления антенны [14, 15].

Учитывая тот факт, что микросхема расположена в одном слое с антенной, высота экрана обусловлена вертикальным размером используемой микросхемы. На рис. 6 представлено распределение модуля напряженности электрического поля подрешетки из 4 столбцов с делителем мощности (рис. 3) при отсутствии (а) и наличии (б) экрана 3. Область паразитного излучения 1 ведет к значительному искажению распределения поля в угломестной плоскости 2 (рис. 6, а). Экран 3 (рис. 6, б) с боковыми стенками 4 позволяет уменьшить уровень указанных искажений и достигнуть заданных характеристик ДН антенны (направленности, УБЛ).

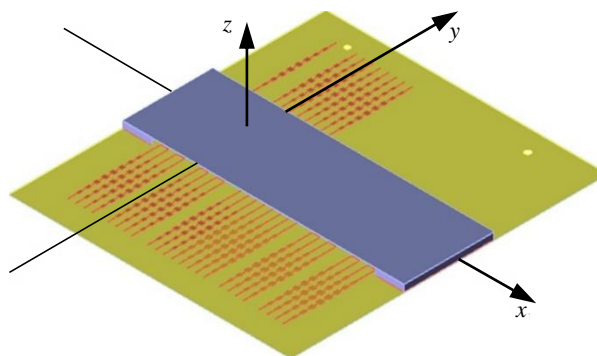


Рис. 5. Структура фазированной AP с экраном
 Fig. 5. Design of a phased antenna array with a shield

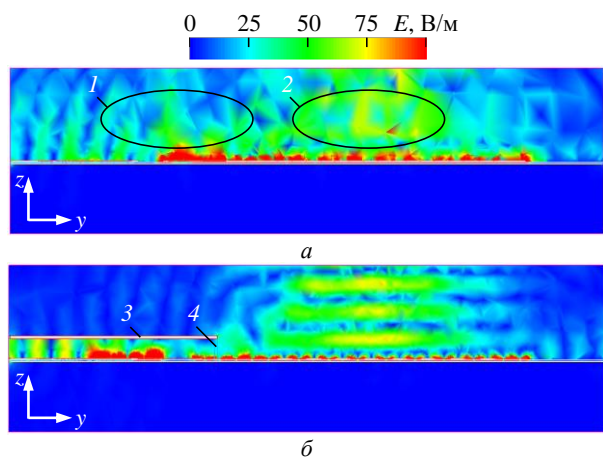


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля вдоль АР в угломерной плоскости: а – без экрана; б – с экраном

Fig. 6. Distribution of the electrical field intensity along the antenna in the elevation plane: а – without a shield; б – with a shield

На рис. 7 показаны ДН АР, полученные в результате моделирования в САПР конструкции без экрана (1) и с его использованием (2). Во втором случае паразитное излучение практически полностью сосредоточено в пределах экрана и не вносит искажений при формировании ДН с заданными характеристиками излучения. Из рисунка видно, что УБЛ ДН в угломерной плоскости при использовании экрана снижается примерно на 8 дБ.

Экран позволяет не только снизить уровень паразитного излучения, но и уменьшить влияние внешних помех на микросхемы, линии передачи и делители мощности.

Другим важным вопросом при проектировании АР является взаимное влияние соседних столбцов решетки друг на друга. В общем случае при наличии близкорасположенных излучающих элементов (передающих или приемных) происходит "просачивание" части сигнала, принятого или

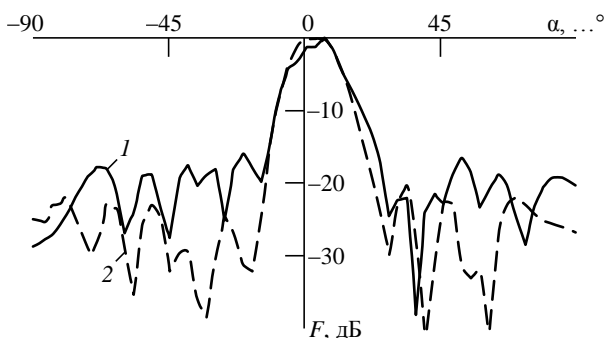


Рис. 7. Нормированная ДН АР в угломерной плоскости: 1 – без экрана; 2 – с экраном

Fig. 7. Normalized AA RP in the elevation plane: 1 – without a shield; 2 – with a shield

излученного элементом решетки (столбцом), в соседние элементы. В результате ДН элемента антенны формируется не только за счет распределения поля, определяемого структурой столбца, но и за счет паразитного взаимного влияния между ним и соседними столбцами АР [7].

В рассматриваемой антенне столбцы приемной решетки расположены друг от друга на расстоянии, равном половине длины волны. Ширина и длина каждого патча задаются амплитудным распределением Чебышева в угломерной плоскости. При выборе в качестве подложки материала Rogers 4003 ($\epsilon = 3.55$) расстояние между центральными (наиболее широкими) патчами соседних столбцов составило примерно 0.2...0.3 мм. В результате развязка между этими столбцами, определяемая амплитудой коэффициента передачи (параметр S_{21}), имеет значение около -15 дБ (кривая 1 на рис. 8). При этом значительно ухудшаются характеристики направленности структуры в азимутальной плоскости.

Кроме того, при наличии паразитного взаимного влияния между столбцами происходит рассогласование импедансов структуры и контакта микросхемы. Импеданс структуры при низком уровне развязки становится функцией взаимного расположения и напряженности поля соседних столбцов АР. На рис. 9 кривой 1 показана частотная зависимость коэффициента отражения от входа элемента АР (параметр S_{11}), состоящей из одиночного столбца, а кривой 2 – аналогичная зависимость для случая, когда рядом находится второй такой же столбец АР.

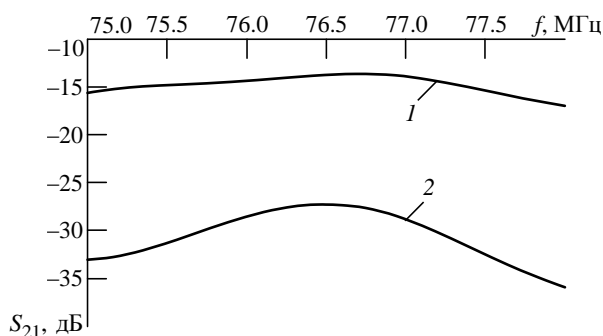


Рис. 8. Амплитуда коэффициента передачи между соседними столбцами АР при использовании в качестве подложки материала: 1 – Rogers 4003; 2 – Rogers 4350
 Fig. 8. Amplitude of the transmission coefficient between adjacent columns of the antenna with a substrate made of: 1 – Rogers 4003; 2 – Rogers 4350

Одним из возможных путей решения указанной проблемы является использование в качестве подложки материала с большим значением диэлектрической проницаемости. Исходя из производственных возможностей российских предприятий в проекте, реализуемом авторами, использован материал Rogers 4350 ($\epsilon = 3.66$). При этом уменьшились длина волны в линии передачи и, как следствие, геометрические размеры каждого патча в столбцах решетки, а расстояние между центральными патчами соседних столбцов увеличилось. В результате уровень развязки между каналами антенной решетки повышается (рис. 8, кривая 2).

Согласование структуры с источником питания в этом случае уже слабо зависит от позиции и напряженности соседних столбцов, что продемонстрировано на рис. 9 (кривая 3).

На рис. 10 представлено распределение напряженности электрического поля при использовании в качестве подложки материалов Rogers 4003 (а) и Rogers 4350 (б). Видно, что при использовании подложки Rogers 4003 в области центральных патчей возникает сильная электромагнитная связь между соседними столбцами антенны, которая практически отсутствует при подложке из материала Rogers 4350.

При меньшей толщине подложки (0.101 мм для Rogers 4350 и 0.203 мм для Rogers 4003) поле в большей степени концентрируется между проводником и слоем, подключенным к общему потенциалу, что снижает потери на излучение при распространении волны вдоль линии передачи. Однако тангенс угла потерь материала Rogers 4350 значительно выше, чем у Rogers 4003, что в свою очередь ведет к большим потерям в диэлектрике и,

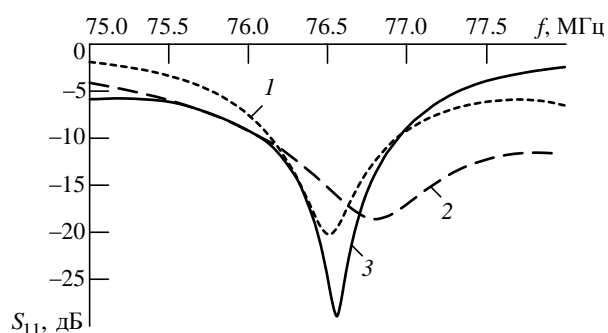


Рис. 9. Характеристика согласования столбца с источником питания: 1 – одиночного столбца; 2 – при наличии соседнего столбца; 3 – при использовании материала Rogers 4350

Fig. 9. Matching characteristic of the column to the source: 1 – single column; 2 – with the presence of an adjacent column; 3 – using Rogers 4350

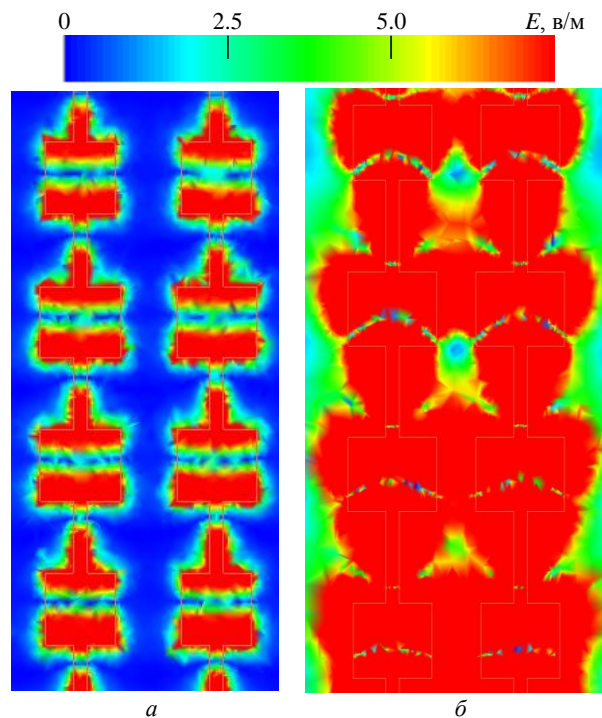


Рис. 10. Распределение напряженности электрического поля в соседних столбцах АР при реализации структуры: а – на подложке Rogers 4003; б – на подложке Rogers 4350

Fig. 10. Distribution of the electric field intensity in adjacent columns of the antenna when implementing the following structure: а – with a Rogers 4003 substrate; б – with a Rogers 4350 substrate

как следствие, к снижению КПД. В целом использование более тонкой подложки из диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости позволяет улучшить характеристики АР.

Свойства направленности разработанной с учетом описанных конструктивных особенностей АР автомобильного радара (см. рис. 5) оценивались экспериментально путем измерения ДН парциальных лучей результирующей ДН в безэховой

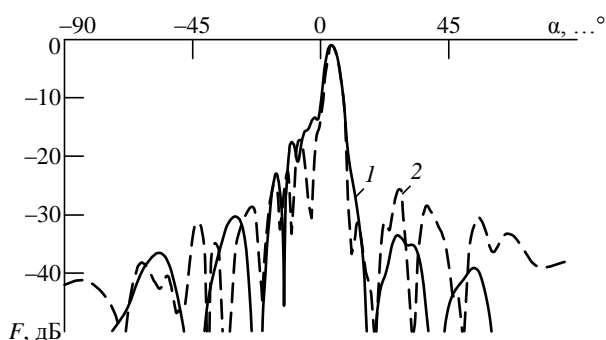


Рис. 11. Нормированная ДН АР в азимутальной плоскости: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Fig. 11. Normalized AA RP in the azimuth plane: 1 – theoretical; 2 – experimental

камере на площадке АО ПКК "Миландр" (Зеленоград). На рис. 11 показаны ДН луча АР, сформированного в направлении 6° относительно ее нормали. Кривая 1 представляет результат теоретического расчета, учитывающий только весовые функции распределения амплитуд по столбцам решетки, кривая 2 – результат измерения. Из рисунка видно, что основные характеристики ДН – ширина основного лепестка и УБЛ, полученные экспериментально, близки к теоретически достижимым.

Заключение. Линии передачи, соединяющие столбцы АР и каналы микросхемы, оказывают влияние на амплитудно-фазовое распределение поля, что искажает формируемую ДН в угломестной плоскости. Приведенные результаты моделирования структуры АР миллиметрового диапазона показывают, что применение копланарных линий позволяет уменьшить уровень паразитного излучения.

При реализации большого числа делителей мощности в структуре антенны происходит увеличение УБЛ в угломестной плоскости и искажение ДН. Экранирование области линий передачи, делителей мощности, а также микросхем позволяет значительно сократить влияние паразитного излучения и достигнуть заданного амплитудно-фазового распределения поля по апертуре. Размещение элементов АР с шагом, равным половине длины волны в свободном пространстве, требует близкого расположения соседних столбцов АР друг к другу. В связи с этим на основе сравнительного анализа использования материалов Rogers 4003 и Rogers 4350 в качестве подложки АР установлено, что более тонкая подложка из диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости позволяет улучшить характеристики АР.

Список литературы

1. Radar Subsystems of Autonomous Mobile Robotic Systems for studying Tsunami in the Coastal Zone / P. O. Beresnev, A. A. Kurkin, A. A. Kuzin, A. V. Myakinkov, E. N. Pelinovsky, A. G. Ryndyk, S. A. Shabalin // Science of Tsunami Hazards. 2020. Vol. 39, iss. 3. P. 137–155.
2. Pirkani A. A., Pooni S., Cherniakov M. Implementation of MIMO beamforming on OTS FMCW Automotive Radar // Proc. Intern. Radar Symp. Ulm, Germany, 26–28 June, 2019. doi: 10.23919 /IRS.2019.8768103
3. Zwanetski A., Kronauge M., Rohling H. Waveform Design for FMCW MIMO Radar based on Frequency Division // 14th Intern. Radar Symp. (IRS). Dresden, Germany, 19–21 June, 2013. Piscataway: IEEE, 2013. Vol. 1. P. 89–94.
4. Bogdan T., Dorina I. Simulation of Automotive MIMO Radar // 14th Intern. Symp. of Electronics and Telecommunications. Conf. Timisoara, Romania, 5–6 Nov. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. doi: 10.1109/ISETC50328.2020.9301103
5. Development of the Automotive Radar for the Systems of Adaptive Cruise Control and Automatic Emergency Breaking / V. N. Burov, A. A. Kuzin, A. V. Myakinkov, A. D. Pluzhnikov, A. G. Ryndyk, R. S. Fadeev, S. A. Shabalin, P. S. Rogov // Proc. of 2019 Intern. Conf. on Engineering and Telecommunication (EnT). 20–21 Nov. 2019, Dolgoprudny, Russia. Piscataway: IEEE, 2019. doi: 10.1109 /EnT47717.2019.9030600
6. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М.: Солон-пресс, 2017. 316 с.
7. Balanis C. A. Antenna Theory. Analysis and Design. 4th ed. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2016. 1072 p.
8. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. 3d ed. Boston: Artech House, Inc., 2018. 506 p.
9. Shabalin S. A., Myakinkov A. V., Kuzin A. A. Phased Array Antenna of Millimeter Range for Automotive Radar // Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. Saint Petersburg, Russia, 28–31 Jan., 2019. Piscataway: IEEE, 2019. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657164
10. Chen Z., Otto S. A Taper Optimization for Pattern Synthesis of Microstrip Series-fed Patch Array Antennas // Europ. Wireless Technology Conf. Rome, Italy, 28–29 Sept., 2009. Piscataway: IEEE, 2009. P. 160–163.
11. Jian B., Yuan J., Liu Q. Procedure to Design a Series-fed Microstrip Patch Antenna Array for 77 GHz Automotive Radar // Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. Taiyuan, China, 18–21 July 2019. Piscataway: IEEE, 2019. 2 p. doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799356
12. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2011. 736 p.
13. Rida A., Tentzeris M., Nikolaou S. Design of Low Cost Microstrip Antenna Arrays for mm-Wave Applications // IEEE Intern. Symp. on Anten. and Prop. Spokane, USA, 3–8 July, 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 2071–2073. doi: 10.1109/APS.2011.5996916
14. A High-gain Circularly-polarized Patch Antenna Design using an Advanced Shielding Technique / S. P. Sun, C.-N. Chiu, Y.-C. Chuang, T.-C. Lin, H.-C. Hsieh // IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility. Suntec City, Singapore, 14–18 May, 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1067–1070. doi: 10.1109/IEMC.2018.8393950
15. Jang T. H., Kim H. Y., Park C. S. A 60 GHz Self-shielded Yagi Antenna with Pyramidal Horn // Intern. Symp. on Anten. and Prop. Okinawa, Japan, 24–28 Oct., 2016. P. 786–787.

Информация об авторах

Кузин Андрей Алексеевич – доцент (2013) кафедры информационных радиосистем Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (НГТУ). Автор 40 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Россия

E-mail: kuzin_andrey@nntu.ru

Мякинков Александр Валерьевич – доктор технических наук (2013), доцент (2010), профессор кафедры информационных радиосистем НГТУ, директор института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ. Автор 100 научных работ. Сфера научных интересов – радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Россия

E-mail: redvillage@mail.ru

Шабалин Семен Андреевич – инженер по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2018, НГТУ), аспирант кафедры информационных радиосистем НГТУ (2018). Автор 10 научных работ. Сфера интересов – радиолокация, антенны и СВЧ-устройства.

Адрес: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: shabalin.semyon@yandex.ru

References

1. Beresnev P. O., Kurkin A. A., Kuzin A. A., Myakinkov A. V., Pelinovsky E. N., Ryndyk A. G., Shabalin S. A. Radar Subsystems of Autonomous Mobile Robotic Systems for studying Tsunami in the Coastal Zone. *Science of Tsunami Hazards*. 2020, vol. 39, iss. 3, pp. 137–155.
2. Pirkani A. A., Pooni S., Cherniakov M. Implementation of MIMO beamforming on OTS FMCW Automotive Radar. *Proc. Intern. Radar Symp. Ulm, Germany*, 26–28 June, 2019. doi: 10.23919/IRS.2019.8768103
3. Zwanetski A., Kronauge M., Rohling H. Waveform Design for FMCW MIMO Radar based on Frequency Division. *14th Intern. Radar Symp. (IRS)*. Dresden, Germany, 19–21 June, 2013. Piscataway, IEEE, 2013, vol. 1, pp. 89–94.
4. Bogdan T., Dorina I. Simulation of Automotive MIMO Radar. *14th Intern. Symp. of Electronics and Telecommunications. Conf. Timisoara, Romania*, 5–6 Nov. 2020. Piscataway, IEEE, 2020. doi: 10.1109/SETC50328.2020.9301103
5. Burov V. N., Kuzin A. A., Myakinkov A. V., Pluzhnikov A. D., Ryndyk A. G., Fadeev R. S., Shabalin S. A., Rogov P. S. Development of the Automotive Radar for the Systems of Adaptive Cruise Control and Automatic Emergency Breaking. *Proc. of 2019 Intern. Conf. on Engineering and Telecommunication (EnT)*. 20–21 Nov. 2019, Dolgoprudny, Russia. Piscataway, IEEE, 2019. doi: 10.1109/EnT47717.2019.9030600
6. Bankov S. E., Kurushin A. A. *Electrodynamics and microwave Technology for CAD users*. M., *Solon-press*, 2017, 316 p. (In Russ.)
7. Balanis C. A. *Antenna Theory. Analysis and Design*. 4th ed. Hoboken, John Wiley and Sons, Inc., 2016, 1072 p.
8. Mailloux R. J. *Phased Array Antenna Handbook*. 3d ed. Boston, Artech House, Inc., 2018, 506 p.
9. Shabalin S. A., Myakinkov A. V., Kuzin A. A. Phased Array Antenna of Millimeter Range for Automotive Radar. *Proc. of the 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. Saint Petersburg, Russia, 28–31 Jan., 2019. Piscataway, IEEE, 2019. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657164
10. Chen Z., Otto S. A Taper Optimization for Pattern Synthesis of Microstrip Series-fed Patch Array Antennas. *Europ. Wireless Technology Conf. Rome, Italy*, 28–29 Sept., 2009. Piscataway, IEEE, 2009, pp. 160–163.
11. Jian B., Yuan J., Liu Q. Procedure to Design a Series-fed Microstrip Patch Antenna Array for 77 GHz Automotive Radar. *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conf. Taiyuan, China*, 18–21 July 2019. Piscataway, IEEE, 2019, 2 p. doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799356
12. Pozar D. M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken, John Wiley and Sons, Inc., 2011, 736 p.
13. Rida A., Tentzeris M., Nikolaou S. Design of Low Cost Microstrip Antenna Arrays for mm-Wave Applications. *IEEE Intern. Symp. on Anten. and Prop. Spokane, USA*, 3–8 July, 2011. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 2071–2073. doi: 10.1109/APS.2011.5996916
14. Sun S. P., Chiu C.-N., Chuang Y.-C., Lin T.-C., Hsieh H.-C. A High-gain Circularly-polarized Patch Antenna Design using an Advanced Shielding Technique. *IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symp. on Electromagnetic Compatibility*. Suntec City, Singapore, 14–18 May, 2018. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1067–1070. doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393950
15. Jang T. H., Kim H. Y., Park C. S. A 60 GHz Self-shielded Yagi Antenna with Pyramidal Horn. *Intern. Symp. on Anten. and Prop. Okinawa, Japan*, 24–28 Oct., 2016, pp. 786–787.

Information about the authors

Andrey A. Kuzin, Associate Professor (2013) of the department of informational radio systems of Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev (NSTU). The author of 40 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, digital signal processing.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

E-mail: kuzin_andrey@nntu.ru

Aleksandr V. Miakinkov, Dr. Sci. (Eng.) (2013), Associate Professor (2010), Professor of the department of informational radio systems of NSTU, director of the Institute of radio electronics and informational technology of NNSTU. The author of 100 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, digital signal processing.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

E-mail: redvillage@mail.ru

Semen A. Shabalin, Engineer on Electronic systems and complexes (2018, NSTU), the post-graduate student of the department of informational radio systems of NSTU. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: radiolocation, antennas and microwave devices.

Address: Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 24 Minin St., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

E-mail: shabalin.semyon@yandex.ru
