

УДК 621.396.96

Г. В. Комаров, Д. М. Воскресенский, И. Г. Горбунов,
М. А. Овчинников, Е. Н. Воробьёв
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Особенности конструкции антенных систем автомобильных радаров с электронным сканированием, работающих в сложных климатических условиях

Рассмотрены способы обеспечения теплового режима приемопередатчиков автомобильных радаров в условиях жаркого климата и методы повышения энергетического потенциала автомобильного радара для работы в местах с повышенным уровнем поглощения на пути распространения радиоволн от радара до отражающего объекта и обратно. Такое поглощение может быть вызвано туманом, снегом, взвешенными в воздухе частицами пыли, песка или почвы. Проведено обоснование выбора определенного типа линий передачи энергии от приемопередатчиков к антеннам, обеспечивающего одновременно эффективное охлаждение греющихся элементов конструкции и передачу энергии с минимальными потерями. Выбранный тип линии позволяет с минимальными технологическими сложностями обеспечить необходимый теплоотвод. Показана эффективность разработанных антенн, приведены результаты компьютерного моделирования. Полученные результаты позволяют повысить надежность работы и качество обнаружения объектов при помощи автомобильных радаров в разнообразных климатических условиях, а также продлить срок их службы.

Электронное сканирование, антенные решетки, сложные погодные условия, обеспечение теплового режима, автомобильный радар

Использование автомобильных радаров миллиметрового диапазона в составе многокомпонентных систем помощи водителю и обеспечения безопасности автомобиля (системы ADAS) является общемировой практикой. Многие производители премиальных автомобилей используют такие устройства для реализации систем адаптивного круиз-контроля, помощи водителю и других целей.

Беспилотные транспортные средства при помощи радиолокационных систем имеют возможность обнаруживать препятствия на пути своего движения в сложных погодных условиях. От надежной, эффективной и качественной работы данных устройств напрямую зависит здоровье людей, сохранность имущества и безопасность дорожного движения.

В силу разнообразных климатических условий на территории России требуется уделять особое внимание эксплуатации радаров в край-

них по различным параметрам окружающей среды регионам страны и воздействию на данные радары погодных условий, которые более всего затрудняют вождение машины водителем или работу оптических сенсоров беспилотного транспортного средства.

Постановка проблемы. Высокочастотный тракт современных автомобильных радиолокаторов миллиметрового диапазона строят на базе монолитных микросхем приемопередатчиков, в которых сосредоточены все этапы работы с радиосигналом, от умножения частоты опорного кварцевого резонатора до излучения в эфир миллиметровых радиоволн и от маломощного усилителя в приемнике до выхода промежуточной частоты.

Такие решения позволяют максимально сократить размеры и стоимость приемника и передатчика, но приводят к тому, что все элементы радиотракта размещаются на малой площади.

Неидеальность элементов микросхемы приводит к выделению достаточно существенной тепловой мощности (достигающей единиц ватт) на площади в несколько квадратных сантиметров.

При использовании автомобильного радара в жарких климатических условиях необходимо обеспечивать эффективный теплоотвод от микросхем, поскольку даже при исполнении, предполагающем максимальную рабочую температуру микросхемы $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, достаточно серьезное тепловое сопротивление на пути от кристалла внутри микросхемы до окружающего воздуха требует принятия мер к его минимизации. Кроме того, под капотом автомобиля температура может быть существенно выше, чем температура окружающего воздуха, особенно при безветренной солнечной погоде и темной окраске корпуса автомобиля.

Используемые в современных автомобильных радарах радиоволны миллиметрового диапазона существенно поглощаются любыми веществами, взвешенными в воздухе. Туман, снег, пыль, капли дождя – все эти метеоявления существенно влияют на дальность работы автомобильного радара.

В регионах с холодным климатом наиболее остро стоит задача обеспечения работоспособности радара в условиях интенсивных снежных осадков. Как показывают проведенные ранее исследования [1], наибольшее ослабление миллиметровые радиоволны испытывают в мокром снеге, незначительно слабее – в сухом. Интенсивные снежные осадки снижают видимость до 100 м и менее, что делает эффективную работу радара еще более важной для обеспечения безопасности движения. Зачастую в таких регионах любое ДТП может стоить жизни как водителю, так и пассажирам автомобиля, даже если они не получили опасных для жизни травм.

В регионах с жарким и засушливым климатом летом вместо снега аналогичные сложности вызывают пыль и песок, которые и снижают видимость, и поглощают радиоволны миллиметрового диапазона, причем коэффициент отражения сильно зависит от состава почвы и размера частиц пыли. В зимнее время в степных регионах случаются интенсивные метели, которые регулярно сопровождаются массовыми авариями.

Интенсивные ливни, при которых выпадает более 15–20 мм/ч осадков, случаются практически на всей территории России за редкими исключениями. При таких осадках дальность также существенно ограничена, а залитая водой дорога

не позволяет резко затормозить, обнаружив препятствие, без риска неуправляемого заноса.

Таким образом, минимизация влияния ослабления радиоволн, вносимого атмосферными осадками и взвешенной в воздухе пылью, – это важный аспект повышения параметров автомобильного радиолокатора.

Обеспечение теплового режима. На пути минимизации теплового сопротивления становится проблема обеспечения работоспособности радиочастотного тракта, поскольку размещение миниатюрных радиаторов вблизи антенных решеток недопустимо из-за появления в ближней зоне антенн посторонних металлических предметов [2, с. 108]. Внесение же в антенную решетку предварительных искажений, которые будут скомпенсированы таким радиатором, сталкивается с технологическими ограничениями на точность изготовления как радиаторов, так и самих решеток, а также со сложностью точного и неизменного во времени их взаимного расположения, особенно при механических воздействиях, например при работе радара в движении, особенно на дорогах невысокого качества.

Поэтому расположение микросхем с обратной по отношению к антеннам стороны печатной платы является эффективным и технологически простым решением проблемы эффективного теплоотвода, не требующим дополнительного усложнения конструкции: микросхемы прижимаются к металлическому корпусу радара через термопрокладку, служа одновременно и радиатором. Минимизация влияния металлического корпуса на линии передачи миллиметрового диапазона от микросхем к антеннам обеспечивается выбором их типа, оптимального в данной ситуации.

Известно [3, с. 76–77], что распределение поля микрополосковой линии отличается тем, что линии электрического поля в перпендикулярном направлении распространяются достаточно далеко (на 2–3 ширины проводника) от самой линии передачи (рис. 1, из [4]).

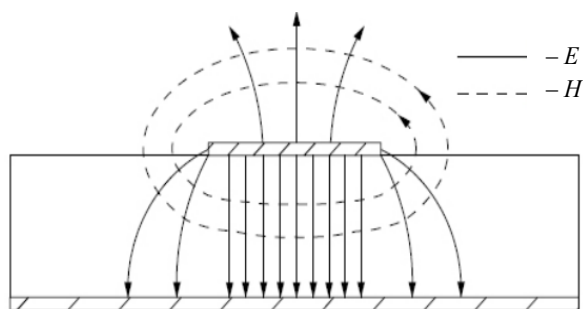


Рис. 1

Такая особенность делает микрополосковую линию передачи чувствительной к расположению вблизи металлическому корпусу и приводит к изменению самого типа линии – вместо классической микрополосковой линии мы получаем несимметричную полосковую линию с двумя диэлектриками – стеклокерамикой на печатной плате и воздухом между центральным проводником и металлическим корпусом. Несмотря на то, что в литературе описаны формулы расчета волнового сопротивления для таких экзотических линий [5], их практическое использование невозможно из-за высоких требований к размеру и равномерности зазоров между платой и радиатором (не хуже 0.05 мм на расстоянии в 50 мм), требованиям к высококачественному электрическому соединению корпуса с платой и неудобству работы с таким радаром – без корпуса он не сможет излучать.

В качестве альтернативы предлагается использовать линию передачи типа «компланарный волновод с заземлением». В такой линии передачи поле сконцентрировано между центральным проводником и заземленным контуром (рис. 2, из [6]).

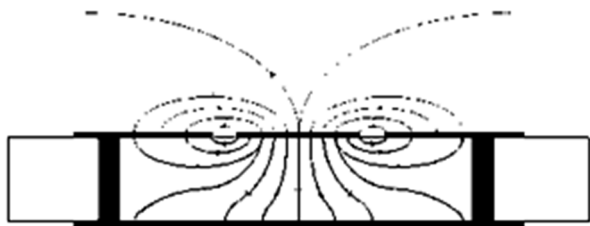


Рис. 2

Такие линии малочувствительны к проводящим поверхностям вблизи себя, в литературе имеются формулы для расчета импеданса по геометрическим размерам [5], а чувствительность к технологическим погрешностям у такой линии не слишком велика.

Дополнительным фактором, обеспечивающим удобство использования именно компланарного волновода с заземлением в таком приложении служит то, что:

- каждый высокочастотный вход и выход микросхемы окружен контактами, соединенными с общим проводом, что затрудняет использование микрополосковой линии и максимально удобно для компланарного волновода;
- при правильном выборе зазора между центральным и боковыми проводниками переход между компланарным волноводом и микрополосковой линией происходит со столь малым изме-

нением ширины центрального проводника линий передачи, что с учетом технологических ограничений производства печатных плат она не меняется вовсе, так как разница между ними меньше, чем минимальная разница ширин проводника, обеспечиваемых технологическим оборудованием изготовителя печатных плат.

Предпринятые меры позволяют сохранить качество согласования линий передачи с одновременным снижением температур микросхем на 15...20 °С по сравнению с вариантом исполнения радара без охлаждения микросхем, что благотворно сказывается на надежности и долговечности изделия.

Электронное сканирование в антенных решетках автомобильных радаров. В большинстве конструкций современных автомобильных радаров используется цифровое диаграммоформирование в приемной решетке, а передающая антенная решетка не сканирует лучом вовсе. Такое решение позволяет обеспечить существенные плюсы для разработчиков, в том числе возможность использования самых простых и дешевых приемопередатчиков, ограниченность количества приемных лучей только вычислителем и максимальный темп обзора. Однако такое решение не оптимально с точки зрения использования мощности передатчиков.

В сложных метеоусловиях, характерных для многих регионов нашей страны, радар должен эффективно обнаруживать цели в сравнительно небольшом угловом секторе впереди машины, но зато с высокой надежностью. Для этого нецелесообразно расплывать энергию на всю зону обзора, более эффективно сосредоточить ее в одной узкой зоне.

В регионах со сложными метеоусловиями характерно формирование колонн автомобилей, которые движутся между населенными пунктами, что повышает безопасность движения и позволяет водителям оказывать друг другу помощь при возникновении аварийной ситуации или поломки одной из машин. В случае интенсивных осадков водители любых автомобилей, как правило, уменьшают скорость движения и поддерживают увеличенную дистанцию, поскольку при малой дистанции облако брызг или мелкого снега от движущегося впереди автомобиля полностью закрывает обзор. В таких ситуациях водителю необходимо своевременно обнаруживать замед-

ление или остановку впереди идущей машины на существенной дистанции и обозревать пространство в широком угле на небольшой дальности для отслеживания попыток перестроения в такую колонну из соседних рядов. И только первому автомобилю необходим обзор пространства в широких пределах по азимуту на существенную дальность.

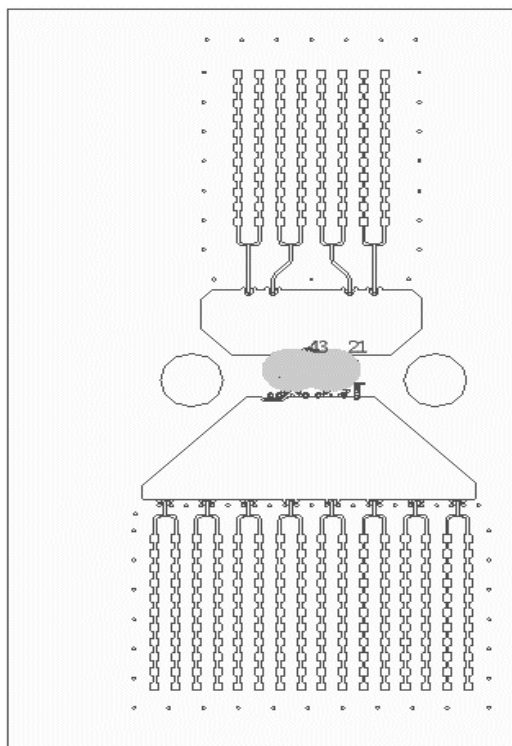


Рис. 3

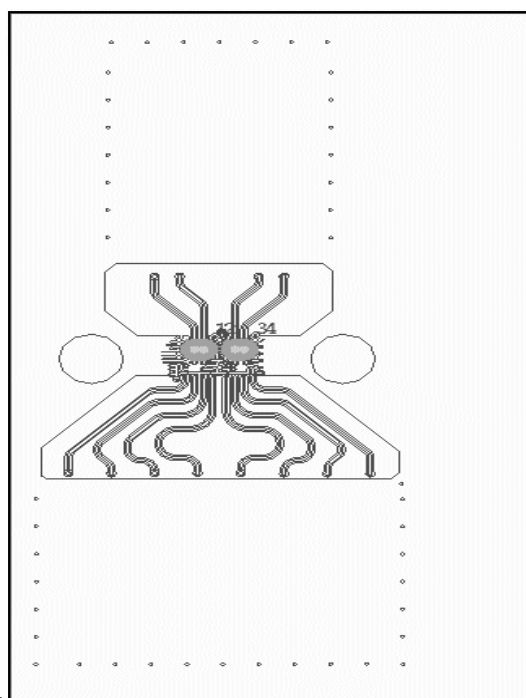


Рис. 4

С учетом этих соображений автомобильный радар, разработанный для использования в сложных метеоусловиях, должен иметь два канала: первый из них с максимально широким диапазоном углов обзора, а второй – с возможностью сканировать пространство в небольших пределах по углу, но с максимальной энергетикой.

Такая конструкция антенной системы позволяет совместить два указанных способа обзора пространства. Внешний вид полученной антенной решетки со стороны излучателей показан на рис. 3, а со стороны микросхем (и радиатора) – на рис. 4.

Одновременно с этим выбранной конструкцией обеспечивается надежный теплоотвод от радиочастотных микросхем согласно принципам, изложенным ранее.

Так как сектор работы на излучение ограничен, то мы можем сделать антенную систему дальнего действия с шагом большим, чем половина длины волны, без появления дифракционных лепестков при сканировании. В данной конструкции угол сканирования был ограничен сектором $\pm 6^\circ$ при расчетной ширине диаграммы направленности 6° . Использование спаренных антенных элементов дополнительно сужает диаграмму направленности одиночного излучателя и позволяет существенно увеличить расстояние между излучателями без появления дифракционных лепестков. Такой подход позволяет повысить коэффициент усиления антенной решетки без увеличения числа входов возбуждения, но ограничивает угол обзора и не позволяет расширить диаграмму направленности передающей антенны, отключая часть передатчиков.

Для максимально эффективного обзора в канале ближнего действия используется суммирование мощности двух выходов передатчика на единой антенне. Благодаря этому не требуется искусственно искажать амплитудно-фазовое распределение на антенне при работе на максимальных углах обзора.

Электронное сканирование в канале дальнего действия обеспечивается при помощи встроенных в радиочастотную микросхему фазовращателей и не требует использования внешних фазовращателей миллиметрового диапазона.

Моделирование и его результаты. Создание любых современных радиочастотных устройств невозможно без компьютерного моделирования. Обычно радиолокационное устройство можно

разделить на отдельные части и промоделировать по блокам. Автомобильный радар в данном случае представляет единую многослойную печатную плату больших размеров, что затрудняет моделирование и требует больших вычислительных мощностей. В связи с этим при расчете плата делилась на 4 части – две приемные и две передающие, моделирование каждой из которых проводилось отдельно.

Такое решение позволило проверить правильность решений, принятых на стадии предварительных расчетов, уточнить качество согласования антенных элементов и СВЧ-входов микросхем и проверить диаграммы направленности антенн. В качестве финальной проверки степени взаимного влияния были проведены отдельные расчеты с приемной и передающей антеннами каждого канала, взаимное влияние было признано допустимо малым. Полное совместное моделирование всех каналов не проводилось из-за ограниченных ресурсов

расчетного сервера, в первую очередь из-за недостаточного объема оперативной памяти.

Результаты моделирования представлены на рис. 5–8.

На рис. 5 показан график модуля коэффициента отражения от портов, имитирующих выходные каскады микросхем (сопротивление 50 Ом) при подаче сигнала на передающую антенную решетку канала дальнего действия (кривая 1 – $|S_{11}|$; кривая 2 – $|S_{22}|$), а на рис. 6 – на приемную решетку того же канала (порты $|S_{11}|$, $|S_{22}|$, $|S_{33}|$, $|S_{44}|$). S – комплексный коэффициент отражения от соответствующего порта (от 1 до 4).

На рис. 7 представлена диаграмма направленности передающей, а на рис. 8 – приемной антенн дальнего действия.

Передающая антенна на частоте 76.25 ГГц развивает коэффициент усиления в 21.6 дБ при ширине диаграммы 9° по уровню -3 дБ и уровне первого бокового лепестка -9.8 дБ.

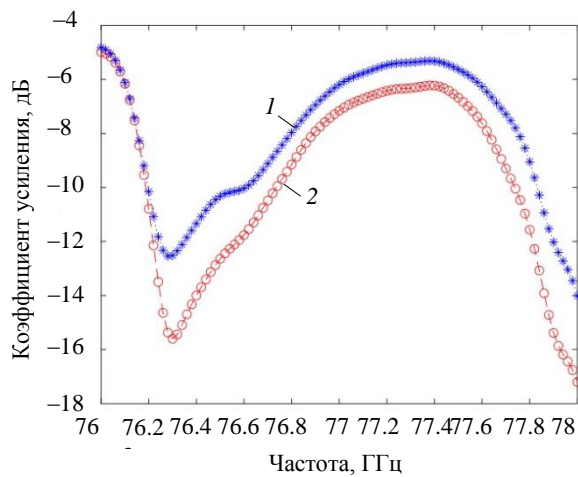


Рис. 5

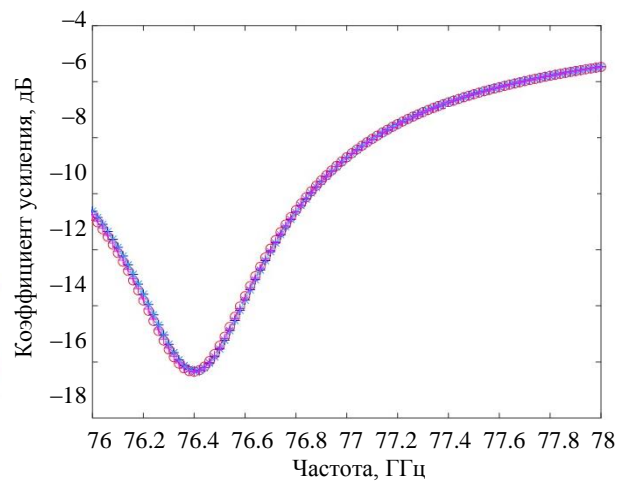


Рис. 6

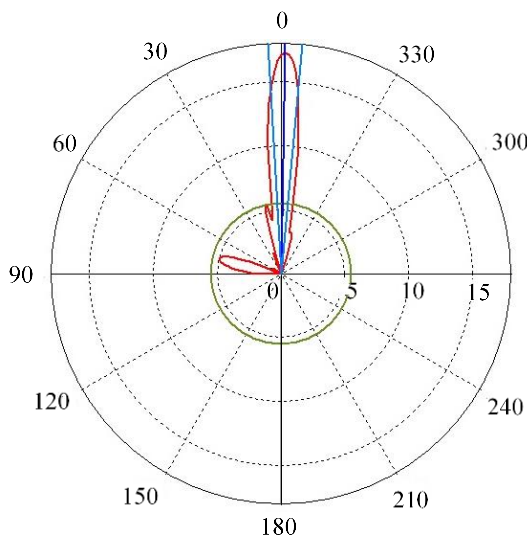


Рис. 7

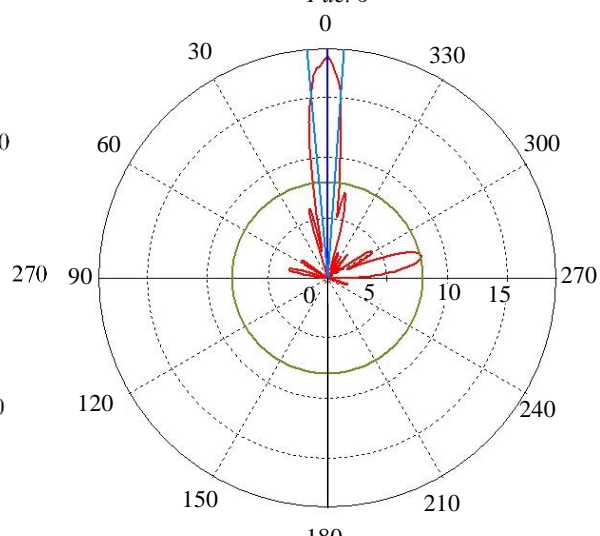


Рис. 8

Приемная антенна на той же частоте имеет коэффициент усиления в 24.2 дБ, ширину диаграммы 9° по уровню –3 дБ и уровень первого бокового лепестка –10 дБ.

Как можно видеть из результатов моделирования, конструкция антенных решеток дальнего действия формирует узкий луч, который концентрирует энергию передатчиков в узком секторе пространства, а антенны канала ближнего действия формируют очень широкий луч подсветки и умеренно широкий луч приема отраженных сигналов. Таким образом, моделирование разработанной антенной системы показало, что она обеспечивает необходимый уровень согласования и соответствует изложенным ранее подходам.

Разработанная конструкция автомобильного радара миллиметрового диапазона позволяет обеспечить надежную и эффективную работу устройства в сложных погодных условиях, при-

водящих к появлению в воздухе взвесей, поглощающих радиоволны. В дополнение к этому она обеспечивает более качественный отвод тепла, что увеличивает надежность и долговечность работы радара, предотвращая перегрев радиочастотных микросхем в условиях жаркого климата. Правильность принятых решений подтверждена проведенным компьютерным моделированием.

Работа выполнена в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-11-2019-053 от 20.11.2019 г. (на основании постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218) по теме: «Создание отечественного высокотехнологичного производства систем безопасности автотранспорта на основе блока управления и интеллектуальных датчиков, включающих миллиметровые радары диапазона 76–77 ГГц».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян Г. М., Шукин Г. Г. Распространение миллиметровых волн в облаках: справочник / Гидрометеиздат, 1991.
2. Rappaport T. S. Wireless Communications Principles and Practice: справочник. USA: Prentice-Hall, 2010.
3. Bhartia P. Microstrip Antenna Design Handbook. UK: Artech House, 2001.
4. Iulian R. Microstrip, stripline, CPW, and SIW Design / R. Iulian. URL: <https://www.qsl.net/va3iul/>

- Microstrip_Stripline_CPW_Design/Microstrip_Stripline_and_CPW_Design.pdf (дата обращения 26.09.21).
5. Wadell B. C. Transmission line design handbook. UK: Artech House, 1991.
6. Coonrod J. Controlling conductor losses in coplanar transmission Lines. URL: https://mwexpert.typepad.com/rog_blog/2011/03/controlling-conductor-losses-in-coplanar-transmission-lines.html (дата обращения 26.09.21).

G. V. Komarov, D. M. Voskresenskii, I. G. Gorbunov, M. A. Ovichinnikov, E. N. Vorobev
Saint Petersburg Electrotechnical University

DESIGN FEATURES OF ANTENNA SYSTEMS OF AUTOMOTIVE RADARS WITH ELECTRONIC SCANNING OPERATING IN HARD CLIMATE CONDITIONS

Methods of ensuring the thermal regime of transceivers of automobile radars in hot climates and methods of increasing the energy potential of an automobile radar for work in places with an increased level of absorption on the path of radio wave propagation from the radar to the reflecting object and vice versa are considered. Such absorption can be caused by fog, snow, airborne dust, sand or soil. The substantiation of the choice of a certain type of power transmission lines from transceivers to antennas, which simultaneously provides effective cooling of heating elements of the structure and energy transfer with minimal losses, has been carried out. The selected line type allows providing the necessary heat removal with a minimum level of technological complexity. The efficiency of the developed antennas is shown, the results of computer simulation are presented. The results obtained make it possible to increase the reliability of operation and the quality of object detection using vehicle radars in various climatic conditions, as well as to extend their service life.

Electronic scanning, antenna arrays, difficult weather conditions, thermal management, vehicle radar