

DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.3

УДК 621.396.677.85

ГИБРИДНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ СРЕДСТВ СВЯЗИ САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ. ОБЗОР

Е. В. Захаров¹, А. С. Ильинский¹, Ю. В. Медведев², О. Ю. Перфилов²,
А. Б. Самохин³, А. И. Скородумов², Ю. Я. Харланов²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

² 16 Центральный научно-исследовательский испытательный
ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи
А.И. Белова МО РФ, 141006, Московская область, г. Мытищи

³ Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики МГТУ МИРЭА,
119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.

Аннотация. Представлены конструкции диэлектрических линзовых антенн, определены области их применения. Проведено численное исследование энергетических, массогабаритных и аэродинамических параметров диэлектрических линзовых антенн. Показана возможность решения задачи сверхширокоугольного электрического сканирования путем применения диэлектрических линз различных форм. Проведена оценка величины расширения сектора сканирования облучающей антенной решетки купольной линзой. Дана оценка возможности изменения диаграммы сканирования, а также увеличения коэффициента усиления при сканировании в широком секторе углов путем изготовления линзы из феррита. Получены зависимости массы линзы от изменения ее геометрических размеров и показана возможность снижения массы линзы при рациональном их выборе. Получены зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления антенны от геометрических параметров линзы и показана возможность его снижения. Основные результаты работы докладывались на XIII Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь».

Ключевые слова: диэлектрическая линзовая антенна, антенная решетка,

коэффициент усиления, коэффициент аэродинамического сопротивления, сектор сканирования, диаграмма сканирования.

Abstract. The designs of dielectric lens antennas are presented, and their applications are defined. A numerical research of the energy, mass-sized and aerodynamic parameters of dielectric lens antennas was carried out. The possibility of solving the problem of ultra-wide-angle electric scanning by applying dielectric lenses of various shapes is shown. The value of the increasing of the scanning sector of the radiating antenna array with a dome lens is estimated. The possibility of changing the scanning diagram, as well as increasing the gain when scanning in a wide sector of angles by manufacturing a lens from ferrite, is estimated. The dependences of the mass of lens with changing its geometric dimensions are obtained, and the possibility of reducing the mass of the lens at their rational selection is shown. The dependences of the aerodynamic drag coefficient of the antenna on the geometric sizes of the lens are obtained and the possibility of its reduction is shown.

Keywords: dielectric lens antenna, antenna array, antenna gain, aerodynamic drag coefficient, scanning sector, scanning diagram.

Обеспечение устойчивости функционирования средств связи СМВ и ММВ диапазонов подвижных корреспондентов при перемещениях транспортной базы связано с необходимостью высокоскоростного сканирования (изменения положения в пространстве) лучом антенны в полусферическом пространстве, что, в свою очередь, определяется скоростью и амплитудой колебаний транспортной базы (крен, тангаж, рыскание) и ее поворотами относительно корреспондента. При этом для обеспечения требуемых энергетических потенциалов радиолиний антенны должны обладать достаточно высоким коэффициентом усиления (КУ) и, следовательно, узкими диаграммами направленности (ДН), ширина которых может составлять единицы градусов. Также, антенны должны обладать хорошими аэродинамическими качествами (малым аэродинамическим коэффициентом лобового сопротивления), занимать минимальную площадь (объем) и иметь прочность, близкую к прочности транспортной базы.

Традиционное использование зеркальных антенн с механическим сканированием не всегда приемлемо из-за недостаточной скорости сканирования. Кроме того, необходимо применение радиопрозрачных укрытий, выполняющих функции защиты и обтекателя антенны, что увеличивает ее массу и габариты.

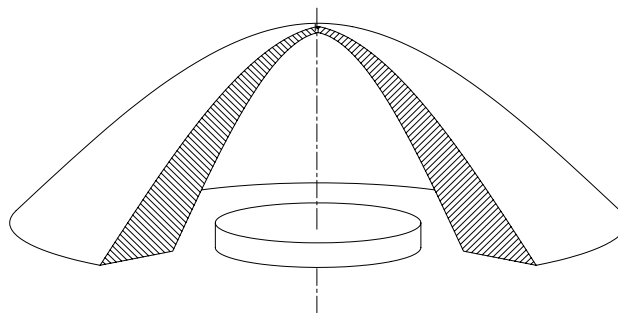


Рис. 1. Диэлектрическая КЛА.

Одним из перспективных путей решения задачи сверхширокоугольного электрического сканирования является использование купольных линзовых антенн (КЛА), содержащих плоскую круглую антенную решетку (АР), расположенную в основании купольной рассеивающей диэлектрической линзы, представляющей собой оболочку в виде купола из однородного диэлектрического материала, с утолщениями к краям (рис. 1) [1, 2].

Диэлектрический купол действует по принципу преломляющей призмы и обеспечивает расширение угла сканирования плоской АР, а также позволяет защитить ее от внешних воздействий. Линза обеспечивает работу в достаточно большом диапазоне частот. Выбором геометрических параметров линзы и ее диэлектрической проницаемости возможно расширить сектор эффективного сканирования облучающей АР либо переместить его относительно главного направления (нормали к плоскости АР). В качестве преломляющих поверхностей возможно использование параболических, сферических и других поверхностей вращения. Такая антенна может обеспечить электрическое сканирование в полусферическом секторе и более. Это делает ее весьма привлекательной для обеспечения спутниковой и радиорелейной связи в диапазонах ММВ и СМВ с подвижными объектами, а также в тех случаях, когда механическое слежение за абонентом невозможно или затруднено. При

использовании высокочастотных диэлектриков толщина линзы может выбираться, исходя из требуемой устойчивости к механическим воздействиям. Линза может быть выполнена низкопрофильной, а изготовление линзы из высокопрочного температуростойкого диэлектрика позволит ей выдерживать значительные механические и тепловые воздействия.

При проектировании КЛА важен выбор требуемой диэлектрической проницаемости ε линз. При малых значениях ε увеличение сектора сканирования облучающей АР вплоть до полусферы может явиться проблематичным, а излишне большие значения ε вызовут значительные отражения от поверхностей линзы и необходимость принятия мер по их снижению. Это является весьма существенным ограничивающим обстоятельством, поскольку достижимый эффективный сектор сканирования плоской АР не превышает величину $\pm 30^\circ \dots 45^\circ$.

Оценку величины расширения сектора сканирования облучающей АР купольной линзой удобно производить при помощи коэффициента увеличения угла сканирования (КУУС) K_s [3], который показывает, во сколько раз угол отклонения луча КЛА в направлении максимума ДН при сканировании превышает соответствующий угол отклонения луча облучающей АР:

$$K_s = \frac{\Theta_{\text{КЛА}}}{\Theta_{\text{АР}}}, \quad (1)$$

где $\Theta_{\text{КЛА}}$ и $\Theta_{\text{АР}}$ – углы отклонения купольной линзовой антенны и облучающей АР, соответственно. Результаты проведенного в приближении геометрической оптики и приближении Кирхгофа [4] расчета зависимости величины коэффициента увеличения угла сканирования K_s от диэлектрической проницаемости ε при $tg\delta = 10^{-4}$ для КЛА с линзой, имеющей параболические поверхности и следующие относительные геометрические размеры: $D_0/D_{\text{АР}} = 3,0$; $D/D_{\text{АР}} = 2,0$; $H/D_{\text{АР}} = 1,0$; $h/D_{\text{АР}} = 0,9165$; $D_{\text{АР}}/\lambda = 40$, где $\lambda = 8$ мм – длина волны в свободном пространстве, представлены на рис. 2 в виде графика. На графике значения диэлектрической проницаемости линзы ε отложены вдоль горизонтальной оси, значения K_s и соответствующие им углы Θ отклонения

луча КЛА показаны на вертикальных осях: для угла отклонения луча облучающей АР $\Theta_{AP} = 45^\circ$ – слева, а для угла отклонения луча облучающей АР $\Theta_{AP} = 30^\circ$ – справа.

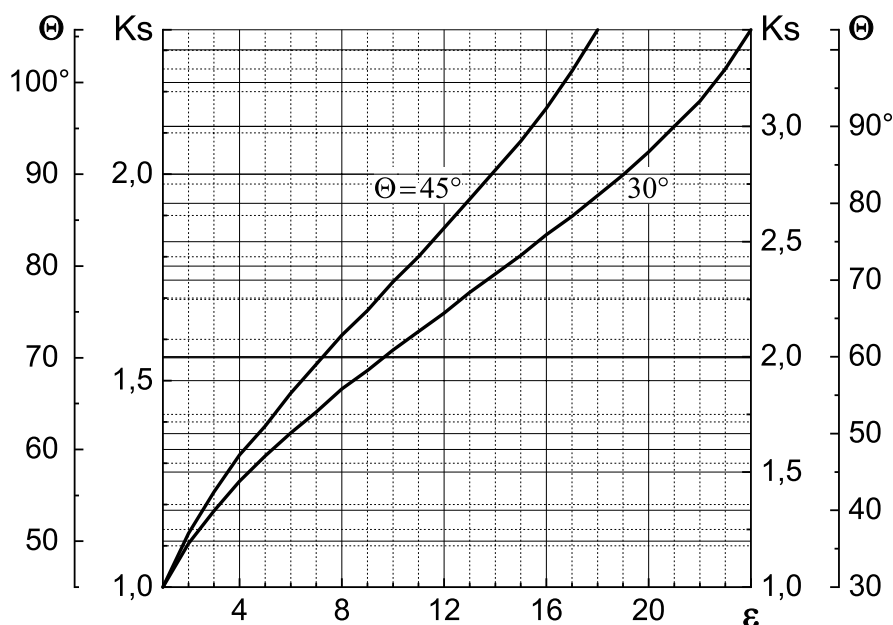


Рис. 2. КУУС КЛА.

Как видно из рисунка, для выбранных размеров увеличение сектора сканирования в 2 раза и более возможно при значении $\varepsilon \geq 10$ для максимального угла сканирования $\Theta_{AP} = 30^\circ$ и $\varepsilon \geq 14$ для максимального угла сканирования $\Theta_{AP} = 45^\circ$. Для АР с максимальным углом отклонения $\Theta_{AP} = 30^\circ$ обеспечить сканирование в полусферическом пространстве возможно при использовании диэлектрических материалов линзы со значениями диэлектрической проницаемости $\varepsilon \geq 21$.

К недостаткам КЛА можно отнести то обстоятельство, что расширение сектора сканирования облучающей АР сопровождается снижением коэффициента усиления антенны в сравнении с АР. Причем при излучении в секторе углов, прилегающих к зениту (в направлении нормали к плоскости АР), снижение КУ может достигать 10...15 дБ и более в зависимости от требуемой характеристики сканирования антенны.

Для увеличения КУ при излучении в секторе углов, прилегающих к зениту, и снижения массы антенны купольная линза может быть выполнена усеченной,

т.е. вершина диэлектрической линзы удаляется, а поверхность выреза имеет форму усеченного прямого кругового конуса с вершиной в центре антенной решетки с осью, совпадающей с центральной осью линзы, причем угол при вершине конуса не превышает максимального угла сканирования антенной решетки (рис. 3) [5].

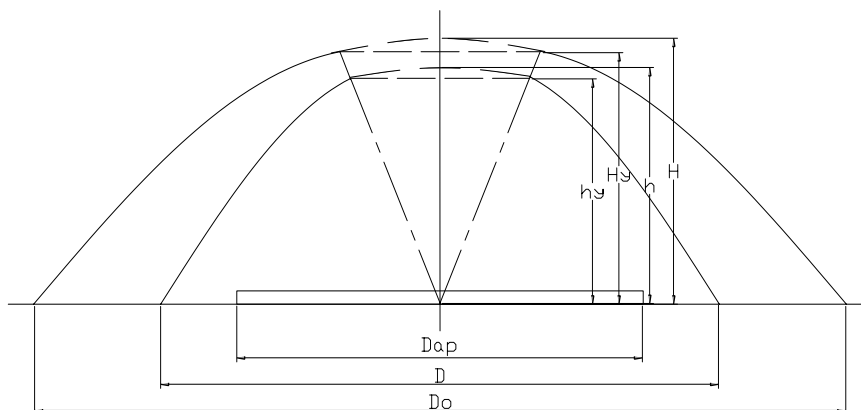


Рис. 3. Усеченная КЛА.

В КЛА с усеченной диэлектрической линзой для заданной характеристики сканирования при излучении в секторе углов, прилегающих к зениту, уменьшения КУ практически не происходит, так как вершина линзы удалена и рассеяние луча в этом направлении отсутствует, кроме того, отсутствуют тепловые потери в диэлектрике и отражения от него. При этом антенна имеет меньшую высоту и меньшую массу, чем антенна с полной линзой. Результаты количественной оценки увеличения КУ для КЛА с параболическими поверхностями, характеризуемыми относительными геометрическими размерами, как и при расчетах КУУС, и параметрами диэлектрика: $\varepsilon = 4$, $\text{tg}\delta = 0$ при излучении в секторе углов, прилегающем к зениту, представлены на рис. 4 в виде нормированной зависимости КУ ΔG антенны с усеченной линзой (штрихпунктирная линия) и антенны с полной линзой (сплошная линия) от угла сканирования θ для случая $H/D_{AP} = 0,8$ (высота усеченной линзы антенны на 20% меньше высоты полной линзы). Из зависимости видно, что для данных размеров антенны при углах сканирования $\pm 15^\circ$, прилегающих к зениту, КУ антенны с усеченной линзой в среднем на 1,5 дБ больше КУ антенны с полной линзой.

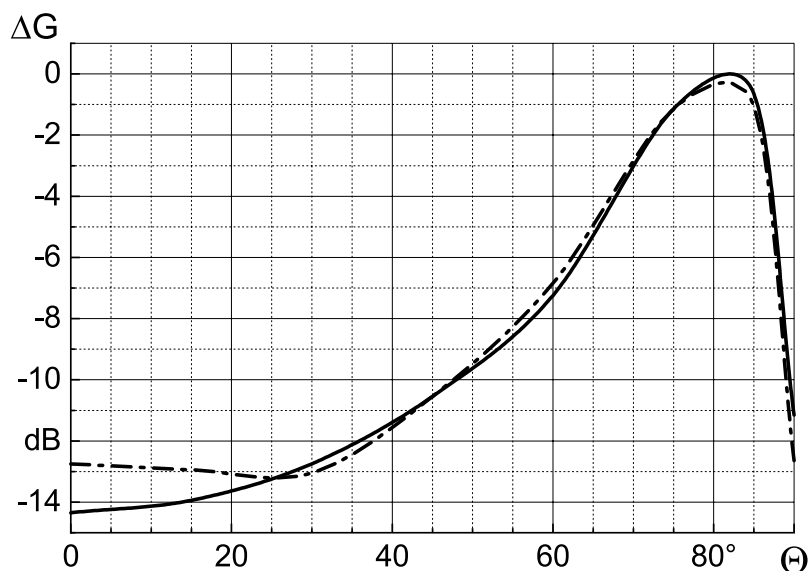


Рис. 4. КУ усеченной КЛА.

Результаты оценки снижения массы антенны с усеченной линзой представлены на рис. 5 в виде зависимости отношения масс линз антенн с усеченной и полной линзами от отношения их высот (величины усечения линзы). Как видно из рисунка, при уменьшении высоты линзы на 20% за счет ее усечения масса линзы снижается на 5%. Аналогичные результаты получены и для антенн со сферическими поверхностями.

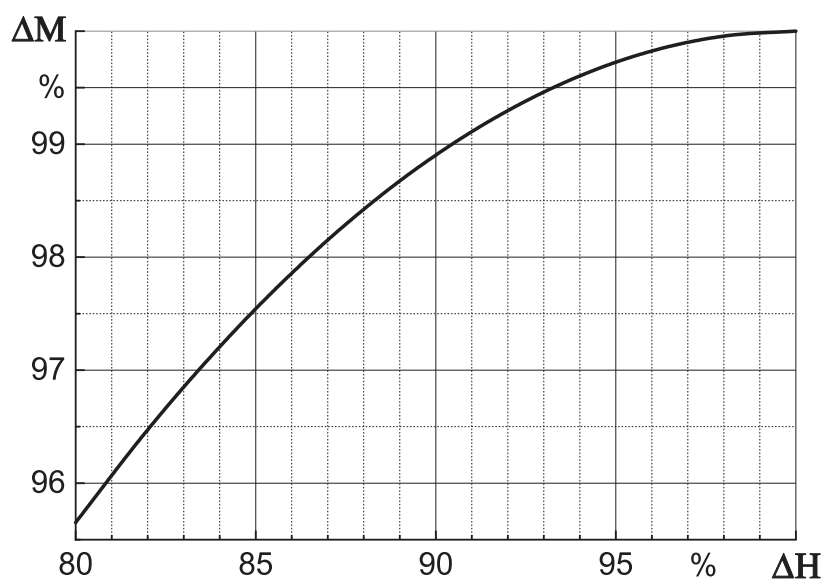


Рис. 5. Масса усеченной КЛА.

Поскольку геометрические размеры линзы и диэлектрическая проницаемость материала, из которого она изготовлена, неизменны, такая антенна не позволяет осуществлять изменения диаграммы сканирования. Достичь возможности изменения диаграммы сканирования, а также добиться увеличения КУ КЛА при сканировании в широком секторе углов возможно путем изготовления линзы из феррита, что позволит управлять ее коэффициентом преломления. Основание такой линзы закрепляется на кольцевой канавке цилиндрического магнитопровода, внешний диаметр которого превышает внешний диаметр основания линзы, причем на внутренней и внешней стенках канавки магнитопровода и на внешней кольцевой поверхности магнитопровода располагаются кольцевые обмотки электромагнита, а между элементами антенной решетки находятся стержни магнитопровода (см. рис. 6) [6]. В данной конструкции АР формирует первичную диаграмму направленности, обеспечивая электрическое сканирование в некотором секторе углов. Ферритовая линза, представляющая собой оболочку из феррита с утолщениями к краям, играет роль преломляющей призмы, увеличивая сектор сканирования. Такое увеличение сопровождается уменьшением КУ антенны в сравнении с АР, причем степень уменьшения зависит от угла сканирования. При пропускании тока через обмотки электромагнита феррит намагничивается, что приводит к изменению его показателя преломления и, следовательно, изменению характеристики сканирования антенны. При этом изменение показателя преломления может быть осуществлено таким образом, чтобы обеспечить минимальное для данной конструкции линзы (геометрических размеров и типа магнитодиэлектрика) снижение КУ антенны в направлении сканирования в сравнении с облучающей АР.

Результаты оценки возможности изменения диаграммы сканирования и увеличения коэффициента усиления купольной диэлектрической линзовой антенны при сканировании в широком секторе углов приведены на рис. 7 в виде графиков нормированных значений коэффициента усиления ΔG . Расчеты

диаграмм сканирования проведены для КЛА с параболическими поверхностями, характеризуемыми такими же относительными геометрическими размерами, как и при расчете КУУС и параметрами материала линзы: $tg\delta = 10^{-3}$, коэффициент преломления материала линзы при этом изменялся от $n = 3$ до $n = 4$. Принятые параметры феррита и диэлектрика близки к справочным значениям для высокочастотных ферритов и ситаллов в диапазонах СВВ и ММВ [7, 8].

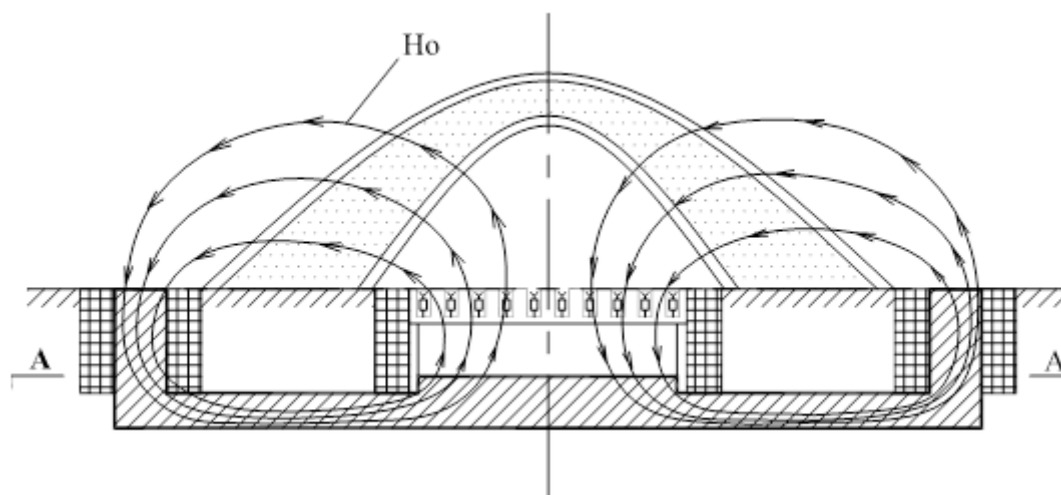


Рис. 6. КЛА с ферритовой линзой.

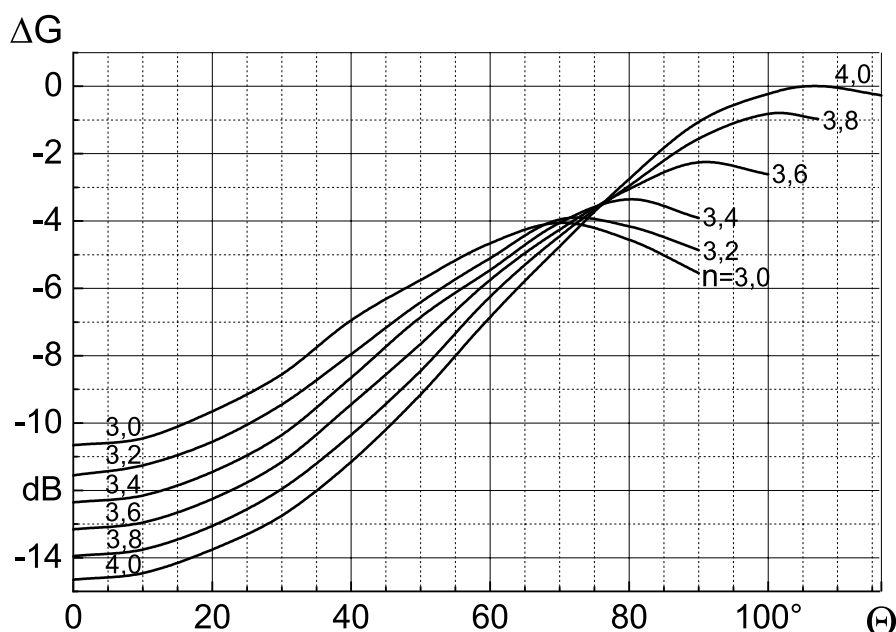


Рис. 7. КУ КЛА с ферритовой линзой.

Кривая с обозначением $n = 3,0$ соответствует начальной диаграмме сканирования КЛА при отсутствии намагничивания феррита. Остальные кривые соответствуют диаграммам сканирования КЛА при соответствующих значениях коэффициента преломления материала линзы в процессе намагничивания. Как видно из рисунка, изменение коэффициента преломления феррита под воздействием намагничивания приводит к существенным изменениям диаграммы сканирования, сдвигу максимума КУ от угла сканирования 70° до угла сканирования 105° , а увеличение КУ купольной линзовой антенны при одновременном изменении угла сканирования и коэффициента преломления материала линзы достигает 4 дБ.

Существенным ограничением КЛА является то обстоятельство, что ее конструкция, обеспечивая круговое сканирование в плоскости фокальной окружности линзы (азимутальной плоскости), позволяет осуществлять сканирование в ограниченных пределах в ортогональной (угломестной) плоскости. Вместе с тем, многие реальные системы связи и радиолокации диапазонов ММВ и СМВ, предполагают не только круговое сканирование в азимутальной плоскости, но и функционирование антенн в широком секторе углов в угломестной плоскости вплоть до полусферы и более.

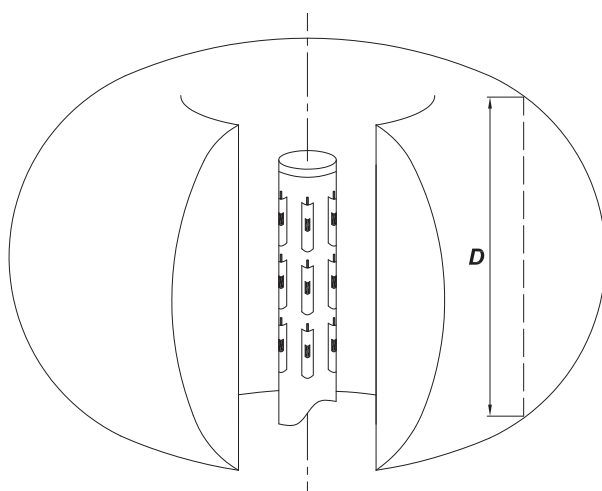


Рис. 8. Тороидальная ЛА.

Обеспечить расширение сектора сканирования в угломестной плоскости возможно путем применения тороидальных линзовых антенн с электронным сканированием в двух плоскостях [9] (см. рис. 8). Такие антенны имеют

однородную тороидальную диэлектрическую линзу, образованную вращением вокруг оси фокусирующего геометрического профиля, и волноводно-щелевой облучатель, состоящий из короткозамкнутого отрезка круглого волновода и переключаемых щелей в волноводе, расположенных вокруг оси вращения, при этом тороидальная линза антенны образована вращением вокруг оси апланатического фокусирующего геометрического профиля, щели облучателя расположены на фокальной окружности линзы и соосных окружностях, а короткозамыкатель выполнен в виде управляемого отражательного фазовращателя. Открытая щель облучает фокусирующую тороидальную диэлектрическую линзу, формирующую ДН антенны. Сканирование осуществляется поочередным электронным переключением щелей при помощи переключаемых диодов, управляющее напряжение на которые подается по линиям управления. Так как антенна имеет апланатический фокусирующий геометрический профиль, это позволяет путем смещения облучателя относительно фокуса отклонять ДН без практически заметных искажений ее формы.

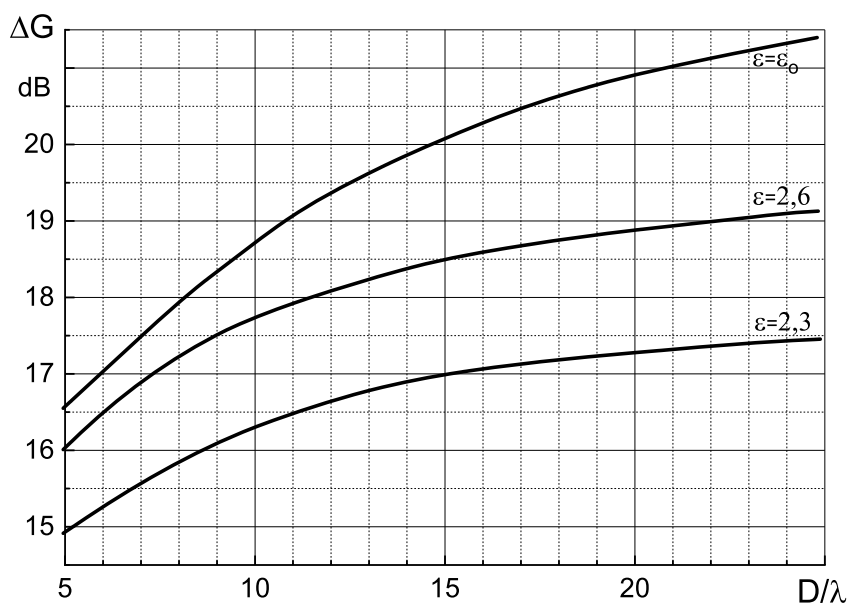


Рис. 9. КУ тороидальной ЛА.

Волноводно-щелевой облучатель имеет несколько рядов щелей, расположенных на фокальной окружности линзы и на соосных окружностях, а короткозамыкатель на конце отрезка круглого волновода выполнен в виде

управляемого отражательного фазовращателя. Число щелей в азимутальной плоскости соответствует числу дискретных положений ДН антенны в азимутальной плоскости, а число рядов щелей соответствует числу дискретных положений ДН антенны в угломестной плоскости. Открыванием щели и одновременной установкой фазовращателем максимума пучности волны в волноводе по центру щели, достигается максимальное излучение щели и, следовательно, максимальный коэффициент усиления антенны.

Результаты расчета КУ тороидальных линзовых антенн для различных значений ε и D/λ приведены на рис. 9 для случая расположения облучателя на расстоянии $D/\lambda = 0,5$ от оси вращения. Ширина ДН облучателя в горизонтальной плоскости принималась равной 90° , а в вертикальной плоскости – 130° . Потери в линзе полагались равными нулю ($\operatorname{tg}\delta = 0$). Расчеты проводились численными методами, в которых задача возбуждения однородных тороидальных тел сводится к скалярным задачам на полуплоскости, которые могут быть приведены к интегральным уравнениям различного типа [10, 11].

Из рисунка видно, что при рассмотренных условиях достижимый КУ тороидальной линзовой антенны составляет около 17...17,5 дБ для $\varepsilon = 2,3$ и около 19 дБ для $\varepsilon = 2,6$. При рациональном выборе значений диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = \varepsilon_0$) для каждого D/λ , при которых обеспечивается максимум КУ, его предельное значение может достигать величины 21 дБ. При использовании облучателей с меньшей шириной ДН в горизонтальной плоскости могут быть получены и большие значения КУ, однако количество парциальных ДН для перекрытия сектора углов $0^\circ \dots 360^\circ$ возрастает.

Применение антенн предложенной конструкции на мачтах позволит устранить потери сигнала, связанные со случайным характером перепадов высот антенн при расположении станций на пересеченной местности. В значительной степени устраняются проблемы при использовании антенн с круговым сканированием на движущихся объектах (автомобили, самолеты и

т.д.), которые связаны со скоростью и амплитудой колебаний транспортной базы.

Недостатком данной антенны является то обстоятельство, что конструкция облучателя, обеспечивая круговое сканирование в плоскости фокальной окружности линзы (азимутальной плоскости), позволяет осуществлять сканирование в пределах, ограниченных числом щелей, соответствующих числу дискретных положений ДН антенны в азимутальной плоскости, и числом рядов щелей, соответствующих числу дискретных положений ДН антенны в угломестной плоскости. В азимутальной плоскости тороидальная линза позволяет осуществить круговое сканирование и практически не влияет на диаграмму направленности ФАР при сканировании, обеспечивая лишь некоторое сужение главного лепестка в этой плоскости [12].

Расширение сектора электрического сканирования лучом тороидальной диэлектрической линзовой антенны вплоть до полного телесного угла возможно путем применения линзовой антенны с электрическим сканированием [13], содержащей однородную диэлектрическую линзу, образованную вращением вокруг оси геометрического профиля, и цилиндрическую фазированную антенную решетку (рис. 10).

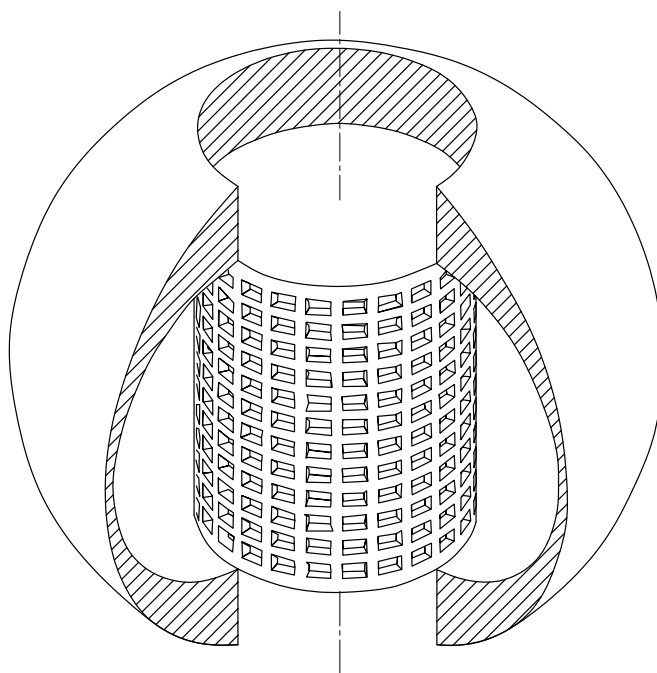


Рис. 10. ЛА с цилиндрической ФАР.

ФАР облучает рассеивающую диэлектрическую линзу и позволяет осуществлять непрерывное сканирование лучом в двух плоскостях посредством изменения условий фазирования ее парциальных излучателей. Диэлектрическая рассеивающая линза в угломестной плоскости действует по принципу преломляющей призмы и обеспечивает расширение угла сканирования ФАР. Выбором геометрических параметров линзы и ее диэлектрической проницаемости можно расширить сектор эффективного сканирования облучающей ФАР в угломестной плоскости вплоть до 180° и более, либо переместить его относительно главного направления (нормали к поверхности ФАР).

Возможность осуществления электрического сканирования в сферическом пространстве позволяет устанавливать данную антенну на мачтах, что требует обеспечения минимального сопротивления ветровым нагрузкам, определяемого аэродинамическим коэффициентом лобового сопротивления, который зависит от геометрических параметров антенны.

Результаты исследования зависимости величины коэффициента лобового сопротивления C_x антенны, содержащей однородную диэлектрическую линзу с цилиндрической ФАР, от изменения ее геометрических параметров представлены на рис. 11. Исследование проводилось численными методами с использованием специализированного модуля «CosmosFloWorks» [14], предназначенного для оценки аэродинамических и тепловых процессов методом конечных элементов. Расчет коэффициента лобового сопротивления антенны под действием аэродинамической нагрузки осуществлялся с использованием твердотельной модели антенны, построенной в системе автоматизированного проектирования «SolidWorks» в натуральную величину. При расчетах считалось, что линза имеет идеально гладкую поверхность. Исходные геометрические параметры линзы выбраны такими же, как и при расчете КУУС.

Для нахождения аэродинамического коэффициента лобового сопротивления C_x (безразмерная величина) использована общеизвестная

формула [15]:

$$C_x = \frac{2F}{\rho v^2 S}, \quad (2)$$

где F , [Н] – сила аэродинамического (лобового) сопротивления; ρ , [кг/м³] – плотность воздуха; v , [м/с] – скорость относительного движения воздуха и антенны; S , [м²] – площадь наибольшего поперечного сечения антенны. Необходимые для расчетов значения плотности воздуха $\rho = 1,204$ кг/м³ и давления $p = 101325$ Па для температуры $t = 20^\circ$ С и высоты $H = 0$ м над уровнем моря выбраны из справочника [16]. Характер воздушного потока при расчетах определялся числом Рэйнолдса, вычисляемом по формуле [17]:

$$Re = \frac{\rho v D_\Gamma}{\mu}, \quad (3)$$

где ρ , [кг/м³] – плотность воздуха; v , [м/с] – скорость относительного движения воздуха и антенны; μ , [Па·с или кг/(м·с)] – динамическая вязкость среды; D_Γ , [м] – гидравлический диаметр, вычисляемый как отношение площади наибольшего поперечного сечения антенны S к периметру смачиваемой поверхности P по формуле [18]:

$$D_\Gamma = \frac{4S}{P}, \quad (4)$$

и для сферической поверхности равен диаметру сферы.

Исследование изменения коэффициента лобового сопротивления антенны C_x при изменении высоты H и внешнего диаметра основания линзы D проводилось в условиях воздействия на антенну движущегося со скоростью 30 м/с воздушного потока, направленного под углом 90° к оси симметрии антенны.

На рис. 11 результаты исследования представлены в виде графиков, отражающих изменение коэффициента лобового сопротивления C_x антенны. Кривые, обозначенные литерой D (сплошная линия) показывают зависимость исследуемого параметра C_x от изменения внешнего диаметра основания линзы, а литерой H (пунктирная линия) – от изменения высоты линзы. Две верхних

кривые, на которые указывает литера *P*, отражают изменение C_x для линзы с параболическими поверхностями, а две кривые в нижней части графика, обозначенные литерой *S*, – для линзы со сферическими поверхностями. Полученные значения C_x соответствуют диапазону чисел Рэйнолдса $\text{Log}_{10}(Re) = 6,30 \dots 6,35$, значения которых указывают на турбулентный характер воздушного потока.

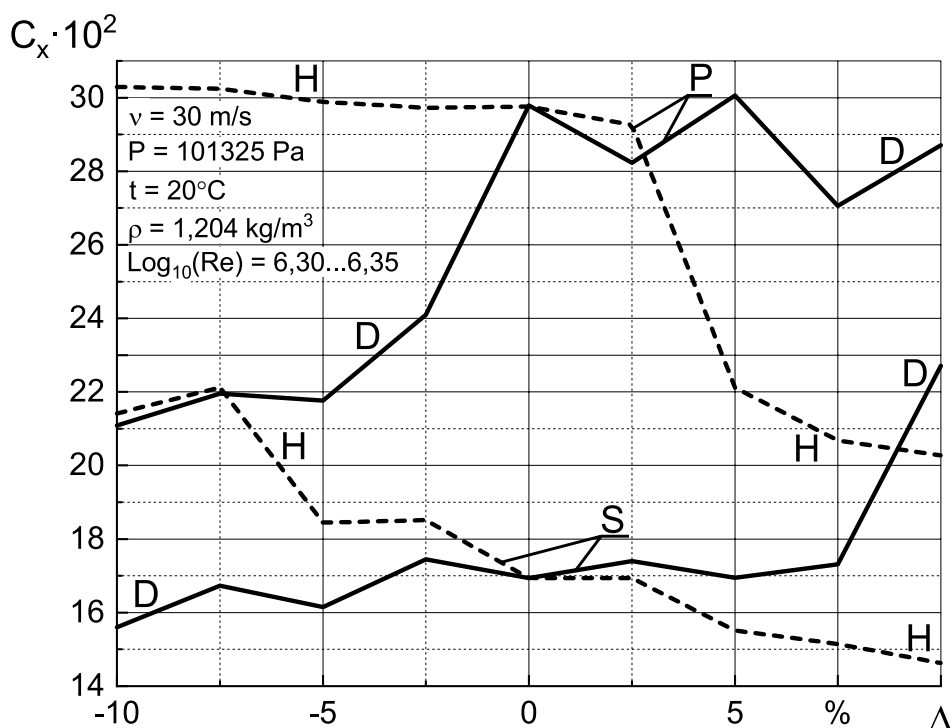


Рис. 11. C_x ЛА с цилиндрической ФАР.

Вдоль вертикальной оси отложены значения безразмерного коэффициента лобового сопротивления C_x антенны (для удобства отображения расчетные значения C_x умножены на десять во второй степени), на горизонтальной оси показаны изменения геометрических параметров линзы в процентах, которые изменялись относительно исходных значений. При проведении расчетов изменялся только один параметр, а остальные сохранялись равными своим исходным значениям.

Как следует из полученных результатов, лобовое сопротивление антенны C_x снижается с увеличением высоты и с уменьшением внешнего диаметра линзы. Линза со сферическими поверхностями обладает лучшими аэродинамическими характеристиками, т.е. имеет более низкий C_x . Точки

пересечения графиков C_x для H и D в данном случае возможно считать исходными точками выбора рациональных значений высоты и внешнего диаметра основания линзы при заданных значениях коэффициента лобового сопротивления C_x . Изменения высоты и внешнего диаметра основания линзы на $\pm 10\%$ относительно исходных значений дают незначительные, на единицы сотых долей, изменения коэффициента лобового сопротивления антенны, свидетельствующие о том, что линза имеет хорошо обтекаемую форму. Значения коэффициента лобового сопротивления $C_x = 0,169$ для линзы со сферическими поверхностями и $C_x = 0,298$ для линзы с параболическими поверхностями, полученные при исходных геометрических размерах линзы, говорят о хорошей аэродинамичности антенны и соизмеримы со значениями $C_x = 0,22$ для тел в форме шара и чисел Рэйнолдса $Re > 2 \cdot 10^5$.

Применением рассмотренных диэлектрических линзовых антенн возможно добиться высокоскоростного сверхширокоугольного электрического сканирования в требуемом секторе углов в зависимости от типа применяемой конструкции и обеспечить возможность управления диаграммой сканирования при заданных массогабаритных параметрах и приемлемых аэродинамических характеристиках. Данные конструкции могут быть использованы со средствами связи диапазонов СМВ и ММВ подвижных корреспондентов, что позволит обеспечить требуемый энергопотенциал радиолиний для связи в движении при перемещениях транспортной базы.

Литература

1. Yung L. Chow, Sujeet K. Radome – lens ENF antenna development // US patent № 4872019, H01Q 15/08, H01Q 1/42, 1989.
2. Медведев Ю.В., Харланов Ю.Я. Характеристики сканирования купольных линзовых антенн, используемых в мобильных средствах спутниковой и радиорелейной связи диапазонов ММВ и СМВ // Антенны. – М., 2004. – Вып. 2(81). – С. 20 – 25.
3. Бубнов Г.Г., Гольберг Б.Х., Коростышевский Е.Н. и др. Увеличение сектора сканирования антенной решетки с помощью купольной линзы // Сб. научно-

методических статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа, 1983. – Вып. 6. – С. 162 – 168.

4. Кашин С.В. Расчет линз из однородного диэлектрика // Радиотехника. – 1990. – № 1. – С. 87.
5. Патент РФ № 2201021, МКИ 7 Н 01 Q 15/08. Купольная линзовая антенна / Е.В. Захаров, А.С. Ильинский, Ю.В. Медведев, О.Ю. Перфилов, А.Б. Самохин, Ю.Я. Харланов (Россия). – Приор. 04.09.2000; Оpubл. 20.03.2003, Бюл. № 8.
6. Патент РФ № 2214658, МКИ 7 Н 01 Q 15/08. Антенна с управляемой купольной линзой / Н.А. Бей, Е.В. Захаров, А.С. Ильинский, Ю.В. Медведев, Ю.Я. Харланов (Россия). – Приор. 20.03.2002; Оpubл. 20.10.2003, Бюл. № 29.
7. Мериакри В.В., Никитин И.П., Чигряй Е.Е. Диэлектрические свойства материалов в околосмиллиметровом диапазоне волн // Радиотехника. – 1995. – № 6. – С. 88 – 95.
8. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
9. Патент РФ № 2236073, МКИ 7 Н 01 Q 15/08,19/15. Тороидальная линзовая антенна с электронным сканированием в двух плоскостях / Е.В.Захаров, А.С.Ильинский, Е.И.Скворчевская, Ю.В.Медведев, Ю.Я.Харланов (Россия).– Приор. 11.09.2002; Оpubл. 10.09.2004, Бюл. № 25.
10. Захаров Е.В., Несмеянова Н.И. Метод решения осесимметричных задач дифракции электромагнитных полей // ЖВМ и МФ, 1978. – № 2. – С. 512 – 515.
11. Никитина Е.В. Интегродифференциальные уравнения 2 рода в задачах дифракции электромагнитных волн на телах вращения тороидального типа // В сб.: Применение ЭВМ для решения задач математической физики. – М: Изд-во МГУ, 1985. – С. 68 – 73.

12. Захаров Е.В., Левченко С.Н., Харланов Ю.Я. Исследование и оптимизация характеристик тороидальных линзовых антенн // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43. – № 5. – С. 571 – 573.
13. Патент РФ № 2297698, МКИ Н 01 Q 15/08. Тороидальная линзовая антенна с электрическим сканированием в полном телесном угле / Ю.В. Медведев, А.И. Скородумов, Ю.Я. Харланов (Россия). – Приор. 11.07.2005; Оpubл. 20.04.2007, Бюл. № 11.
14. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: «БХВ – Петербург», 2006. – 800 с.
15. Кан С.Н., Свердлов И.А. Расчет самолета на прочность: Учебник для вузов по расчету самолета на прочность. – Изд. 5-е, перераб. и доп.– М.: «Машиностроение», 1966. – 520 с.
16. HUTTE. Справочная книга для инженеров, архитекторов, механиков и студентов // Перевод с 25-го немецкого издания под общей редакцией Московского Механического Института имени М.В. Ломоносова. – Т. 1. – Изд. 13-е, испр. и доп. – М.: «Главлит», 1930. – С. 362.
17. Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th Edition / Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch, Alric P. Rothmayer. – John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 796 p.
18. Смыслов В.В. Гидравлика и аэродинамика: Учебник для вузов. Пер. с укр., перераб. и доп. – Киев: «Вища школа», 1979. – 336 с.

Для цитирования:

Захаров Е.В., Ильинский А.С., Медведев Ю.В., Перфилов О.Ю., Самохин А.Б., Скородумов А.И., Харланов Ю.Я. Гибридные диэлектрические линзовые антенны средств связи сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Обзор. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/3/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.3