

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 621.396.677
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.44-49

Дата поступления: 13.11.2019
Дата принятия: 04.12.2019

Методики улучшения направленных свойств апертурных приемных элементов пеленгационной решетки

А.М. Бобрешов, Е.А. Серегина, К.В. Смусева, Г.К. Усков

Воронежский государственный университет
394018, Российская Федерация, г. Воронеж
Университетская пл., 1

В работе рассматривается одиночный биконический сверхширокополосный приемный элемент, входящий в состав пеленгационной антенной решетки. Характеристики направленности и согласования такого элемента хорошо известны и могут быть улучшены несколькими способами, например при помощи диэлектрических линз. Однако использование классических линз существенно увеличивает конечный размер элемента и системы в целом. В работе описываются способы преобразования формы диаграммы направленности при помощи различных диэлектрических вставок, размещаемых во внутреннем объеме приемного элемента. Характеристики направленности и согласования приемного элемента будут определяться формой и диэлектрическими свойствами вставки.

Ключевые слова: неоднородное диэлектрическое заполнение, однородное диэлектрическое заполнение, биконический элемент, диаграмма направленности, диэлектрические линзы.

Введение

В задачах пеленгации зачастую предполагается использование приемных элементов, обладающих довольно высоким уровнем усиления в горизонтальном направлении, низким уровнем побочных лепестков диаграммы направленности и хорошим согласованием во всем диапазоне рабочих частот элемента. Биконический элемент является одним из самых широкополосных апертурных всенаправленных элементов, однако, несмотря на хорошее согласование, диаграмма направленности на верхних частотах рабочего диапазона при перекрытии по частоте, превышающем 10–12, распадается на множество лепестков, а уровень усиления в основном направлении значительно падает [1]. Классический способ преобразования характеристик направленности биконического элемента предполагает использование диэлектрических линз [2], которые располагаются за границами приемного элемента, увеличивая таким образом размер конечной системы. Для применения биконического элемента в составе пеленгационной решетки необходимо улучшить его направленные свойства, используя компактные диаграммообразующие системы.

Для решения этой задачи рассмотрим два вида диэлектрических диаграммообразующих структур. При описании процесса распространения волн в раскрыве апертурного элемента мы будем

пользоваться методами геометрической оптики, поскольку эта математическая модель является наиболее наглядной и обеспечивает достаточно хорошее приближение.

1. Однородная диэлектрическая вставка для преобразования формы диаграммы направленности

Рассмотрим ход лучей, выходящих из фазового центра биконического элемента (рис. 1, а). Искажение диаграммы направленности на верхних частотах рабочего диапазона обусловлено квазисферической формой волнового фронта в раскрыве элемента, что приводит к неравномерности фазового распределения электромагнитной волны в апертуре АВ. Такая неравномерность способствует искажению диаграммы направленности с ростом частоты. Выбором геометрической формы профиля поверхности однородной диэлектрической вставки можно добиться того, что сферическая волна, выходящая из фазового центра О, преобразуется в раскрыве в волну с формой фазового фронта, максимально приближенной к плоской.

Руководствуясь соображениями конструктивной прочности и простотой расчета и изготовления, будем рассматривать вставки с одной преломляющей поверхностью [3–5]. Найдем форму преломляющей поверхности, обеспечивающую получение плоского фронта в раскрыве. При рас-

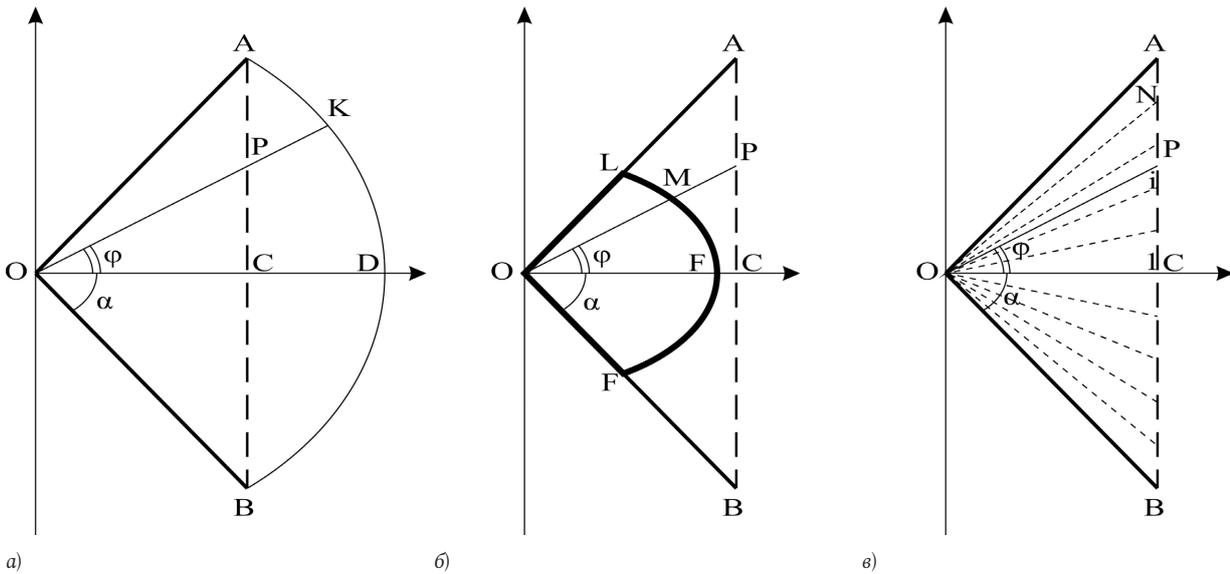


Рис. 1. К вопросу о ходе лучей в раскрыве биконического излучателя: а) без вставки; б) с однородной диэлектрической вставкой; в) с неоднородной диэлектрической вставкой

чете формы профиля однородной диэлектрической вставки будем исходить из условия равенства оптических путей лучей, выходящих из фокуса O под произвольным углом φ до соответствующей точки P на апертуре AB . Следовательно, исходя из симметрии задачи, форма профиля поверхности диэлектрика является четной функцией угла φ , то есть при $\varphi = 0$ луч, выходящий из фазового центра O , не претерпевает преломления на границе раздела двух сред. Найдем уравнение поверхности вставки из условия оптического равенства центрального и любого произвольного луча, выходящего из точки O .

Фазовая скорость распространения в материале вставки:

$$v_{\varphi} = c/\sqrt{\varepsilon}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве. Таким образом, исходя из геометрии задачи (рис. 1, б), можно записать следующее выражение для формы профиля:

$$l(\varphi) = l(\alpha) + R \frac{1}{\sqrt{\varepsilon} - 1} \times \left(\frac{1}{\cos(\alpha)} - \frac{1}{\cos(\alpha - \varphi)} \right), \quad (2)$$

где $l(\varphi)$ – расстояние, которое проходит луч в направлении φ через материал диэлектрика (OM); R – радиус образующих конусов (OC); ε – диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; $l(\alpha)$ – минимальное расстояние, которое проходит луч в материале диэлектрика – в направлении α (OL, OF). Величина $l(\alpha)$ является извест-

ной априорно и выбирается, исходя из следующих соображений. С одной стороны, минимальное расстояние выбирается таким образом, чтобы размер вставки не превышал размера антенного элемента, поскольку изначально мы предъявляем к системе требование компактности. С другой стороны, $l(\alpha)$ не должна быть меньше длины волны на частоте, при которой начинается искажение диаграммы направленности биконического элемента без вставки.

В качестве материала для изготовления вставки предлагается использовать полистирол, поскольку он обладает низким уровнем диэлектрических потерь и высокой устойчивостью к внешним воздействиям.

2. Неоднородная диэлектрическая вставка для преобразования формы диаграммы направленности

Рассмотрим другой способ формирования диаграммы направленности, подразумевающий введение неоднородной диэлектрической вставки в раскрыв приемного элемента. Этот способ также основывается на равенстве времени распространения электромагнитной волны от фазового центра O до произвольной точки P на апертуре элемента. Однако в данной ситуации предлагается заполнить все пространство раскрыва диэлектрической вставкой, а длину оптического пути изменять посредством изменения диэлектрической проницаемости в заданном направлении, меняя тем самым фазовую скорость (1) в зависимости от направления φ [4]. Закон изменения диэлектриче-

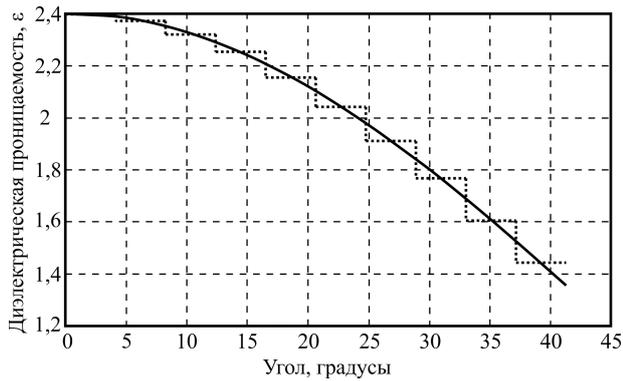


Рис. 2. Диэлектрическая проницаемость в объеме неоднородной вставки

ской проницаемости может быть описан следующим выражением:

$$\epsilon(\varphi) = \epsilon_{\max} \cos^2(\varphi), \quad (3)$$

где ϵ_{\max} — диэлектрическая проницаемость в направлении $\varphi = 0$.

Разумеется, на сегодняшний день тяжело получить материал, диэлектрические свойства которого изменялись бы во всем объеме образца по заданному закону. Однако с достаточной для практики точностью можно воспользоваться следующим приближением. Весь внутренний объем приемного элемента предлагается разбить на N объемных секторов (рис. 1, в), каждый из которых имел бы свое постоянное значение диэлектрической проницаемости. Таким образом, каждый сектор должен быть ограничен двумя поверхностями конусов, имеющих одинаковую высоту, но разные радиусы. При таком разбиении пространства закон изменения диэлектрической проницаемости (3) в объеме диэлектрической вставки в зависимости от угла φ будет изменяться не плавно и описываться ступенчатой функцией (рис. 2). Число секторов разбиения N выбирается, исходя из размеров элемента, технических возможностей при изготовлении вставки и требуемой точности аппроксимации. На рис. 2 показана ступенчатая аппроксимация закона изменения диэлектрической проницаемости при $N = 10$, $\epsilon_{\max} = 2,4$.

Изготовление такой структуры на практике связано с применением технологий трехмерной печати [6]. В качестве материала печати предлагается использовать полистирол. Для этого весь внутренний объем апертурного элемента разбивается на элементарные объемы, каждый из которых заполняется смесью диэлектрика и воздуха в соотношении, определяемом по формуле Лихтеннекера для мелкодисперсных физических смесей:

$$\epsilon_{\text{ЭКВ}} = \epsilon_{\text{П}}^{\theta_{\text{П}}}, \quad (2)$$

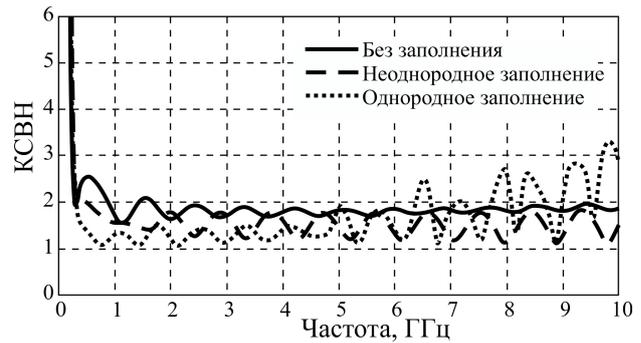


Рис. 3. КСВН приемного биконического элемента пеленгационной решетки

где $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$ — эквивалентная диэлектрическая проницаемость элементарного объема; $\epsilon_{\text{П}}$ — собственная диэлектрическая проницаемость полистирола; $\theta_{\text{П}}$ — объемное содержание полистирола в ячейке. Эквивалентная диэлектрическая проницаемость элементарного объема определяется его положением в объеме неоднородной вставки.

3. Влияние диэлектрических вставок биконического элемента на его характеристики

Для оценки влияния введения описанных диэлектрических вставок на характеристики направленности и согласования приемного биконического элемента пеленгационной решетки было проведено математическое моделирование каждого из описанных вариантов. Ставилась задача получить максимально возможную ширину полосы частот для элемента, нижняя граничная частота которого составляла 0,25 ГГц. Были выбраны следующие характерные размеры биконического элемента: радиус образующих конусов (ОС) — 135 мм, размер апертуры (АВ) — 240 мм. Моделирование производилось методом конечных разностей во временной области.

По результатам моделирования биконический элемент без какой-либо диэлектрической вставки согласован в диапазоне 0,25...10 ГГц с коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) не более 2,5 (рис. 3). При этом наибольший уровень КСВН наблюдается в нижней части рабочего диапазона. При введении в раскрыв элемента однородной диэлектрической вставки согласование с фидерной линией в нижней части диапазона значительно улучшается. В диапазоне до 6 ГГц уровень КСВН не превышает значения 2. При этом в диапазоне от 6 до 10 ГГц среднее значение КСВН значительно возрастает. При заполнении всего внутреннего объема апертурного эле-

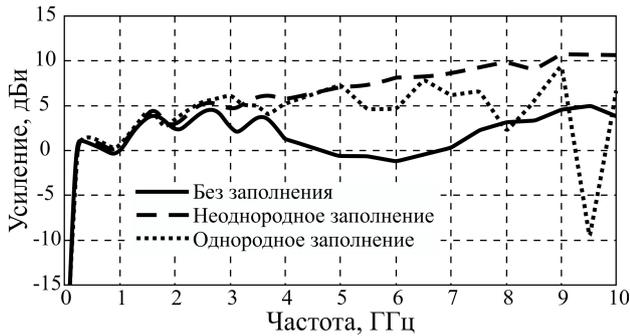


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления биконического элемента пеленгационной решетки от частоты

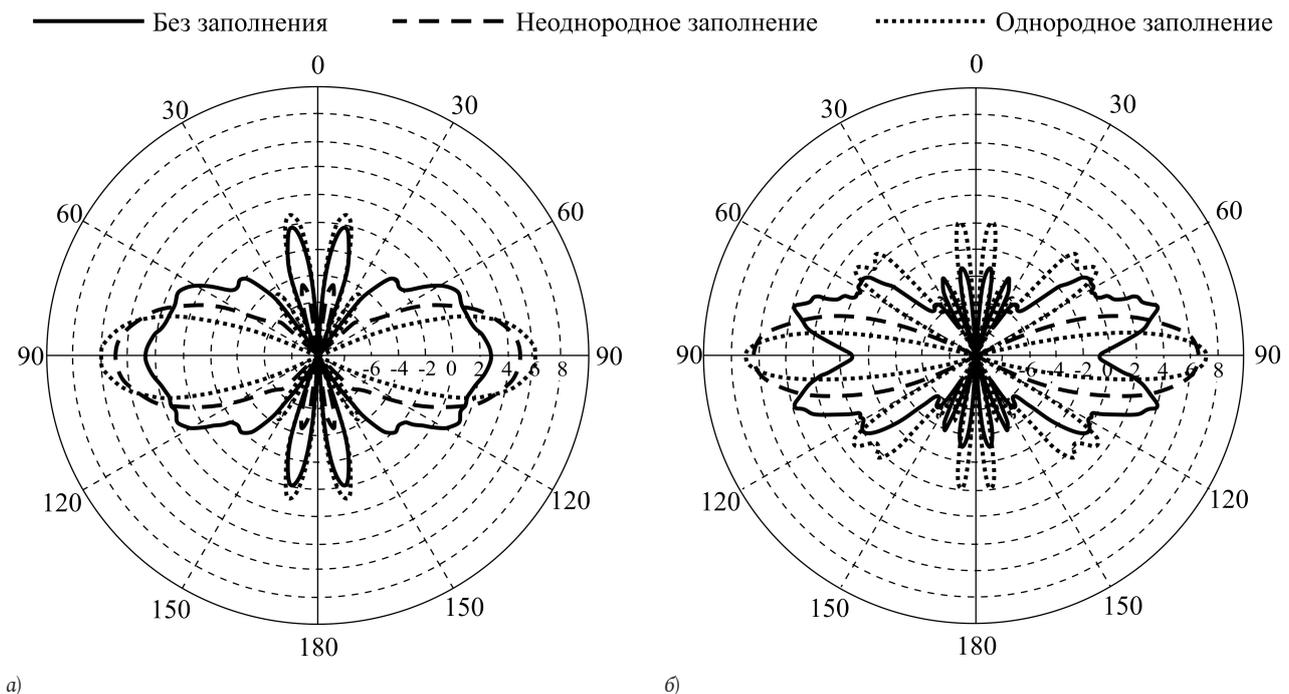
мента неоднородной диэлектрической вставкой, неравномерность КСВН в диапазоне становится значительнее, чем у образца без вставки, однако максимальный уровень во всем диапазоне рабочих частот не превышает 2 (рис. 3).

Введение каких-либо диэлектрических вставок не оказывает существенного влияния на диаграмму направленности биконического элемента в нижней части диапазона рабочих частот (от 250 до 2,5 ГГц), что хорошо видно из графика зависимости усиления в горизонтальном направлении от частоты (рис. 4). В средней части диапазона (от 2,5 до 6 ГГц) введение неоднородной диэлектрической вставки дает значительное улучшение направленных характеристик элемента: усиление в основном направлении становится значительно выше, чем у элемента без заполнения и может превышать его более чем на 5 дБ (рис. 4). Однако

у элемента с однородной диэлектрической вставкой в указанном диапазоне неизбежно появляются боковые лепестки, уровень которых может достигать 1 дБ относительно изотропного излучателя. Введение во внутренний объем элемента неоднородного диэлектрического заполнения позволяет подавить или значительно снизить уровень бокового излучения. Характерные диаграммы направленности в диапазоне от 2,5 до 6 ГГц для приведены на рис. 5 для двух значений частот: 3 ГГц (рис. 5, а) и 5 ГГц (рис. 5, б).

В диапазоне от 6 до 10 ГГц применение однородной диэлектрической вставки становится нецелесообразным. Характерные диаграммы направленности для верхней части рабочего диапазона частот приведены на рис. 6 для двух значений частоты: 8 ГГц (рис. 6, а) и 10 ГГц (рис. 6, б). Диаграмма направленности элемента с однородной вставкой в указанном диапазоне демонстрирует довольно большой уровень бокового излучения, превышающий на некоторых частотах (например, 8 ГГц) уровень основного лепестка.

Введение неоднородного диэлектрического заполнения во внутренний объем биконического элемента, напротив, позволяет получить стабильно высокий уровень усиления в основном направлении излучения, достигающий значения 10 дБ относительно изотропного излучателя в диапазоне от 9 ГГц до 10 ГГц, что является, безусловно, высоким уровнем для всенаправленного в гори-



а)

б)

Рис. 5. Диаграммы направленности биконического излучателя в средней части диапазона рабочих частот: а) на частоте 3 ГГц; б) на частоте 5 ГГц

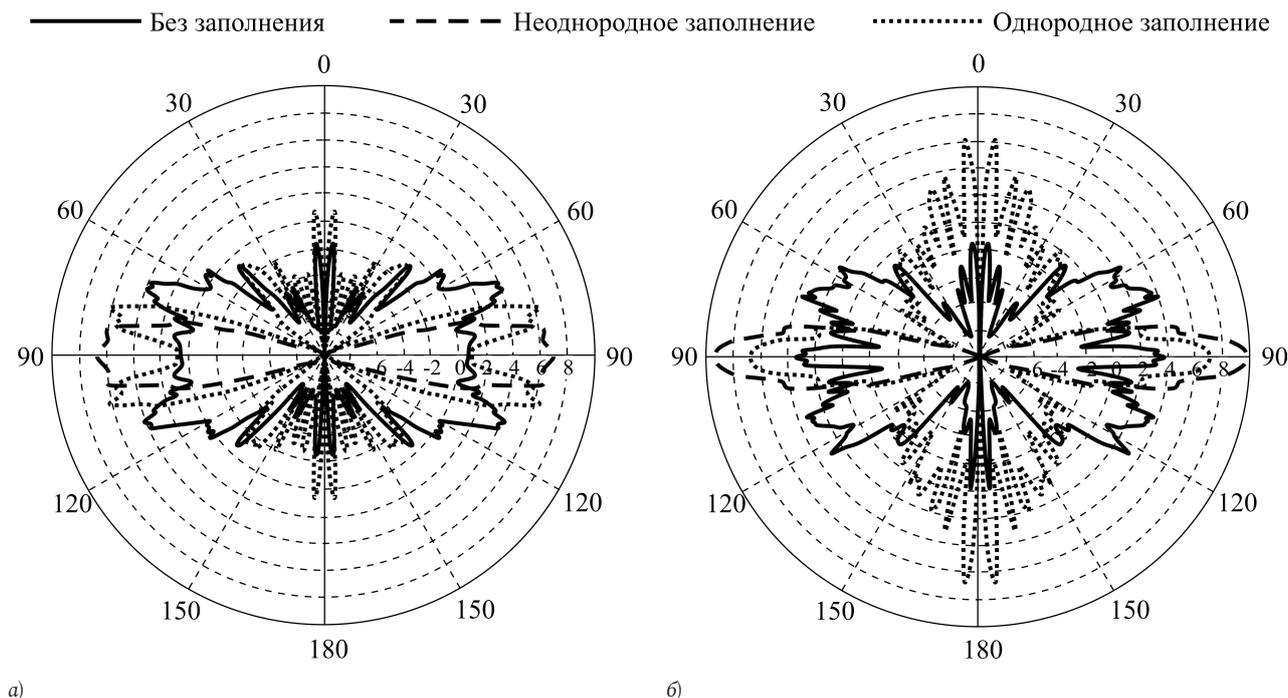


Рис. 6. Диаграммы направленности биконического излучателя в верхней части диапазона рабочих частот: а) на частоте 8 ГГц; б) на частоте 10 ГГц

горизонтальной плоскости элемента (рис. 4). Боковое излучение у элемента с неоднородной вставкой в верхней части диапазона рабочих частот практически отсутствует (рис. 6).

Заключение

В результате исследования влияния различных диэлектрических вставок на характеристики согласования и направленности приемного биконического элемента пеленационной решетки было определено, что введение описанных типов диэлектрических вставок не оказывает практически значимого влияния на диаграмму направленности элемента в нижней части рабочего диапазона частот, однако позволяет улучшить согласование с фидерной линией на нижних частотах указанной части рабочего диапазона. В средней части рабочего диапазона частот введение обоих типов диэлектрических вставок позволяет значительно улучшить усиление в основном направлении излучения. В верхней части рабочего диапазона частот использование однородного диэлектрического заполнения является нецелесообразным, поскольку согласование приемного элемента с фидерной линией становится неудовлетворитель-

ным, а диаграмма направленности распадается на множество лепестков, причем уровень боковых может значительно превышать уровень главного лепестка. Однако введение неоднородного диэлектрического заполнения позволяет получить в верхней части частотного диапазона довольно высокий уровень усиления в основном направлении и избавиться от бокового излучения при сохранении хорошего согласования с линией передачи. Таким образом, биконический приемный элемент без диэлектрических вставок позволяет получить удовлетворительные характеристики при частотном перекрытии 12–14, с однородной диэлектрической вставкой – при перекрытии по частоте порядка 24–25 и с неоднородным диэлектрическим заполнением – с частотным перекрытием порядка 40. Использование того или иного варианта исполнения всенаправленного в горизонтальной плоскости апертурного элемента зависит от конкретных целей и требуемого частотного диапазона решаемой задачи.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (проект МД-6872.2018.9).

Список литературы

1. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ: в 2-х ч. Ч. 1. М.: Связь, 1977. 384с.
2. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Сов. радио, 1974. 280 с.

3. Влияние неоднородного диэлектрического заполнения на направленные свойства ТЕМ-рупора / А.М. Бобрешов [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: XXII Международная научно-техническая конференция. 2016. Т. 2. С. 946–952.
4. Бобрешов А.М., Маркова Е.А., Усков Г.К. Синтез неоднородной диэлектрической среды для улучшения направленных характеристик биконической антенны // Антенны. 2018. № 7. С. 33–39.
5. Биконическая антенна с неоднородным диэлектрическим заполнением для систем радиопеленгации / А.М. Бобрешов [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: XXV Международная научно-техническая конференция. 2019. Т. 4. С. 267–271.
6. Investigation of 3D printed dielectric structure for microwave lens prototyping / G.K. Uskov [et al.] // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2017. P. 294–296. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972647>.

References

1. Ajzenberg G.Z., Jampol'skij V.G., Tereshin O.N. *VHF Antenna: In 2 Parts*. Part 1. Moscow: Svyaz', 1977, 384 p. [In Russian].
2. Petrova R.A. *Lens Antenna*. Moscow: Sov. radio, 1974, 280 p. [In Russian].
3. Bobreshov A.M. et al. The influence of non-homogeneous dielectric filling in the directional properties of the TEM horn. *Radiolokatsija, navigatsija, svjaz': XXII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferentsija*, 2016, vol. 2, pp. 946–952. [In Russian].
4. Bobreshov A.M., Markova E.A., Uskov G.K. Synthesis of inhomogeneous dielectric medium for improved directional characteristics biconical antenna. *Antenny*, 2018, no. 7, pp. 33–39. [In Russian].
5. Bobreshov A.M. et al. Biconical antenna with an inhomogeneous dielectric filling for radio direction-finding systems. *Radiolokatsija, navigatsija, svjaz': XXV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferentsija*, 2019, vol. 4, pp. 267–271. [In Russian].
6. Uskov G.K. et al. Investigation of 3D printed dielectric structure for microwave lens prototyping. *2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2017, pp. 294–296. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972647>.

UDC 621.396.677

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.44-49

Received: 13.11.2019

Accepted: 04.12.2019

Methodology of improvement of directional properties of aperture reception elements of direction-finding array

A.M. Bobreshov, E.A. Seregina, K.V. Smuseva, G.K. Uskov

Voronezh State University
1, Universitetskaya pl.
Voronezh, 394018, Russian Federation

In this paper the single biconical ultra-wideband reception device which is a part of directional-finding array is considered. Directional characteristics and matching of this device well-known and this characteristics can be improvement in several ways, for example, by means of the dielectric lens. However, use of classical lens essentially increments the terminating dimension of a device and all system. In this paper methods of transformation of the shape of a radiation pattern by means of the different dielectric insert in interior volume of receptions device are described. Directional characteristics and matching of a reception element will be defined by shape and dielectric properties of an insert.

Keywords: inhomogeneous dielectric filling, homogeneous dielectric filling, biconical element, directional pattern, dielectric lens.

Бобрешов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники, декан физического факультета Воронежского государственного университета.

Область научных интересов: нелинейные явления во входных твердотельных приборах, автоматизированные измерительные системы научных исследований, хаотические системы связи, сверхширокополосные системы локации и связи.

E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Серегина Екатерина Алексеевна, аспирант кафедры электроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Область научных интересов: электродинамическое моделирование, сверхширокополосные системы связи и радиолокации, антенны и антенные решетки для сверхширокополосных систем связи.

E-mail: markova3673@gmail.com

Смусева Ксения Владимировна, студент кафедры электроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Область научных интересов: сверхширокополосные системы радиолокации и связи, антенны и антенные решетки, излучение и рассеяние электромагнитных волн.

E-mail: smusevaz@gmail.com

Усков Григорий Константинович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета.

Область научных интересов: нелинейные явления в усилительных каскадах, генерация сверхкоротких импульсов, сверхширокополосные системы связи и радиолокации, антенны и антенные решетки для сверхширокополосных систем связи.

E-mail: uskov@phys.vsu.ru