

Анализ стабильности свойств линейной антенной решётки при параболическом изгибании

Б. Э. Назаренко,* Т. К. Артёмова†

*Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Россия, 150003, Ярославль, ул. Советская, д. 14*

(Поступила в редакцию 01.10.2021; подписана в печать 06.10.2021)

Исследовано влияние симметричного изгиба профиля линейной антенной решётки по дуге параболы на её диаграмму направленности, коэффициент полезного действия и согласованность с фидером. Эффекты продемонстрированы на примере 11-элементной модели эквидистантной антенной решётки с различными межэлементными расстояниями, для которой численно решена электродинамическая задача с граничными условиями для векторов электрического и магнитного полей. Сгибание решётки производилось при неизменной её длине вдоль дуги параболы. В качестве параметра, характеризующего профиль, выбрана половина угла апертуры относительно фокуса параболы. Исследование проводилось при синфазной равноамплитудной запитке элементов решётки. Получены оценки значений частоты наилучшего согласования и смещения частоты наилучшего согласования при изменении профиля сгибания, построена зависимость коэффициента полезного действия от параметра сгибания, горизонтальное и вертикальное сечения диаграмм направленности. Результаты показывают, что с уменьшением фокусного расстояния коэффициент полезного действия стабилен, при этом ухудшается не более чем на 0.1 дБ, а характер излучения меняется с однонаправленного на коническое. Частотные параметры и согласованность с фидером показывают стабильное поведение при сгибании профиля, однако существенно меняются при изменении межэлементного расстояния.

PACS: 84.40.Ва

УДК: 621.396.677.3.

Ключевые слова: антенная решетка, параболический профиль, диаграмма направленности, коэффициент полезного действия, частотные свойства, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Антенные решётки — тип антенн, который позволяет усиливать сигнал в точке наблюдения за счёт интерференции излучения от каждого из элементов решётки, а также перестраивать направление максимально-го излучения при изменении амплитуд и фаз сигналов на портах антенных элементов. При помощи решёток достигается концентрация энергии в заданном направлении. В настоящее время теория антенных решеток развивается по ряду направлений.

Помимо стандартной геометрии линейной антенной решётки, когда элементы выстраиваются вдоль одной прямой, современное использование антенных решёток предполагает и изогнутую. Изгибание может быть паразитным, например, при размещении антенной решетки на гибком носителе, подверженном воздействию механических нагрузок, например порывов ветра. Если носитель жёсткий, то таким изгибанием можно пренебречь. С другой стороны, существуют применения, в которых именно изогнутое расположение антенных элементов является естественным, например, при размещении антенны на таких криволинейных поверхностях как запястья, голени, головы пациентов [1], носящих устройства диагностики и дистанционного контроля состояния врачом. В ряде задач радиовидения

или радиолокации оказывается полезным использовать не прямолинейные решётки, а кольцевые или дуговые (в которых элементы заполняют не всё кольцо, а только часть — дугу) [2, 3]. Такая замена позволяет улучшить разрешающую способность методов получения радиоизображения объектов или различения нескольких целей.

Ещё одним направлением является создание виртуальных антенных решёток, например, образованных антеннами ряда подвижных объектов [4, 5]. Объединённые единым центром управления такие антенны способны действовать как единая антенная решётка. Особую привлекательность таким решениям придаёт возможность быстрой перестройки в пространстве антенных элементов и формирование таким образом адаптивной решетки с заданным профилем.

При изменении профиля антенной решётки изменяются распределение комплексных амплитуд токов в точках питания вдоль профиля, условия интерференционных максимумов и минимумов, формирующие максимумы и провалы диаграммы направленности, а также условия электромагнитного взаимодействия между элементами [6]. Таким образом, влияние формы профиля должно сказываться на всех свойствах антенны, включая направленные и частотные.

Если излучение прямолинейных решёток хорошо изучено, то деформированные решётки только становятся объектом интереса. Так как результат интерференции излучения отдельных элементов определяется их взаимным расположением в пространстве, то характер деформации оказывает существенное влияние

* b.e.nazarenko@yandex.ru

† artemova@uniyar.ac.ru

на свойства решётки [7].

Существуют работы, посвящённые свойствам антенных решёток с расположением антенных элементов на дуге окружности. Однако практическую важность имеют и другие формы профилей решеток. Например, можно показать, что при равномерно распределённых нагрузках прямоугольные пластины носителя, закреплённые вдоль одной из осей, испытывают так называемый чистый изгиб, при котором профиль изгиба можно считать параболическим цилиндром [8]. Аналогичным образом деформируется и ранее прямолинейный носитель (типа стержня или балки). Следовательно, возникает параболическое изгибание линейной антенной решетки.

Электродинамические условия, в которых оказываются элементы решётки при изгибании, зависят от величины межэлементного расстояния (шага) решетки. Как показано в [9], величина шага сказывается существенно. Таким образом шаг решётки — фактор, который необходимо учитывать в ходе исследования.

Боковое излучение антенных элементов создаёт наведённые токи в соседних элементах, что проявляется во взаимном влиянии элементов [10] и характеризуется матрицей импедансов [11]. Взаимному влиянию элементов в дуговой решётке посвящены работы [12, 13]. В [12] был описан эффект разбаланса входных импедансов между элементами линейной антенной решётки при её сгибании по дуге окружности. Показано, что с ростом угла сгибания в целом ситуация ухудшается. Следовательно, и при сгибании по дуге параболы должно ухудшаться в итоге согласование антенны с фидером. Представляет интерес оценка величины этого эффекта.

Целью работы является анализ стабильности свойств линейной эквидистантной антенной решётки из дипольных элементов к параболическому изгибанию.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 формулируется задача и условия, в которых она решается, в том числе описывается профиль изгиба и свойства антенной решетки, выбранные для анализа. Раздел 2 посвящён моделированию и его результатам, в том числе обсуждению стабильности свойств решёток при различных профилях изгиба. Главные выявленные эффекты и использование результатов обсуждается в заключении.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим эквидистантную линейную антенную решётку из N одинаковых полуволновых металлических диполей, ориентированных вдоль оси Z декартовой системы координат и размещённых на расстоянии d друг от друга.

Предполагая, что носитель тонкий и выполнен из диэлектрика с малой диэлектрической проницаемостью, пренебрегаем, во-первых, влиянием носителя на излу-

чение антенной решётки, и во-вторых, изменением размеров носителя при изгибании. Второе даёт основание считать общую длину антенны вдоль профиля изгиба неизменной.

В исходном виде общая длина решётки равна $L = d(\lfloor N/2 \rfloor - 1)$. Полагаем, что носитель закреплён в начале координат, т.е. в центре центрального элемента. Изгибание происходит по параболическому профилю (рис. 1), который в связанной с центральным элементом декартовой системе координат описывается уравнением:

$$y = \frac{x^2}{4F}, \quad (1)$$

где F — фокусное расстояние параболы.

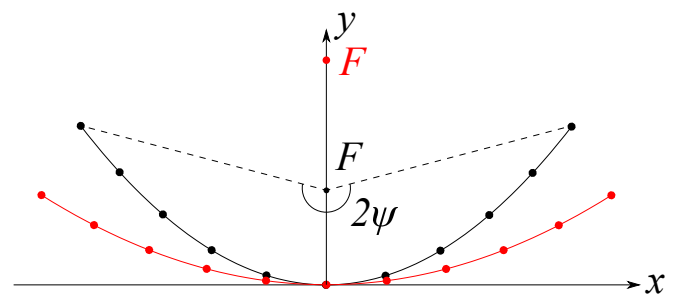


Рис. 1. Геометрия задачи

Для соотнесения с другими профилями изгиба при описании параболы удобно использовать некоторый угол ψ — угол между двумя направлениями из точки фокуса: к центральному и к крайнему элементам решётки. Тогда, изменяя ψ , можно изменять и фокусное расстояние параболы в соответствии с формулой:

$$F = \frac{L}{2\xi_{\max} \sqrt{1 + \xi_{\max}^2} + 2 \ln \left(\xi_{\max} + \sqrt{1 + \xi_{\max}^2} \right)}, \quad (2)$$

$$\xi_{\max} = \operatorname{tg}(\psi/2).$$

Увеличение изгиба по сравнению с прямолинейной решёткой, в которой элементы размещаются вдоль одной прямой, соответствует уменьшению фокусного расстояния. На рис. 1 чёрная линия, соответствующая сильнее согнутой антенной решётке, описывается большим значением параметра ψ , чем красная.

Координаты элемента в таком описании $x_i = 2\xi_i F$, $y_i = \xi_i^2 F$, то есть, выражаются через ξ_i , являющиеся решениями уравнений:

$$\xi_i : \xi_i \sqrt{1 + \xi_i^2} + \ln \left(\xi_i + \sqrt{1 + \xi_i^2} \right) = i \frac{L}{\lfloor N/2 \rfloor 2F},$$

$$i = -\lfloor N/2 \rfloor, \dots, \lfloor N/2 \rfloor.$$

Здесь межэлементное расстояние определялось вдоль дуги параболы и поддерживалось постоянным.

При изменении фокусного расстояния координаты элементов решётки изменяются. Будут изменяться и электродинамические условия, в которых оказывается каждый элемент из-за взаимного влияния и совместной работы элементов в решётке. Так как эти условия отличаются не только при размещении элементов вдоль профиля некоторой формы, но и при различном межэлементном расстоянии (шаге решетки d), то исследование будем проводить с учётом различных вариантов компоновки решётки:

1. плотных, с малым относительно средней рабочей длины волны расстоянием d , которые используют для экономии места;
2. обычных, с полуволновым расстоянием между элементами, что, как считается, обеспечивает с некоторой точностью минимизацию взаимного влияния между элементами и позволяет, например, считать приём сигнала различными элементами некоррелированным;
3. разреженных, с большим относительно длины волны расстоянием d .

Будем характеризовать свойства антенной решётки следующими функциями и величинами [6]:

1. диаграмма направленности, представленная в виде двух ортогональных сечений (горизонтального и вертикального),
2. полный коэффициент полезного действия, учитывающий как рассогласование элементов решётки с фидерами, так и потери в элементах решётки,
3. частотная зависимость коэффициента отражения от входа всей решётки в логарифмическом масштабе.

При этом будем рассматривать работу решётки при синфазном равноамплитудном распределении комплексных амплитуд спектральных составляющих тока по профилю решётки. В этом случае прямолинейная решётка максимально излучает перпендикулярно линии профиля, имеет высокий КПД, узкую диаграмму направленности в вертикальной плоскости.

Опишем изменение свойств решётки при изгибании решётки по параболическому профилю в некотором диапазоне значений параметров ψ и охарактеризуем стабильность этих свойств.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование проводилось следующим образом. Была построена электродинамическая модель антенной решётки: полуволновые элементы были рассчитаны на работу на частоте 3550 МГц (в диапазоне частот,

отведённом для исследований и медицины), выполнялись из медных проводников. Каждый элемент запитывался отдельно от согласованного с ним фидера. Параметры модели, на которой в данной статье демонстрируются наблюдаемые эффекты, приведены в табл. I.

Таблица I. Параметры модели

Материал	Медь
Количество элементов	11
Центральная частота, ГГц	3.55
Диапазон значений параметра ψ , °	от 0 до 75
Расстояние между элементами d	0.3 λ , 0.5 λ и 0.7 λ
Анализируемый диапазон частот, ГГц	от 2.5 до 4.5

Межэлементное расстояние изменялось от 0.3 λ (что возможно при плотной компоновке решётки) до 0.7 λ (разреженная компоновка), где λ — центральная длина волны излучения. Угол, описывающий параболическое изгибание решётки в сторону оси Y , изменялся от 0 (прямолинейная решётка) до 90° (сильное изгибание).

Электродинамическая задача заключалась в решении уравнений Максвелла с граничными условиями, заданными на поверхности проводника. Определялись напряжённости электрического и магнитного полей, а по ним — диаграммы направленности решётки при равноамплитудной синфазной запитке (рис. 2) и другие характеристики.

На рис. 2а–в приведены горизонтальные сечения диаграммы направленности (ДН). В зависимости от угла ψ изменяются условия интерференции, и излучение то имеет в передней полуплоскости один главный лепесток (то есть, решётка имеет двунаправленное излучение), то образует конус. В целом с ростом ψ главный лепесток сначала расширяется, затем в прежнем направлении максимального излучения начинает формироваться локальный минимум, который далее сменяется локальным максимумом, однако форма ДН уже не имеет одного чётко выраженного главного лепестка. Примеры двух форм диаграмм направленности в трёхмерном виде приведены на рис. 3. Благодаря симметрии рассматриваемой задачи диаграммы симметричны относительно оси Y .

Переход от однонаправленного к коническому излучению происходит для различных межэлементных расстояний по-разному. С ростом межэлементного расстояния диаграмма направленности быстрее «рассыпается»: если при $d = 0.3\lambda$ коническое излучение появляется примерно при $\psi > 60^\circ$, то при $d = 0.3\lambda$ и $d = 0.7\lambda$ — для углов, больших 45° и 30° соответственно.

Излучения в передней (в положительном направлении оси Y) и в задней полуплоскостях отличаются, главный лепесток в передней полуплоскости всегда уже, чем в задней. Количество побочных лепестков увеличивается с ростом d . При больших d диаграмма направленности становится симметричной относитель-

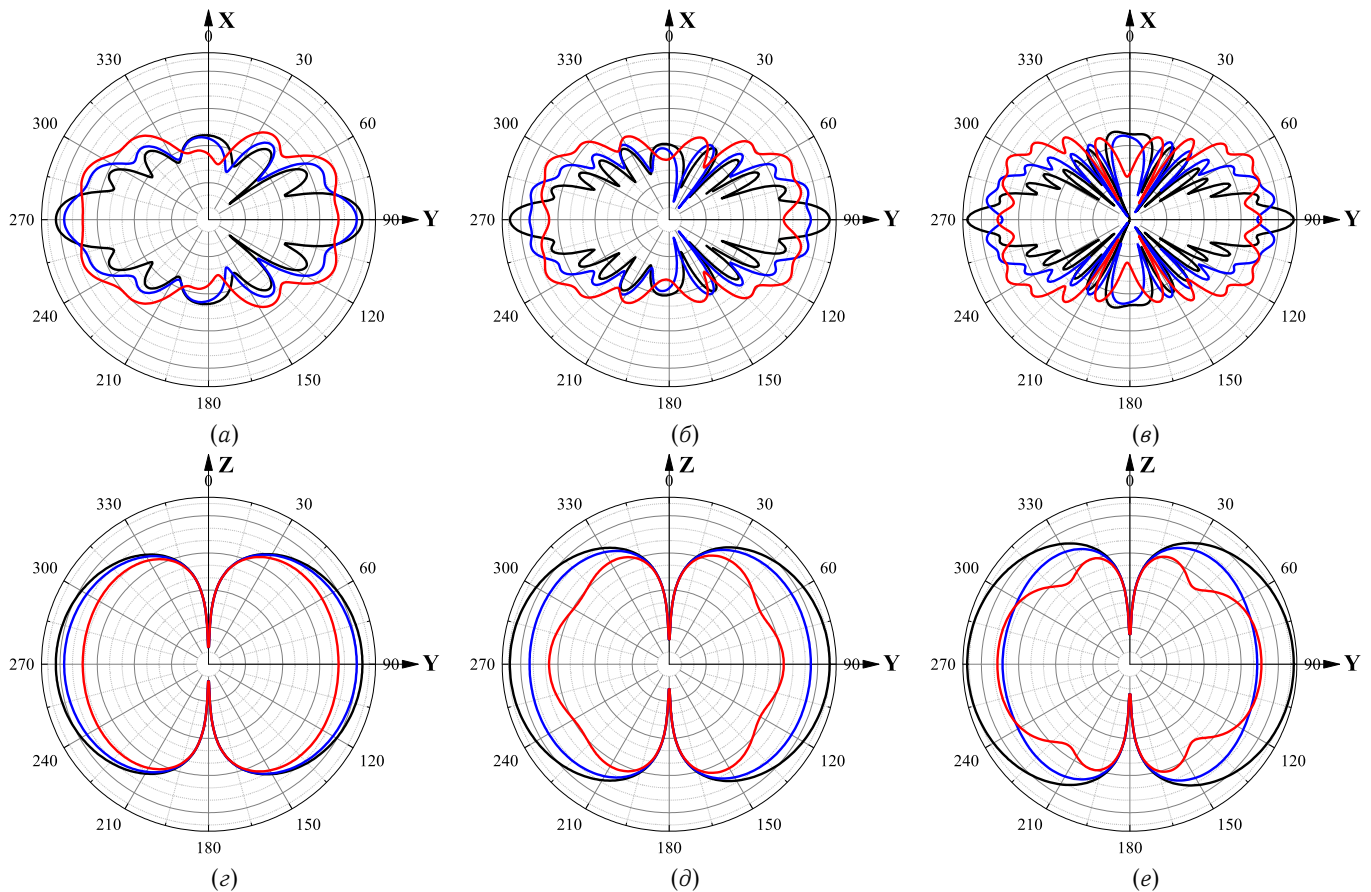


Рис. 2. Диаграммы направленности решётки для различных апертурных углов (15° — чёрная, 45° — синяя, 75° — красная линии) и межэлементных расстояний (0.3λ — а и г, 0.5λ — б и д, 0.7λ — в и е)

но оси X.

На рис. 2г–е приведены вертикальные сечения диаграммы направленности. Их изменение с изменением параметра ψ отображает изменение трёхмерной ДН.

Самым интересным эффектом является стабильность полного КПД при сгибании. Как показано на рис. 4, в отличие от диаграммы направленности полный КПД, выраженный в дБ, при изгибании антенной решетки изменяется незначительно: максимальное отклонение от КПД для прямолинейной решётки наблюдается для разреженной решётки и не превышает 0.1 дБ. В целом при сгибании КПД несколько ухудшается (значения удаляются от идеального значения — нуля децибел).

При сгибании изменялись также частотные свойства решетки: наименьшая частота наилучшего согласования, минимальная величина коэффициента отражения от входа в логарифмическом масштабе (параметр S11), рабочая полоса частот, определённая по уровню -10 дБ параметра S11 (табл. II).

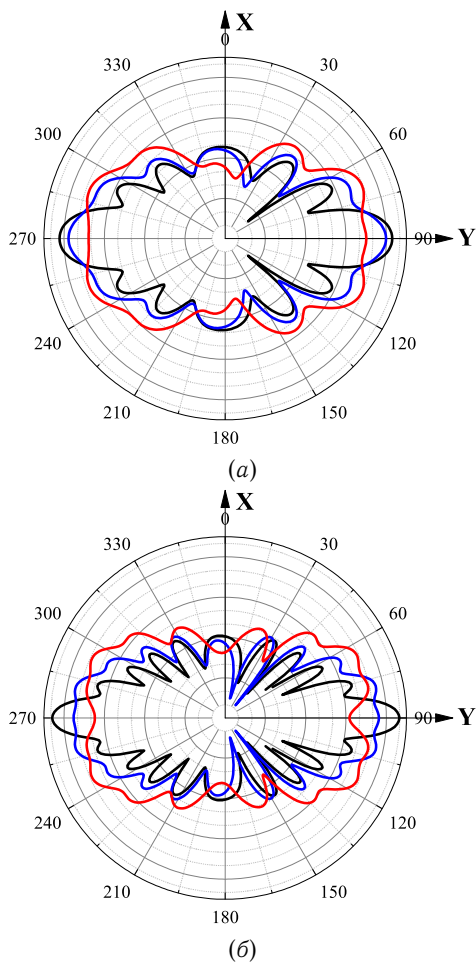
Частота наилучшего согласования антенной решетки с фидером смещалась при изменении параметра ψ от 0° до 75° на величину от 4 до 9 МГц. Оценку этой величины можно дать, исходя из назначения решетки. Если использовать её для передачи медицинских изображе-

ний и видео при оказании услуг телемедицины или для прямой трансляции научных экспериментов с помощью сетей фиксированного беспроводного доступа, то рабочая полоса частот на один канал может составлять от единиц до 10 МГц. То есть, хотя по сравнению с групповой полосой в 200 МГц для систем фиксированного беспроводного доступа это не более 5%, по сравнению с рабочей полосой частот одного канала относительное смещение может превышать 100%, что соответствует автоматической смене канала, на которой осуществляется связь.

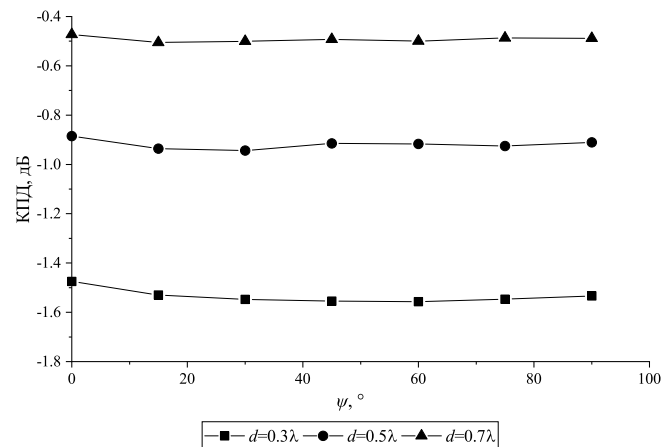
Влияние межэлементного расстояния на различные частотные свойства согнутых решёток различно. Максимальное смещение частоты наилучшего согласования происходит у стандартных решеток с полуволновым шагом, а минимальное — у разреженных решеток. Так как коэффициент отражения от входа антенн уменьшается с уменьшением разности сопротивлений антенны и питающего её фидера, то минимум смещения частотного диапазона у разреженных решёток можно объяснить уменьшением взаимных сопротивлений, изменяющих величину сопротивления каждого из элементов решётки по сравнению с собственными сопротивлениями, как если бы они были независимы друг от друга.

Таблица II. Частотные свойства антенной решётки при различных межэлементных расстояниях

Межэлементное расстояние d	0.3 λ	0.5 λ	0.7 λ
Частота наилучшего согласования f_0 , ГГц	3.683	3.726	3.618
Смещение частоты наилучшего согласования при изменении ψ от 0° до 75° Δf_0 , МГц	9	18	4
Параметр $S_{1,1}$ на частоте наилучшего согласования, дБ	-11.47	-19.63	-45.28
Модуль изменения параметра $S_{1,1}$ на частоте наилучшего согласования, дБ	0.6	1.04	5.82
Ширина полосы частот по уровню -10 дБ $S_{1,1}$, МГц	341.79	448.45	370.59
Изменение ширины полосы частот, МГц	6.77	4.83	0.46

Рис. 3. Трёхмерные диаграммы направленности антенной решётки для различных углов ψ , демонстрирующие: *a* — двунаправленное изучение, *b* — биконическое

По этой же причине с ростом межэлементного расстояния увеличивается модуль $S_{1,1}$, то есть, согласование улучшается, и всё большая доля энергии источника поступает в антенну. Сходный характер имеет и изменение величины наилучшего согласования при параболическом изгибании решётки. В плотной решётке взаимное влияние элементов очень сильно, поэтому величина провала на графике частотной зависимости

Рис. 4. КПД антенной решётки для различных углов ψ и при различных значениях d

$S_{1,1}$ с ростом ψ практически не изменяется. В то же время относительное изменение $S_{1,1}$ при сгибании является самым низким у решётки с полуволновым шагом. Следовательно, можно сделать вывод, что из всех трёх компоновок стандартная самая устойчивая к сгибанию по этому параметру: согласованность такой антенной решётки с фидером практически не изменяется с ростом ψ .

Самую широкую полосу частот имеет полуволновая решётка. Изменение же ширины полосы частот, определённой по уровню -10 дБ $S_{1,1}$, минимально для разреженной решётки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что сгибание антенной решётки очень сильно влияет на форму ДН, то есть, она хорошо управляется, но о её стабильности можно говорить лишь до углов ψ около 30° . Но так как КПД антенны при параболическом сгибании с сохранением общей длины вдоль профиля решётки ухудшается несущественно, то это изменение можно использовать для достижения заданной практически полезной формы ДН, если плата в виде смещения частоты

наилучшего согласования является приемлемой. Кроме того, среди рассмотренных компоновок антенной решетки самой стабильной к изгибанию оказывается либо стандартная полуволновая, либо разреженная. Если предвидится изгибание профиля решетки, вызванное

естественными (например, ветер) или искусственными причинами, то, как демонстрируют полученные зависимости и оценки, не стоит выбирать плотную компоновку: плата за экономию места окажется слишком высока.

-
- [1] *Bashri M.S.R., Arslan T., Zhou W.* // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (ECAP). 2017. P. 172.
- [2] *Du J. et al.* // 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). 2018. P. 357.
- [3] *Кучумов А. А., Мясин К. В., Припутин В. С.* // Т-Comm. 2010. № 11. С. 39.
- [4] *Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M.* // IEEE International Conference on Communications (ICC). 2018. P. 1.
- [5] *Коровин К.О., Кузьмин С.В.* // Труды учебных заведений связи. 2020. **6**, № 2. С. 39
- [6] *Balanis C.A.* // Antenna theory, 2nd ed. John Sons. 1997.
- [7] *Song L., Rahmat-Samii Y.* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. **66**, N5. P. 2219.
- [8] *Саусвелл Р.В.* // Введение в теорию упругости для инженеров и физиков. 1948.
- [9] *Антинов С.А.* и др. // Вестник ВГТУ. 2020. № 4. С. 91.
- [10] *Zavadski S.* // 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2017. P. 162.
- [11] *Sinnott D.* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1973. **21**, N3. P. 385.
- [12] *Nazarenko B.E., Artemova T.K., Gvozdev A.S.* // International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2020. P. 1.
- [13] *Protsenko M.B. et al.* // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques. 2013. P. 261.

Analysis of the stability of the properties of a linear antenna array under parabolic bending

B.E. Nazarenko^a, T.K. Artemova^b

*Department of Infocommunication and radiophysics, Faculty of Physics,
P.G. Demidov State University. Yaroslavl 150003, Russia.
E-mail: ^ab.e.nazarenko@yandex.ru, ^bartemova@uniyar.ac.ru*

The influence of the symmetrical bending of the profile of a linear antenna array along the arc of a parabola on its radiation pattern, efficiency, and consistency with the feeder is studied. The effects are demonstrated on the example of an 11-element model of an equidistant antenna array with different inter-element distances, for which an electrodynamic problem with boundary conditions for the electric and magnetic field vectors is numerically solved. The lattice was bent at a constant length along the arc of the parabola. Half of the angle of the aperture relative to the focus of the parabola is selected as the parameter that characterizes the profile. The study was carried out with in-phase equal-amplitude power supply of the grid elements. Estimates of the values of the best matching frequency and the best matching frequency offset when changing the bending profile are obtained, the dependence of the efficiency coefficient on the bending parameter, the horizontal and vertical cross-sections of the radiation patterns are constructed. The results show that with a decrease in the focal length, the efficiency is stable, while it deteriorates by no more than 0.1 dB, and the nature of the radiation changes from unidirectional to conical. The frequency parameters and the consistency with the feeder show a stable behavior when the profile is bent, but they change significantly when the inter-element distance changes.

PACS: 84.40.Ba

Keywords: antenna array, parabolic profile, radiation pattern, efficiency, frequency properties, simulation.

Received 01 October 2021.

Сведения об авторах

1. Назаренко Богдан Эдуардович — электроник кафедры инфокоммуникаций и радиофизики; тел.: (485) 279-77-70, e-mail: b.e.nazarenko@yandex.ru.
2. Артёмова Татьяна Константиновна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникаций и радиофизики; e-mail: artemova@uniyar.ac.ru.