



УДК 621.396.677

М. Р. Бибарсов, Е. В. Грибанов

Военная академия связи (Санкт-Петербург)

Д. Д. Габриэльян, Ден. С. Федоров, Дан. С. Федоров

ФГУП "Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи"

Синтез амплитудно-фазового распределения в квазиколецевой антенной решетке

Разработан алгоритм синтеза амплитудно-фазового распределения квазиколецевой антенной решетки, обеспечивающий минимальное среднеквадратическое отклонение параметров формируемой диаграммы направленности этой решетки от заданных параметров диаграммы направленности колецевой антенной решетки.

Кольцевая антенная решетка, квазиколецевая антенная решетка, синтез амплитудно-фазового распределения, диаграмма направленности

Кольцевые антенные решетки (КАР) в настоящее время находят широкое применение в радиотехнических системах, включая радиопеленгаторы различного назначения, системы связи и космические радиотелескопы [1]–[5]. Во многих случаях КАР могут заменяться квазиколецевой антенной решеткой (ККАР), в которой излучатели располагаются на некоторой замкнутой линии, несовпадающей с окружностью. Такое расположение излучателей может быть обусловлено рядом причин. В частности, переход от КАР к ККАР может определяться ограничениями на расположение излучателей на объекте, в первую очередь малогабаритном транспортном средстве. Кроме того, для улучшения характеристик направленности могут использоваться КАР с двумя и большим числом колец (рис. 1, *а*), которые могут рассматриваться как ККАР с геометри-

ей по рис. 1, *б* (излучатели показаны круглыми маркерами). Несмотря на то что вопросы синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) поля таких антенных систем рассматриваются в большом числе работ [6]–[9], разработанные методы носят, как правило, достаточно общий характер или конкретизированы для синтеза АФР в антенных решетках с плоским раскрытием. С учетом широкого применения КАР и ККАР отсутствие указанных методов не всегда позволяет добиваться заданных требований к характеристикам направленности ККАР.

Таким образом, с одной стороны, геометрия ККАР широко распространена в различных областях науки и техники. С другой стороны, вопросы синтеза АФР ККАР по заданной диаграмме направленности (ДН) практически не рассматривались, хотя представляют не только практическую важность, но и имеют самостоятельную теоретическую значимость, как обобщение теории синтеза криволинейных антенн.

В свете изложенного целью настоящей статьи является разработка и оценка эффективности алгоритма синтеза АФР ККАР по заданной ДН.

Алгоритм синтеза АФР ККАР. При разработке алгоритма синтеза АФР ККАР будем считать, что заданными являются ширина главного максимума ДН и уровень боковых лепестков (УБЛ). В этом случае может быть сформулирова-

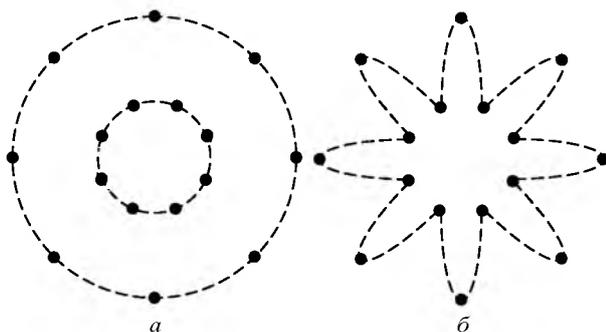


Рис. 1

на задача синтеза АФР по заданной амплитудной ДН. Однако более простой задачей является нахождение АФР по требованиям к заданной комплексной ДН. При таком подходе ДН с указанными параметрами определяется как физически реализуемая ДН некоторой антенны с близкой геометрией [10]. В качестве такой антенны с исходной геометрией может использоваться КАР.

В соответствии с данным подходом будем считать известными следующие параметры:

– число N и координаты $x_n^{(1)}$, $y_n^{(1)}$ всех излучателей ККАР, $n = \overline{1, N}$;

– ДН излучателей в составе ККАР $\mu_n^{(1)}(\varphi)$, $n = \overline{1, N}$;

– заданную ДН в комплексной форме, в качестве которой может быть выбрана физически реализуемая ДН КАР, определяемая таблично или, например, соотношением

$$F^{(0)}(\varphi) = \sum_{n=1}^N A_n^{(0)} \mu_n^{(0)}(\varphi) \times \exp[-ik(x_n^{(0)} \cos \varphi + y_n^{(0)} \sin \varphi)],$$

где $A_n^{(0)}$ – АФР в КАР, обеспечивающее формирование ДН с заданными параметрами; $\mu_n^{(0)}$ – ДН излучателей в составе КАР; k – волновое число свободного пространства; $x_n^{(0)}$, $y_n^{(0)}$ – координаты излучателей в составе КАР.

Для нахождения АФР ККАР, обеспечивающего формирование ДН с заданными параметрами, выполняются следующие операции:

1. Для множества направлений φ_l , $l = \overline{1, L}$, накладывается условие совпадения синтезируемой ДН ККАР и заданной ДН КАР $F^{(1)}(\varphi_l) = F^{(0)}(\varphi_l)$, где

$$F^{(1)}(\varphi) = \sum_{n=1}^N A_n^{(1)} \mu_n^{(1)}(\varphi) \times \exp[-ik(x_n^{(1)} \cos \varphi + y_n^{(1)} \sin \varphi)],$$

где $A_n^{(1)}$ – искомые токи в элементах, обеспечивающие формирование ДН с параметрами, близкими к заданным. Необходимо отметить, что ДН излучателей в составе ККАР $\mu_n^{(1)}$ могут отличаться от ДН излучателей КАР $\mu_n^{(0)}$.

2. Формируется переопределенная система L линейных алгебраических уравнений относительно N неизвестных комплексных амплитуд $A_n^{(1)}$, $n = \overline{1, N}$:

$$T\mathbf{A}^{(1)} = \mathbf{F}_0, \quad (1)$$

где T – прямоугольная матрица с размерами $L \times N$, элементами которой являются ДН всех N излучателей в L направлениях; $\mathbf{A}^{(1)}$ – вектор-столбец размера $N \times 1$, элементами которого являются значения искомых комплексных амплитуд токов $A_n^{(1)}$ в антенных элементах ККАР; \mathbf{F}_0 – вектор-столбец размера $L \times 1$, элементами которого являются значения заданной ДН в направлениях φ_l , $l = \overline{1, L}$.

Элементы матрицы T определяются соотношением

$$t_{n,l} = \mu_n^{(1)}(\varphi_l), \quad n = \overline{1, N}, \quad l = \overline{1, L},$$

а элементы вектор-столбца \mathbf{F}_0 – как $F_l = F_0(\varphi_l)$.

3. Решение системы уравнений (1):

$$\mathbf{A}^{(1)} = (T^+T)^{-1}T^+\mathbf{F}_0 \quad (2)$$

("+" – символ одновременного выполнения операций транспонирования и комплексного сопряжения) позволяет найти требуемое амплитудно-фазовое распределение в ККАР.

Решение вида (2) определяет минимальное расхождение формируемой и заданной ДН [11].

Анализ эффективности применения разработанного алгоритма синтеза АФР в ККАР. Разработанный алгоритм направлен в первую очередь на синтез АФР, обеспечивающего формирование ДН с заданными параметрами. В соответствии с этим определим эффективность разработанного алгоритма как интегральное среднее квадратическое отклонение заданной и синтезированной ДН:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{2\pi} |F^{(1)}(\varphi) - F^{(0)}(\varphi)|^2 d\varphi}{\int_0^{2\pi} |F^{(0)}(\varphi)|^2 d\varphi}. \quad (3)$$

При проведении исследований с помощью математического моделирования рассматривалась возможность сохранения заданных параметров ДН при замене КАР на ККАР.

Результаты исследований 16-элементной ККАР приведены на рис. 2–4 для различных случаев геометрии. Геометрия ККАР (рис. 2–4, *a*, излучатели обозначены маркерами ●) определяется сдвигом излучателей КАР, расположенных в правой полукругности (обозначены маркерами ○), в горизонтальном направлении по закону

$$x_{\text{ККАР}}(\varphi) = x_{\text{КАР}} |\varphi - \pi|^a; \quad y_{\text{ККАР}} = y_{\text{КАР}},$$

где $x_{\text{ККАР}}$, $y_{\text{ККАР}}$, $x_{\text{КАР}}$, $y_{\text{КАР}}$ – координаты излучателей ККАР и КАР соответственно; a – параметр. Азимут отсчитывается от положительного направления оси x .

При проведении исследований радиус КАР R выбран равным 1.5λ , что обеспечивает наиболее часто используемое при практическом построении КАР расстояние между излучателями 0.6λ . Число направлений L во всех случаях выбира-

лось равным 360, угловые направления φ_l выбирались равномерно в секторе углов $[0, 2\pi]$.

На рис. 2–4, *a* представлены геометрии ККАР и порождающей КАР, на рис. 2–4, *б* – ДН исследуемых антенн. Рис. 2 построен при $a = 0.4$, рис. 3 – при $a = 0.6$, рис. 4 – при $a = 0.8$. Сплошными линиями представлена ДН порождающей КАР, пунктирными – ДН ККАР без коррекции АФР, штриховыми линиями – ДН ККАР после коррекции АФР по предложенному алгоритму.

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показывает, что даже небольшое изменение геометрии ККАР без коррекции АФР приводит к изменению УБЛ. Так, уровень первого бокового лепестка повышается на 4 дБ при сохранении неизменным главного лепестка ДН.

С увеличением параметра a отклонение формы ККАР от КАР также возрастает (рис. 3, *a*). При

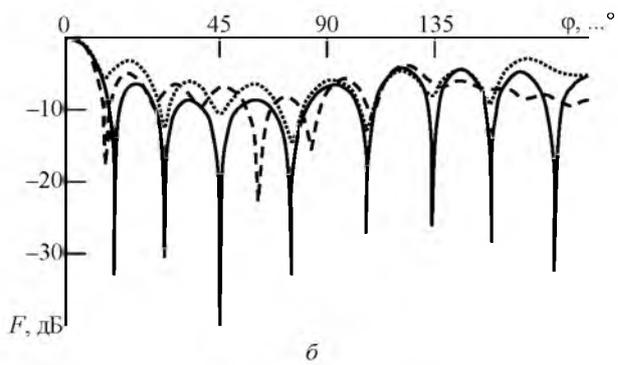
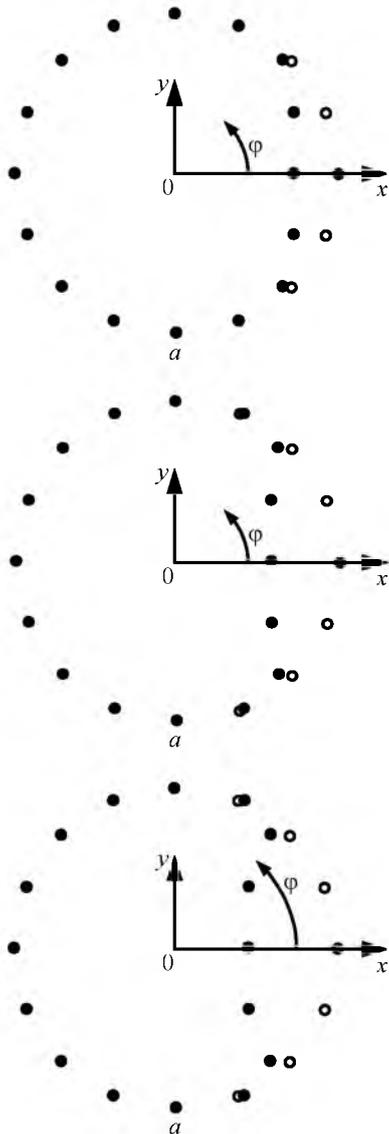


Рис. 2

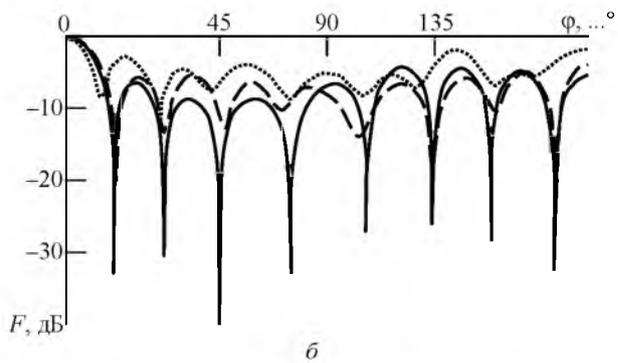


Рис. 3

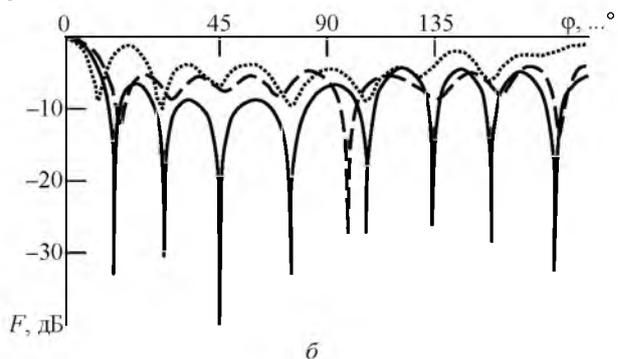


Рис. 4

отсутствии коррекции АФР это приводит к увеличению отклонения ДН ККАР от ДН КАР (рис. 3, б). Следует отметить общее повышение УБЛ в ДН ККАР и появление двух максимумов, практически совпадающих по уровню с главным лепестком ДН (рис. 3, б, пунктирная кривая). Дальнейшее увеличение значения параметра $a = 0.8$ (рис. 4) обуславливает не только рост УБЛ, но и формирование двух дополнительных максимумов ДН, один из которых формируется в диаметрально противоположном направлении по отношению к направлению $\varphi = 0$.

В то же время из анализа графиков, представленных на рис. 2–4, б, следует, что использование предложенного алгоритма позволяет сохранить параметры ДН практически без изменения.

Полученные результаты показывают, что при отсутствии коррекции АФР ККАР не обеспечивает формирование ДН с заданными параметрами. В частности, наблюдается смещение главного максимума ДН и изменение характера огибающей боковых лепестков. В то же время выполнение коррекции АФР позволяет сохранить ДН практически без изменения. При этом значения ε (3) не превышают 10^{-3} .

Результаты, получаемые при других сочетаниях параметров расположения излучателей ККАР, не имеют принципиальных отличий от приведенных на рис. 2–4.

Таким образом, как показывают представленные результаты, использование предлагаемого алгоритма синтеза и коррекции АФР для ККАР позволяет формировать ДН с заданными параметрами.

По представленным результатам исследований могут быть сделаны следующие выводы.

Предложенный алгоритм синтеза АФР позволяет при известных положениях излучателей в составе ККАР и заданных параметрах ДН определить АФР, обеспечивающее минимальное в среднеквадратическом смысле отклонение параметров формируемой ДН от заданных. В основе указанного алгоритма лежит подход, основанный на представлении ДН с заданными параметрами в виде физически реализуемой ДН, формируемой антенной более простой геометрии. Это позволяет использовать наиболее простые методы синтеза АФР по заданной комплексной ДН. В качестве такой антенны, обеспечивающей формирование комплексной ДН, предлагается использовать КАР. Предложенный алгоритм основан на решении переопределенной системы уравнений относительно неизвестных комплексных коэффициентов в излучателях ККАР.

Результаты выполненных исследований показывают, что применение предложенного алгоритма даже при существенных отличиях формы ККАР от кольцевой антенны позволяет сформировать ДН, практически полностью совпадающую с требуемой. Среднеквадратическое отклонение ДН, формируемых КАР и ККАР, не превышает 10^{-3} . В то же время при отсутствии коррекции АФР переход от КАР к ККАР приводит к значительному изменению параметров ДН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / под ред. А. М. Рембовского. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 624 с.
2. Системы радиосвязи / В. С. Тоискин, В. И. Петренко, М. Р. Бибарсов, Д. Ю. Мишин; Ставропольский воен. ин-т ракетных войск. Ставрополь, 2010. 217 с.
3. Сосунов Б. В., Бородулин Р. Ю. Конструкционный синтез фазированных антенных решеток // Науч.-техн. вед. СПбГУ. 2013. № 2. С. 47–54.
4. Nelson J. G. F. Design and Implementation of a Closed Cylindrical BFN-Fed Circular Array Antenna for Multiple-Beam Coverage in Azimuth // *Antennas and Propag.* 2012. Vol. 60, № 2. P. 863–869.
5. Wideband and High-Gain Uniform Circular Array With Calibration Element for Smart Antenna Application / Tian Li, Fu-Shun Zhang, Fan Zhang, Ya-Li Yao, Li Jiang // *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.* 2016. Vol. 15. P. 230–233.
6. Бахрах Л. Д., Кременецкий С. Д. Синтез излучающих систем. Теория и методы. М.: Сов. радио, 1974. 223 с.
7. Зелкин Е. Г., Соколов В. Г. Методы синтеза антенн: фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрытием. М.: Сов. радио, 1980. 341 с.
8. Кременецкий С. Д. Прикладные математические модели для решения задач синтеза, восстановления и коммуникаций // *Антенны.* 2004. № 8–9. С. 88–96.
9. Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф. Синтез антенн на основе атомарных функций: в 2 кн. Кн. 2. М.: ИПРЖР, 2003. 72 с.
10. Габриэльян Д. Д., Волошин В. А., Оводов О. В. Синтез амплитудно-фазового распределения в антенных решетках с произвольным контуром // *Антенны.* 2010. № 2. С. 44–47.
11. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 4-е изд. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. 552 с.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2016 г.

Для цитирования: Синтез амплитудно-фазового распределения в квазиколецевой антенной решетке / М. Р. Бибарсов, Е. В. Грибанов, Д. Д. Габриэлян, Ден. С. Федоров, Дан. С. Федоров // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 28–33.

Бибарсов Марат Рашидович – кандидат технических наук (1999), доцент (2007) Военной академии связи (Санкт-Петербург). Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика, радиотехника.
E-mail: BibarsovMR@rambler.ru

Грибанов Евгений Владимирович – кандидат технических наук (2011), преподаватель Военной академии связи (Санкт-Петербург). Автор 61 научной работы. Сфера научных интересов – радиоэлектронные системы и устройства.
E-mail: jonoton@mail.ru

Габриэлян Дмитрий Давидович – доктор технических наук (1998), профессор (2000), заместитель начальника научно-технического комплекса по науке ФГУП "Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи". Автор более 350 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика, радиотехника.
E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

Федоров Денис Сергеевич – магистр по направлению "Физика" (2019), аспирант ФГУП "Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи". Автор 12 научных работ. Сфера научных интересов – радиофизика, радиотехника.
E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

Федоров Данила Сергеевич – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2013), аспирант ФГУП "Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи". Автор 4 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофизика, радиотехника.
E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

M. R. Bibarsov, E. V. Gribanov
Military Academy of Communication (Saint Petersburg)
D. D. Gabriel'yan, Den. S. Fedorov, Dan. S. Fedorov
Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication

Synthesis of Amplitude-Phase Distribution in Quasiconcave an Antenna Array

Abstract. Ring antenna arrays find wide application in radio systems of various purpose. However, in many cases it is necessary to use quasi-ring antenna arrays when the emitters are not located in a circle. Such a transition leads to a change in the radiation pattern, i.e. to a shift in its main maximum, an increase in the level of the side lobes, and appearance of two maxima of the radiation pattern. Therefore, to ensure the formation of a directional pattern with specified parameters, it is necessary to correct the amplitude-phase distribution of the quasi-annular antenna array. In this paper, features are considered and an algorithm for the synthesis of the amplitude-phase distribution of a quasi-annular antenna array is developed. The possibilities of preserving the parameters of the directional pattern during the transition from the ring to the quasi-annular antenna array are analyzed.

Key words: Circular Antenna Array, Quasi Circular Antenna Array, Synthesis of Amplitude-Phase Distribution of the Radiation Pattern, Directional Diagram

REFERENCES

1. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Koz'min V. A. *Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva* [Radio monitoring – problems, methods, means]. Moscow, *Goryachaya liniya-Telekom*, 2010, 624 p. (In Russian)
2. Toiskin V. S., Petrenko V. I., Bibarsov M. R., Mishin D. Yu. *Sistemy radiosvyazi* [Radio communication systems]. Stavropol, *Stavropol'skii voennyi institut Raketnykh voisk*, 2010, 217 p. (In Russian)
3. Sosunov B. V., Borodulin R. Yu. Structural synthesis of phased antenna arrays. Scientific and technical statements of SPBGPU, 2013, no. 2, pp. 47–54. (In Russian)
4. Nelson J. G. F. Design and Implementation of a Closed Cylindrical BFN-Fed Circular Array Antenna for Multiple-Beam Coverage in Azimuth. *Antennas and Propag.*, 2012, vol. 60, no. 2, pp. 863–869.
5. Tian Li, Fu-Shun Zhang, Fan Zhang, Ya-Li Yao, Li Jiang. Wideband and High-Gain Uniform Circular Array With Calibration Element for Smart Antenna Application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, vol. 15, pp. 230–233.
6. Bakhrakh L. D., Kremenetsky S. D. *Sintez izluchayushchikh sistem. Teoriya i metody* [Synthesis of radiating systems. Theory and methods]. Moscow, *Sov. radio*, 1974, 223 p. (In Russian)
7. Zelkin E. G., Sokolov V. G. *Metody sinteza antenn: fazirovannye antennnye reshetki i anteny s nepre-ryvnym raskryvom* [Antenna synthesis methods: phased antenna arrays and antennas with continuous opening]. Moscow, *Sov. radio*, 1980, 341 p. (In Russian)

8. Kremenetsky S. D. Applied mathematical models for solving problems of synthesis, restoration and communication. *Antenny*, 2004, no. 8–9, pp. 88–96. (In Russian)

9. Zelkin E. G., Kravchenko V. F. *Sintez antenn na osnove atomarnykh funktsii* [Synthesis of antennas based on atomic functions, vol. 2]. Moscow, *IPRZhR*, 2003, 72 p. (In Russian)

10. Gabrielyan D. D., Voloshin V. A., Ovodov O. V. Synthesis of the amplitude-phase distribution in antenna arrays with an arbitrary contour. *Antenny*, 2010, no. 2, pp. 44–47. (In Russian)

11. Gantmakher F. R. *Teoriya matrits. 4-e izd.* [Theory of matrices]. Moscow, *Nauka*, 1983, 552 p. (In Russian)

Received December, 18, 2016

For citation: Bibarsov M. R., Griбанov E. V., Gabrielyan D. D., Fedorov Den. S., Fedorov Dan. S. Synthesis of amplitude-phase distribution in quasiconcave an antenna array. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 2, pp. 28–33. (In Russian)

Marat R. Bibarsov – Ph.D. in Engineering (1999), Associate Professor (2007) of Military Academy of Communication (Saint Petersburg). The author of more than 170 scientific publications. Area of expertise: radiophysics; radio engineering.

E-mail: BibarsovMR@rambler.ru

Evgeny V. Griбанov – Ph.D. in Engineering (2011), Faculty Member of Military Academy of Communication (Saint Petersburg). The author of 61 scientific publications. Area of expertise: radiophysics; radio engineering.

E-mail: jonoton@mail.ru

Dmitry D. Gabrielyan – D.Sc. in Engineering (1998), Professor (2000), Deputy Head of Science and Technology Complex in Research, Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication. The author of more than 350 scientific publications. Area of expertise: radiophysics; radio engineering.

E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

Denis S. Fedorov – Master of Science in Physics (2013), the postgraduate student of Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication. The author of 12 scientific publications. Area of expertise: radiophysics; radio engineering.

E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

Danil S. Fedorov – Master of Science in Infocommunication Technologies and Communication systems (2013), the postgraduate student of Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: radiophysics; radio engineering.

E-mail: d.gabrieljan2011@yandex.ru

УДК 537.874

К. А. Вытовтов

Астраханский государственный технический университет

Эффект втягивания электромагнитной волны одноосной анизотропной средой с магнитной анизотропией

Рассмотрено распространение плоской гармонической волны параллельно границе раздела вакуума и одноосной анизотропной среды. Описан так называемый эффект втягивания. Показано, что в данном случае в анизотропной среде может возбуждаться объемная волна, а отраженная волна должна распространяться перпендикулярно границе раздела слоев.

Одноосная анизотропная среда, эффект втягивания, коэффициент отражения, коэффициент прохождения

Впервые эффект втягивания плоской электромагнитной волны в анизотропную среду при ее распространении в вакууме параллельно границе раздела сред рассмотрен в [1], где этот эффект назван *эффектом втягивания волны*. В указанной работе показано, что действительная часть

нормальной компоненты вектора Пойтинга в анизотропной среде при распространении падающей волны вдоль границы раздела сред не является нулевой. Отсюда следует возможность распространения мощности электромагнитной волны в анизотропной среде под произвольным углом.